



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**«Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή ποζολανικού  
τσιμέντου με λεπτόκοκκο περλίτη»**

**ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΟΛΥΜΠΙΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΧΡΗΣΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)**

**ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΓΚΑΜΑΛΕΤΣΟΣ ΠΛΑΤΩΝ**

**ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ, 2023**

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή την εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους εκείνους που βοήθησαν στην πραγματοποίηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου, κύριο Χρηστίδη Γεώργιο, για την ανάθεση του θέματος, τη βοήθεια που μου προσέφερε, και την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους κ. Γαλετάκη Μιχάλη και κ. Γκαμαλέτσο Πλάτων για το χρόνο που διέθεσαν για τη διόρθωση και αξιολόγηση της εργασίας, καθώς και για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ράκα Στέλλα, μέλος ΕΤΕΠ και τον Τριανταφύλλου Γεώργιο, μέλος ΕΔΠ, για την αμέριστη βοήθειά τους και την υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τους φίλους μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια καθώς επίσης τους γονείς μου για την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

*Αφιερώνεται  
στον Κωνσταντίνο και τη Βασιλική*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας σε ποζολανικό τσιμέντο με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης περλίτη (5, 10, 15, 20 και 35%) για διαφορετικές ημέρες ωρίμανσης (7, 14, 28, 60 ημέρες).

Χρησιμοποιήθηκε κλίνκερ τύπου Portland της εταιρείας «TITAN A.E.» και υπέρλεπτος περλίτης (microsilica – W) της εταιρείας «IMERYS». Το κλίνκερ λειοτριβήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη κοκκομετρία. Στη συνέχεια τα υλικά, τα οποία είχαν μορφή πούδρας, αναμίχθηκαν με προσθήκη νερού σε αναλογία νερού/κλίνκερ (w/c): 0,5. Με την πάστα που δημιουργήθηκε κατασκευάστηκαν συνολικά 216 κυβικά δοκίμια, διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 50 mm.

Στα δοκίμια αυτά έπειτα από το πέρας συγκεκριμένων ημερών ωρίμανσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα μονοαξονικής θλίψης και υπολογίστηκε η αντοχή τους. Τα θραύσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία λειοτριβήθηκαν εκ νέου σε αχάτη και πραγματοποιήθηκε ορυκτολογική ανάλυση αυτών με περιθλασιμετρία ακτίνων –X (XRD).

Τα αποτελέσματα των ακτινογραφημάτων πιστοποιούν την ύπαρξη ένυδρων ασβεστοπυριτικών φάσεων με τη μορφή τομπερμορίτη και γεννίτη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης, η αντοχή των δοκιμίων αυξάνεται με τη πάροδο του χρόνου, αλλά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει έντονη αύξηση των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη μετά τις 28 ημέρες ωρίμανσης. Τα δοκίμια που ωρίμασαν σε συνθήκες ψύξης σημείωσαν ικανοποιητικές αντοχές, για όλες τις περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη στις 60 ημέρες ωρίμανσης από 38 MPa μέχρι και 80 MPa.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1. Κλίνκερ.....	1
1.2. Στάδια Παραγωγής Κλίνκερ και Τσιμέντου.....	3
1.3. Σχηματισμός Ορυκτολογικών Φάσεων του Κλίνκερ κατά την Έψηση .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	6
2.1. Ενυδάτωση του τσιμέντου.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ.....	9
3.1. Επίδραση της θερμοκρασίας στην ποζολανική αντίδραση .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	12
4.1. Ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων - X (XRD).....	12
4.2. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	14
4.3. Προετοιμασία δειγμάτων.....	15
4.4. Πειραματικές παρατηρήσεις.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	17
5.1. Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης με περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD)..	17
5.1.1. Αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων-X.....	17
5.2. Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	56
Π.1. Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης.....	56
Π.2. Διαγράμματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα για τις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης .....	59
Π.3. Διαγράμματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα για τις διαφορετικές ημέρες ωρίμανσης .....	61

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Κλίνκερ

Το τσιμέντο είναι μια λεπτόκοκκη υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο, όταν αναμιχθεί με το νερό, σχηματίζει μία πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται, αποκτώντας έτσι την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της. Το τσιμέντο όταν αναμιχθεί με νερό στερεοποιείται τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Το στερεοποιημένο τσιμέντο δεν διαλύεται μέσα στο νερό. Είναι αναγκαίο να διατηρεί σταθερό τον όγκο του και να έχει μία συγκεκριμένη αντοχή σε θλίψη για 28 ημέρες μετά την παρασκευή του. Η μεγάλη του αντοχή σε θλίψη το ξεχωρίζει από τις άλλες υδραυλικές κονίες (Τσακαλάκης, 2010).

Στη σύγχρονη εποχή, το τσιμέντο αποτελεί το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό στη κατασκευαστική βιομηχανία. Έχει τη μορφή λεπτόκοκκης σκόνης, η οποία αποτελείται κατά 90% από οξειδία ασβεστίου, πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου, καθώς και από μικρές ποσότητες γύψου και αλάτων μαγνησίου, καλίου κ.λ.π. Χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό κατά την παρασκευή σκυροδέματος και κονιαμάτων.

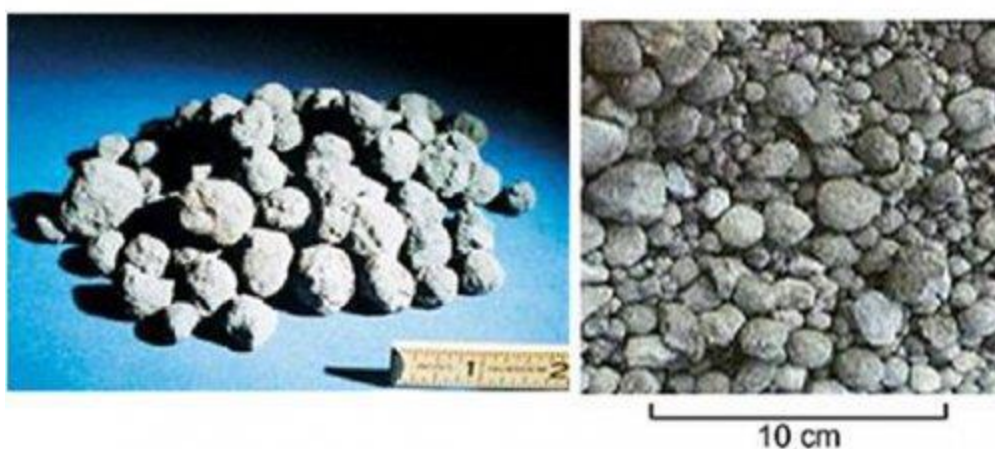
Υπάρχουν διάφορα είδη τσιμέντου είδη (τύποι τσιμέντων), με συνηθέστερο αυτό που καλείται κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Το κοινό τσιμέντο Portland, είναι ένα γκρίζο λεπτομερές υλικό, που προκύπτει από τη λειοτρίβηση του τελικού προϊόντος της παραγωγικής διαδικασίας έψησης σε μία τσιμεντοβιομηχανία, που ονομάζεται κλίνκερ, σε συνάλεση με διαφορετικά ποσοστά γύψου.



**Εικόνα 1:** Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου (Πηγή: [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

Η πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου, είναι ένα μείγμα, γνωστό ως φαρίνα, που αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο και άργιλο με αναλογία περίπου 75% ασβεστόλιθο ( $\text{CaCO}_3$ ) και 25% άργιλο. Η άργιλος αυτή περιέχει οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), οξείδιο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και νερό  $\text{H}_2\text{O}$ . Το μείγμα αυτό μπορεί να περιέχει επίσης μικρές ποσότητες χαλαζιακών πετρωμάτων, σιδηρομεταλλευμάτων, βωξίτη κ.ά (Wendehorst, 1981).

Μετά την ξήρανση και την άλεση, το λεπτόκοκκο και ομοιογενές μείγμα άμμου θερμαίνεται σε θερμοκρασία  $\sim 1450^\circ\text{C}$ , μέχρι να σχηματιστεί ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος σε μορφή σφαιριδίων με διάμετρο 10-25mm. Το υλικό αυτό, το οποίο παρουσιάζει υαλώδη επιφανειακή επίτηξη, είναι διεθνώς γνωστό ως κλίνκερ τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).



**Εικόνα 2:** Σφαιρίδια (Pellets) μεγέθους 10-25mm του κλίνκερ τσιμέντου (Πηγή: [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

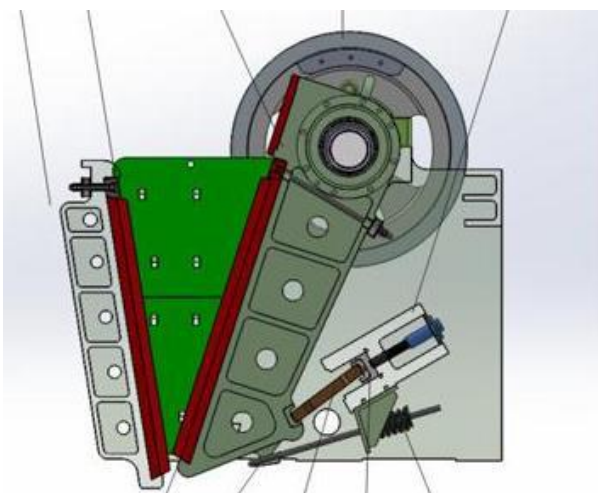


## 1.2. Στάδια Παραγωγής Κλίνκερ και Τσιμέντου

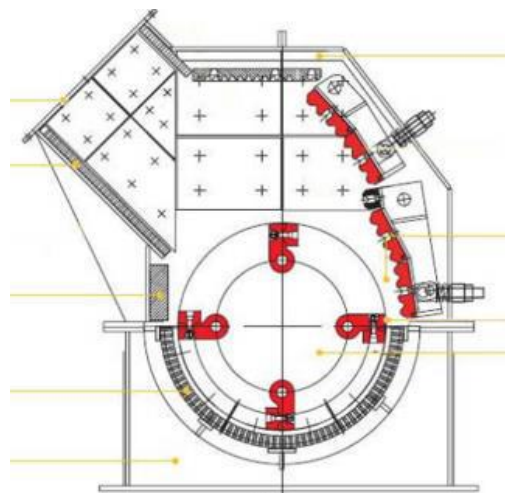
Τα στάδια παραγωγής του κλίνκερ χωρίζονται ακολούθως όπως παρουσιάζονται και στην **Εικόνα 5**:

- Λατόμευση των πρώτων υλών, όπου γίνεται με τη χρήση εκρηκτικών υλών ώστε να επιτευχθεί η θραύση των σκληρών πετρωμάτων (ασβεστόλιθος), ενώ για τα μαλακά πετρώματα (άργιλος) γίνεται με χρήση εκσκαφέα. (Τσακαλάκης, 2010).
- Θραύση των πρώτων υλών. Τόσο για τον ασβεστόλιθο όσο και για την άργιλο απαιτείται η θραύση των δύο υλικών, ενώ ακολουθείται διαφορετική διαδικασία για το κάθε ένα. Γίνεται χρήση μύλου με σφυριά καθώς και σιαγωνωτού θραυστήρα (**Εικόνα 3 & 4**). (Hewlett, 1998).
- Αποθήκευση και προ-ομοιογενοποίηση των πρώτων υλών. Μετά την μεταφορά του, το υλικό αποθηκεύεται σε κλειστούς χώρους μέχρι την διεργασία της έψησης και της πυροσυσσωμάτωσης. Προκειμένου να γίνει ομοιόμορφη έψηση και παραγωγή κατάλληλης ποιότητας κλίνκερ πρέπει να επιτευχθεί η σωστή χημική σύσταση. Για τον λόγο αυτό, λαμβάνει χώρα προ-ομοιογενοποίηση η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διεργασίες για την παραγωγή του κλίνκερ. Οι πρώτες ύλες χωρίζονται σε δύο μείγματα, ένα υψηλής και ένα χαμηλής τιτλοδότησης σε ελεύθερη άσβεστο ( $\text{CaO}$ ). Δημιουργούνται δύο σωροί ώστε όταν η απόθεση γίνει από τον ένα σωρό, η απόληψη να γίνεται από τον άλλο. Η διαδικασία αυτή γίνεται διάφορες μεθόδους όπως η μέθοδος Windrow και η μέθοδος Chevron (Τσακαλάκης, 2010).
- Ξήρανση και άλεση πρώτων υλών και προ-ομοιογενοποίηση φαρίνας. Μετά τη διαδικασία της προ-ομοιογενοποίησης το μείγμα μεταφέρεται σε σφαιρόμυλους μέσα στους οποίους γίνεται η άλεση του υλικού. Από την άλεση αυτή θα δημιουργηθεί ένα λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο ονομάζεται φαρίνα. Η τελική ομοιογενοποίηση της φαρίνας πραγματοποιείται με χρήση ατμοσφαιρικού αέρα, ο οποίος διέρχεται από τον πυθμένα του σιλό αναμειγξέως και εξέρχεται από αυτόν ελεγχόμενα μέσω του δωματίου ελέγχου (control room).
- Έψηση του κλίνκερ. Η έψηση του κλίνκερ πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Hewlett, 1998). Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την προθέρμανση της φαρίνας, η οποία ελέγχεται από το δωμάτιο ελέγχου και φτάνει μέχρι και τους  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το

δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την έψηση της φαρίνας εντός περιστροφικών κλιβάνων στους  $1400^{\circ}\text{C}$  -  $1500^{\circ}\text{C}$ , με αποτέλεσμα την ανακρυστάλλωση της φαρίνας και τη δημιουργία του κλίνκερ. Τέλος, τα σφαιρίδια του κλίνκερ που δημιουργούνται οδηγούνται στον ψυχραντήρα όπου η θερμοκρασία τους πέφτει κάτω από τους  $150^{\circ}\text{C}$ .

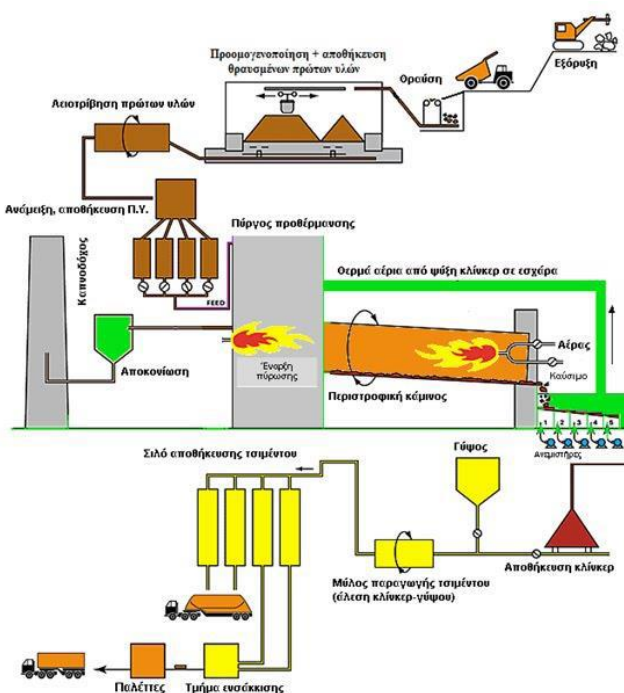


Εικόνα 3: Σιαγωγωτός θραυστήρας



Εικόνα 4: Θραυστήρας με σφυριά

(Πηγή: Τσακαλάκης, 2010).



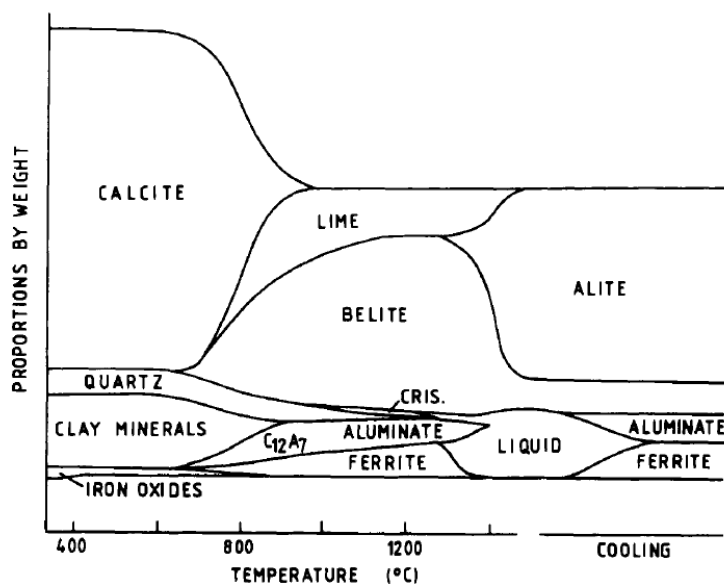
Εικόνα 5: Στάδια Παραγωγής Τσιμέντου (Πηγή: Τσακαλάκης, 2010).

### 1.3. Σχηματισμός Ορυκτολογικών Φάσεων του Κλίνκερ κατά την Έψηση

Οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ παρουσιάζονται στο Πίνακα 1.

**Πίνακας 1:** Συμβολισμοί φάσεων κλίνκερ στην χημεία του τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).

Συμβολισμός στην χημεία τσιμέντου	Χημική Φόρμουλα	Ονομασία	Ορυκτή φάση
$C_3S$	$3CaO \cdot SiO_2$	πυριτικό τριασβέστιο	Αλίτης
$C_2S$	$2CaO \cdot SiO_2$	πυριτικό διασβέστιο	Βελίτης
$C_3A$	$3CaO \cdot Al_2O_3$	αργιλικό τριασβέστιο	Σελίτης
$C_4AF$	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο	Φερρίτης



**Σχήμα 1:** Σχηματικό διάγραμμα τυπικών συστατικών των φάσεων κατά τον σχηματισμό κλίνκερ τσιμέντου τύπου Portland (Πηγή: Taylor, 1997).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Τα ποζολανικά τσιμέντα διακρίνονται επίσης ανάλογα με τη σύστασή τους σε τσιμέντα CEM I – Portland, CCEM IV/A – Portland με ποζολάνη και CEM IV/B – ποζολανικά τσιμέντα Portland (ΕΛΟΤ EN 197-1).

- Τσιμέντα Portland (CEM I), χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου (για τη ρύθμιση του χρόνου πήξεως). Το κλίνκερ αλέθεται σε ειδικούς μύλους και παίρνει τη μορφή της λεπτής σκόνης του τσιμέντου.

- Τσιμέντα Portland με ποζολάνη (CEM IV/A) χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ Portland, ποζολάνης φυσικής ή τεχνητής και του απαραίτητου γύψου. Το ποσοστό της ποζολάνης ορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου και δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%. Ειδικά το τσιμέντο με 10% αδιάλυτο υπόλειμμα ονομάζεται Τσιμέντο Portland ελληνικού τύπου.

- Ποζολανικά τσιμέντα Portland (CEM IV/B) χαρακτηρίζονται εκείνα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ Portland, ποζολάνης και γύψου. Το ποσοστό της ποζολάνης που καθορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου είναι 20% έως 40%.

Στα ποζολανικά τσιμέντα ως ποζολάνη αντικατάστασης χρησιμοποιούνται σε βιομηχανική κλίμακα κυρίως η πυριτική παιπάλη, η ιπτάμενη τέφρα και η φυσική ποζολάνη (tee.gr).

Οι ποζολάνες είναι φυσικά ή τεχνητά πυριτικά ή αργιλοπυριτικά άλατα τα οποία παρουσιάζουν υδραυλικές ιδιότητες δηλαδή μετά από ανάμειξη με νερό πήγνυνται και σκληρύνονται στον αέρα ή μέσα στο νερό. Οι φυσικές ποζολάνες περιλαμβάνουν διάφορες ηφαιστειογενείς γαίες, όπως η θηραϊκή γη, ο περλίτης κ.ά, ενώ στις τεχνητές ποζολάνες υπάγονται και οι ιπτάμενες τέφρες εφόσον έχουν υδραυλικές ιδιότητες.

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, η πάστα που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων είναι όμοια με τις περιεκτικότητες που ορίζουν το τσιμέντο Portland με ποζολάνη και ποζολανικό τσιμέντο Portland χωρίς την προσθήκη γύψου. Ως ποζολανικό υλικό χρησιμοποιήθηκε υπέρλεπτος περλίτης από την εταιρεία «IMERYS» τύπου microsilica – W.

Πετρολογικά ο περλίτης είναι υαλώδης ηφαιστειακό πέτρωμα ρυολιθικής σύστασης με μαργαριτώδη εμφάνιση και περλιτική υφή. Περιέχει περίπου 70-75%  $\text{SiO}_2$  και 12-18%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ως περλίτες περιγράφονται και συγκολλημένες ροές τέφρας (πυρομβρίτες) και φλεβικά πετρώματα μικρού βάθους. Στη φυσική τους μορφή περιέχουν 2-5% νερό. Λόγω της υαλώδους δομής του και της υψηλής περιεκτικότητάς του σε  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ο περλίτης είναι πέτρωμα με έντονες ποζολανικές ιδιότητες στην παρουσία νερού και υδροξειδίου του ασβεστίου (Χρηστίδης, 2012, T.K. Erdem et al., 2006). Απαντάται σε μεγάλα κοιτάσματα στην Τουρκία καθώς και στον Ελλαδικό χώρο όπως για παράδειγμα στην Μήλο, την Κίμωλο και το νησί Γυαλί. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, ο περλίτης έχει μεταξύ άλλων θερμομονωτικές ιδιότητες (Singh και Garg, 1991).

## 2.1. Ενυδάτωση του τσιμέντου

Στη χημεία του τσιμέντου, ο όρος "ενυδάτωση" δηλώνει το σύνολο των μεταβολών που συμβαίνουν όταν ένα άνυδρο τσιμέντο ή μία από τις φάσεις του, αναμιγνύεται με νερό. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι γενικά πιο πολύπλοκες από τις απλές μετατροπές των άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ένυδρες ενώσεις. Ένα μείγμα τσιμέντου και νερού σε τέτοιες αναλογίες, ώστε να επέρχεται πήξη και σκλήρυνση, ονομάζεται πάστα. Η έννοια του όρου αυτού επεκτείνεται ώστε να περιλαμβάνει και το σκληρυμένο υλικό (Taylor, 1997).

Οι ένυδρες ενώσεις είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους και με τα αδρανή, αυξάνοντας με την πάροδο του χρόνου τη συνοχή των πολτών που προκύπτουν από αυτές. Το τσιμέντο Portland είναι μίγμα πολλών συστατικών και συνεπώς η ενυδάτωσή του είναι μια πολύπλοκη διαδικασία αποτελούμενη από επιμέρους χημικές αντιδράσεις που προχωρούν τόσο παράλληλα, όσο και διαδοχικά. Η διαδικασία αρχίζει αμέσως μετά την επαφή τσιμέντου-νερού και συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας. Η πορεία της ενυδάτωσης επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, από τους οποίους οι κυριότεροι είναι (Τσίμας και Τσιβιλής, 2004):

- Η σύσταση των φάσεων του τσιμέντου και η παρουσία ξένων ιόντων στο πλέγμα των φάσεων.
- Η λεπτότητα του τσιμέντου και ειδικότερα η ειδική επιφάνεια και η κατανομή μεγέθους κόκκων.

- Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (W/C).
- Η θερμοκρασία διατήρησης των δοκιμών νερού-τσιμέντου.
- Η παρουσία προσθέτων (χημικές ενώσεις που εισάγονται στο τσιμέντο σε μικρά ποσοστά και επηρεάζουν το ρυθμό ενυδάτωσης και τις ιδιότητες της πάστας).

Η αναλογία νερού/τσιμέντου (w/c) ή νερού/στερεού (w/s), είναι συνήθως 0,3-0,6. Η πήξη είναι η στερεοποίηση χωρίς σημαντική ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής, και συνήθως συμβαίνει μέσα σε λίγες ώρες. Σκλήρυνση είναι η σημαντική ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής και είναι συνήθως μια πιο αργή διαδικασία (Taylor, 1997).

Επειδή το τσιμέντο Portland, είναι ένα σχετικά πολύπλοκο μίγμα, έχουν γίνει πολλές μελέτες με στόχο τη διαλεύκανση της χημείας ενυδάτωσής του στις φάσεις που το αποτελούν. Για δεδομένη κοκκομετρική κατανομή και λόγο w/s, το πυριτικό τριασβέστιο ή αλίτης ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ή  $\text{C}_3\text{S}$ ) πήζει και σκληραίνει με τρόπο παρόμοιο με αυτόν του τυπικού τσιμέντου Portland. Χρησιμοποιώντας XRD ή άλλες μεθόδους, μπορεί να αποδειχθεί ότι περίπου το 70% του αλίτη ( $\text{C}_3\text{S}$ ) αντιδρά τυπικά σε 28 ημέρες και σχεδόν όλο σε 1 έτος. Τα προϊόντα ενυδάτωσης του είναι υδροξείδιο του ασβεστίου (CH) και ένα σχεδόν άμορφο ένυδρο πυριτικό ασβέστιο, που ονομάζεται C-S-H, το οποίο έχει τις ιδιότητες μιας άκαμπτης γέλης. Ο βελίτης ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ή  $\text{C}_2\text{S}$ ) ή πυριτικό διασβέστιο, συμπεριφέρεται παρόμοια, αλλά σχηματίζει πολύ λιγότερο CH και η αντίδραση είναι πιο αργή, περίπου το 30% αντιδρά τυπικά σε 28 ημέρες και το 90% σε 1 έτος (Taylor, 1997). Γενικά, η δραστηριότητα του  $\text{C}_2\text{S}$  μπορεί να χαρακτηριστεί μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη του  $\text{C}_3\text{S}$ . Από τις υπάρχουσες κρυσταλλικές μορφές του πυριτικού διασβεστίου ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ή  $\text{C}_2\text{S}$ ), το  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  είναι η πιο σημαντική γιατί βρίσκεται κυρίως στο κλίνκερ. Η μορφή αυτή είναι μετασταθής σε όλες τις θερμοκρασίες (Τσίμας και Τσιβιλής, 2004).

Τόσο στον αλίτη όσο και στον βελίτη, οι ρυθμοί αντίδρασης εξαρτώνται από την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και άλλους παράγοντες.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

Οι ποζολάνες είναι από τα πρώτα υλικά με συνδετικές ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν από τους αρχαίους πολιτισμούς. Κάποια από τα πιο σημαντικά κτίσματα που κατασκευάστηκαν διαχρονικά βασίστηκαν στην ποζολάνη. Το ενδιαφέρον για την ποζολάνη αυξήθηκε διότι η χρήση της στο τσιμέντο τύπου Portland έχει μειώσει σημαντικά τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η χρήση της ποζολάνης μειώνει αρκετά το εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα ανά τόνο παραγωγής και βελτιώνει ποικιλοτρόπως τις φυσικές ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Οι ποζολάνες λαμβάνονται από διάφορες πηγές και μπορούν να είναι πετρώματα που απαντώνται στη φύση ή βιομηχανικά υποπροϊόντα. Δεν αλληλεπιδρούν απαραίτητα με το τσιμέντο τύπου Portland με τον ίδιο τρόπο και οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην ενυδάτωση π.χ. της ιπτάμενης τέφρας (FA) και του διοξειδίου του πυριτίου για να σχηματίσουν προϊόντα ενυδάτωσης είναι διαφορετικοί. Ένα σημαντικό όφελος των αναμεμιγμένων τσιμέντων είναι η βελτιωμένη αντοχή η οποία προκύπτει λόγω της αντίδραση μεταξύ της ποζολάνης και του υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  που παράγεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland (CEM-I) και σχηματίζει γέλη ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (C-S-H), που μειώνει το πορώδες του συνδετικού υλικού (Donatello et al., 2010).

Ο όρος «ποζολανική δραστηριότητα» καλύπτει όλες τις αντιδράσεις μεταξύ των δραστικών συστατικών της ποζολάνης, της υδρασβέστου και του νερού. Αν και προσεγγιστικός, ο ορισμός είναι αποδεκτός από τεχνική και πρακτική άποψη. Παρά τη δυσκολία στην παρακολούθηση της εξέλιξης των ενεργών φάσεων της ποζολάνης μέσω της διαδικασίας της ενυδάτωσης, η εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης εκτιμάται μέσω των όρων της μείωσης του ελεύθερου ασβέστη στο σύστημα. Ο όρος «ποζολανική δραστηριότητα» περιλαμβάνει δύο παραμέτρους, τη μέγιστη ποσότητα ασβέστη που μπορεί να δεσμεύσει η ποζολάνη και τον ρυθμό δέσμευσης. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται από την φύση της ποζολάνης και πιο συγκεκριμένα από την ποιότητα και την ποσότητα των ενεργών φάσεων. Η ετερογένεια των πετρωμάτων με ποζολανικές ιδιότητες και τα σύνθετα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την ενυδάτωση επαρκούν για να εξηγήσουν την αδυναμία μοντελοποίησης της ποζολανικής δραστηριότητας και επιτρέπουν μόνο την κατανόηση των γενικών τάσεων αντιδράσεων.

### 3.1. Επίδραση της θερμοκρασίας στην ποζολανική αντίδραση

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην σκλήρυνση και την αύξηση των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη του ποζολανικού τσιμέντου, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Σύμφωνα με το ισπανικό πρότυπο EHE-08, η θερμοκρασία των 5 °C αναφέρεται ως κρίσιμη συνθήκη για την ανάμιξη σε ψυχρό περιβάλλον, δεδομένου ότι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η ενυδάτωση του ποζολανικού τσιμέντου καθυστερεί. Σε γενικές γραμμές, μείωση της θερμοκρασίας ωρίμανσης κάτω από τους 20°C, προκαλεί μείωση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων των πρώιμων ημερών ωρίμανσης και η τιμή αυτή αυξάνεται αργά για περισσότερες ημέρες ωρίμανσης. Η χαμηλή θερμοκρασία ωρίμανσης επηρεάζει την ενυδάτωση του ποζολανικού τσιμέντου άμεσα και, κατά συνέπεια, την ποζολανική αντίδραση που λαμβάνει χώρα σε αυτό (Soriano et al., 2013).

Σύμφωνα με τους Escalante-García, και Sharp, (1997, 2001), η διαδικασία ενυδάτωσης του ποζολανικού τσιμέντου σε χαμηλές θερμοκρασίες (10°C) καθυστερεί και επηρεάζει άμεσα την παραγωγή του πορτλανδίτη και, κατά συνέπεια, την ποζολανική αντίδραση που πιθανά λαμβάνει χώρα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι, για όλα τα μείγματα που περιέχουν οποιονδήποτε τύπο ποζολανικού υλικού, οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης.

Οι Soriano et al. (2013) με μία σειρά διαφόρων πειραματικών διαδικασιών απέδειξαν την ύπαρξη ποζολανικής αντίδρασης, σε τσιμέντο με αντικατάσταση ποζολανικών υλικών σε περιεκτικότητα 15% και σε χαμηλές θερμοκρασίες ωρίμανσης (5-10 °C). Αυτό κατέστη δυνατό με τον εντοπισμό διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη ποζολανικής αντίδρασης ακόμη και σε αυτές τις θερμοκρασίες (5-10 °C).

Έρευνες που έχουν ασχοληθεί, με την αντικατάσταση περλίτη σε κλίνκερ, για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης, χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας ωρίμανσης, έχουν δείξει ότι με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη λειτουργούν αντιστρόφως ανάλογα με την περιεκτικότητα περλίτη, για τις ίδιες ημέρες ωρίμανσης. Πιο συγκεκριμένα, για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 20% οι αντοχές που παρατηρούνται είναι υψηλές, ενώ σε ποσοστό 30% οι αντοχές είναι μειωμένες, έως τις 60 ημέρες ωρίμανσης. Το γεγονός αυτό, μπορεί να δικαιολογηθεί με την μη ύπαρξη έντονης ποζολανικής



Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή ποζολανικού τσιμέντου με λεπτόκοκκο περλίτη

αντίδρασης στα δείγματα λίγων ημερών ωρίμανσης σε σχέση με αυτά των πολλών ημερών ωρίμανσης (Erdem et al., 2006).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή και περιγράφονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση σειράς αναλυτικών μεθόδων, όπως είναι η ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων – X (XRD) και η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

### 4.1. Ορυκτολογική ανάλυση με περιθλασιμετρία ακτίνων - X (XRD)

Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με το περιθλασίμετρο ακτίνων– X (XRD) τύπου D8 –Advance της Brucker AXS του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικόνα 6).

Σκοπός της μεθόδου είναι ο ποιοτικός προσδιορισμός των ορυκτολογικών συστατικών πετρωμάτων εδαφών και ιζημάτων. Η γνώση της ορυκτολογικής σύστασης ενός πετρώματος είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι παρέχει μία πρώτη ένδειξη για τις μηχανικές αλλά και φυσικοχημικές ιδιότητες που παρουσιάζει το υπό εξέταση δείγμα.

Σύμφωνα με την εξίσωση του Bragg ισχύει:

$$n * \lambda = 2 * d * \eta\mu\theta$$

όπου:

$\lambda$  : μήκος κύματος,  $\theta$  : γωνία ανάκλασης,  $d$  : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου.

Με την μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X, η οποία τυγχάνει ευρείας εφαρμογής, καθίσταται δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων-X που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα λεπτής κονίας.

Οι βασικές μονάδες που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων-X είναι η μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης, η λυχνία των ακτίνων-X, το γωνιόμετρο (σε κατακόρυφη θέση), ο απαριθμητής των ακτίνων-X με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και η μονάδα του μικροϋπολογιστή μέσω του οποίου καθοδηγείται ολόκληρο το σύστημα και αξιολογούνται τα δεδομένα. Το παρασκεύασμα τοποθετείται στον δειγματοφορέα

του γωνιομέτρου του περιθλασίμετρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο ενός κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων-Χ και μάλιστα με τέτοιο τρόπο ώστε το επίπεδο του παρασκευάσματος να είναι κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου.

Ταυτόχρονα ως προς τον ίδιο τον άξονα γύρω από τον οποίο διαγράφει τον κύκλο, περιστρέφεται ο απαριθμητής με κάποια σταθερή γωνιακή ταχύτητα 2θ/min και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min ίση προς το ήμισυ εκείνης του απαριθμητή έτσι ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση του απαριθμητή και την περιστροφή του δείγματος ο απαριθμητής να σχηματίζει ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος όπως και στο σημείο εξόδου των ακτίνων-Χ της λυχνίας.

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η καταγραφή της ακτινοβολίας που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων Χ των προερχόμενων από τη λυχνία ώστε να πληρούνται για κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων η εξίσωση του Bragg (Κωστάκης, 2005).



**Εικόνα 6:** Περιθλασίμετρο ακτίνων – Χ (XRD) του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## 4.2. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Μετά το πέρας των εκάστοτε ημερών ωρίμανσης των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση διαστάσεων για το κάθε ένα δοκίμιο (πλάτος, μήκος, ύψος) κι έπειτα, μετρήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή τύπου C 123N της Matest (**Εικόνα 7**), του εργαστηρίου «Έλεγχος Ποιότητας-Υγιεινή και Ασφάλεια στη Μεταλλευτική». Η συσκευή περιλαμβάνει παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο. Η επιβολή του φορτίου και η καταγραφή φορτίου και μετατόπισης γίνεται από ηλεκτρονικό σύστημα. Τα δεδομένα επεξεργάζονται και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $C_s$  προκύπτει από τη σχέση:

$$C_s = F_{\max} / A$$

όπου  $C_s$  η αντοχή σε θλίψη σε MPa,  $F_{\max}$  το μέγιστο φορτίο (N) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστογήσει και  $A$  η επιφάνεια της πλάκας φόρτισης (50x50x50 mm<sup>2</sup>).



**Εικόνα 7:** Μηχανή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

### 4.3. Προετοιμασία δειγμάτων

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν κλίνκερ και περλίτης. Το κλίνκερ θραύστηκε με σιαγωνωτό σπαστήρα και λειοτριβήθηκε σε ραβδόμυλο κι έπειτα σε σφαιρόμυλο για περίπου 45 λεπτά στον κάθε μύλο. Για την πραγματοποίηση του πειράματος τα υλικά θα έπρεπε να είναι πιο λεπτόκοκκα από 70  $\mu\text{m}$ . Ο περλίτης που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί υπέρλεπτο υλικό από την εταιρεία «IMERYS» τύπου microsilica – W, που πληρούσε απόλυτα τα παραπάνω κοκκομετρικά χαρακτηριστικά. Το δείγμα κλίνκερ το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής χορηγήθηκε από την εταιρία Α.Ε. ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΤΙΤΑΝ.

Το τσιμέντο αλέθεται στο εργοστάσιο σε πολύ μικρά σωματίδια, ώστε να βελτιώνεται η αντίδρασή του με το νερό και η ρεολογική συμπεριφορά του μείγματος νερό-τσιμέντο για όσο είναι ακόμη ρευστό. Η βελτίωση της λεπτότητας βοηθά ως ένα σημείο τις επιδόσεις του τσιμέντου (μεγαλύτερη ευκολία ανάμειξης στο σκυρόδεμα και αύξηση της αντοχής), όμως ένα πάρα πολύ λεπτοαλεσμένο τσιμέντο πήζει νωρίτερα και δυσχεραίνει την εφαρμογή του (<https://www.titan.gr/>).

Για την ομογενοποίηση του εν ξηρώ δείγματος (περλίτης και κλίνκερ) πραγματοποιήθηκε ανάδευση σε σφαιρόμυλο. Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν κυβικές μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 5cm x 5cm x 5cm. Η αναλογία νερού: κονίας είναι 0,5, σύμφωνα με τη πρότυπη βιβλιογραφική αναφορά (ASTM, C 109/C 109M, 2002). Η πάστα που κατασκευάστηκε, εργάστηκε στον αναδευτήρα μέχρις ότου να ομογενοποιηθεί το μείγμα το οποίο εν συνεχεία τοποθετήθηκε στις κυβικές μήτρες. Κατά την διάρκεια των πέντε πρώτων ημερών ωρίμανσης τα δοκίμια ψεκάζονταν με απιονισμένο νερό.

Κατασκευάστηκαν συνολικά 216 δοκίμια που ταξινομήθηκαν σε 6 σειρές ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε αντικατάσταση του κλίνκερ από περλίτη. Οι 6 σειρές ήταν: 0% περλίτης (τυφλό δείγμα ή δείγμα αναφοράς), 5%, 10%, 15%, 20% & 35% αντίστοιχα. Για την κάθε σειρά δοκιμών με διαφορετική περιεκτικότητα αντικατάστασης κλίνκερ από περλίτη κατασκευάστηκαν 36 δοκίμια που αποτελούνταν από 4 σειρές των 9 δοκιμών. Οι 4 αυτές σειρές της ίδιας περιεκτικότητας αντιστοιχούσαν σε διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης (7,

14, 28 & 60 ημέρες). Τα 9 δοκίμια της ίδιας σειράς ωρίμανσης χωρίστηκαν επίσης σε 3 ομάδες των 3 δοκιμίων με διαφορετικές συνθήκες ωρίμανση. Για την κάθε ομάδα επικρατούσαν συνθήκες ψύξης ( $4^{\circ}\text{C}$ ), θέρμανσης ( $35^{\circ}\text{C}$ ) και περιβάλλοντος ( $24^{\circ}\text{C}$ ).

Με το πέρας των ημερομηνιών ωρίμανσης στα δοκίμια ασκήθηκε μονοαξονική θλίψη με σκοπό τον προσδιορισμό της αντοχής τους σε αυτή. Τα θραύσματα που προέκυψαν λειοτριβήθηκαν στο χέρι με αχάτη έτσι ώστε να προκύψει η κατάλληλη κοκκομετρία για την ορυκτολογική ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων-X (XRD). Ορυκτολογική ανάλυση με χρήση XRD έγινε επίσης στο λεπτόκοκκο αρχικό υλικό του κλίνκερ.

#### 4.4. Πειραματικές παρατηρήσεις

- Σε όλες τις συνθήκες ωρίμανσης (ψύξη, θέρμανση, περιβάλλον) των δοκιμίων με περιεκτικότητα 15% περλίτη παρατηρήθηκε ότι αυτά διατηρούσαν περισσότερη υγρασία και παρέμεναν σε σχεδόν υδαρή κατάσταση ακόμα και 48 ώρες μετά την παρασκευή τους.
- Στις συνθήκες ωρίμανσης, θέρμανσης και ατμοσφαιρικών συνθηκών, των δοκιμίων με περιεκτικότητα αντικατάστασης 35% υπήρξε συρρίκνωση της τάξεως των 1-2 mm μόνο των σειρών με διάρκεια ωρίμανσης για 28 και 60 ημέρες σε σχέση με τα μικρότερα ποσοστά αντικατάστασης.
- Στις συνθήκες ωρίμανσης των  $35^{\circ}\text{C}$  (θέρμανση) παρατηρήθηκε έντονη συρρίκνωση έως και 7mm σε όλες τις περιεκτικότητες αντικατάστασης για τις σειρές με διάρκεια ωρίμανσης 28 και 60 ημέρες. Η παρατήρηση αυτή είναι γνωστή και από άλλες βιβλιογραφικές αναφορές (Ragul et al., 2022).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Παρακάτω φαίνονται οι πίνακες για κάθε υλικό με τις αντοχές μετά από πειράματα σε μονοαξονική θλίψη καθώς και των αποτελεσμάτων ορυκτολογικής ανάλυσης με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD).

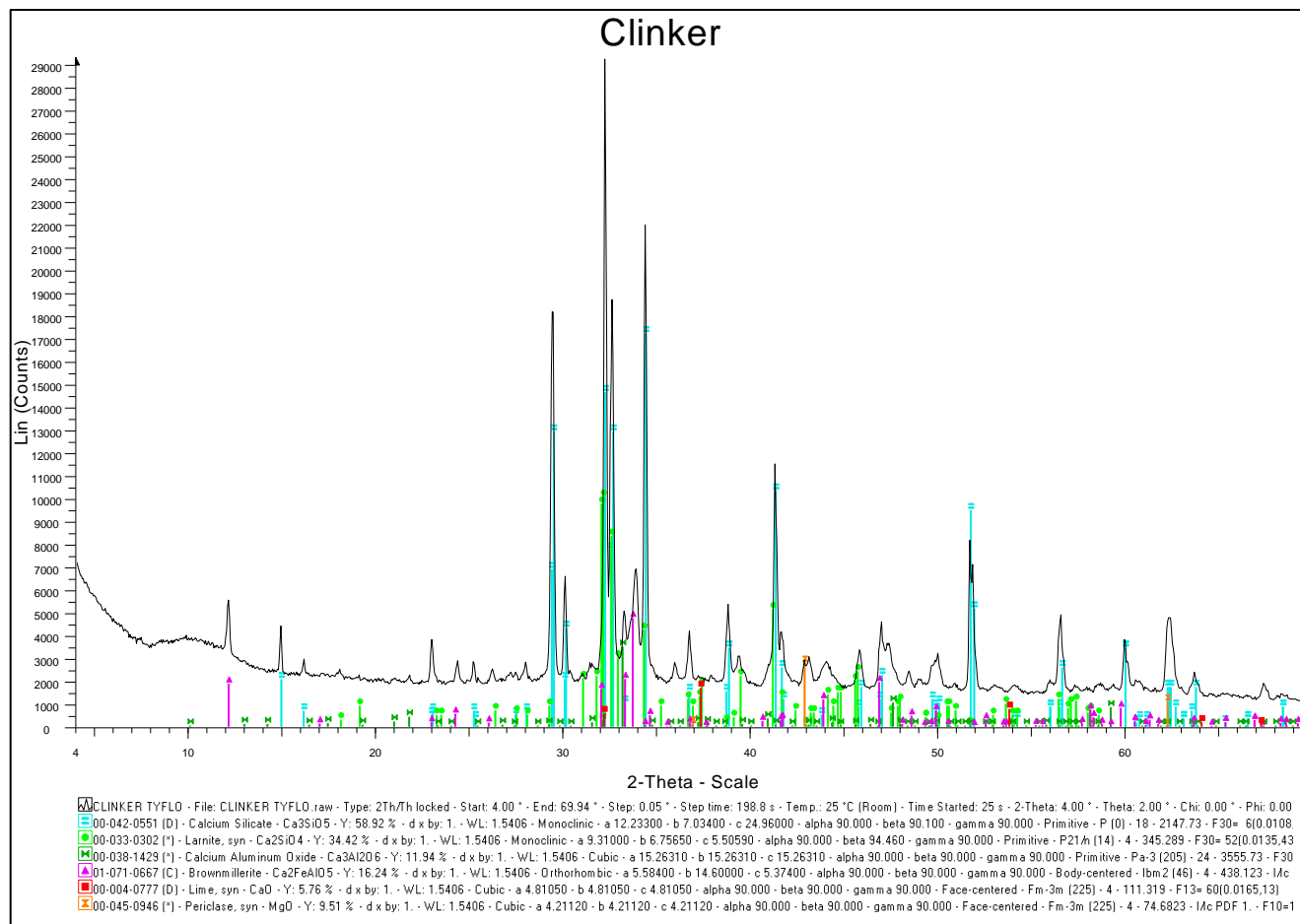
### 5.1. Αποτελέσματα ορυκτολογικής ανάλυσης με περιθλασιμετρία ακτίνων-X (XRD)

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις έγιναν στο διάστημα  $4 - 70^\circ 2\theta$  με βήμα (step size)  $0,049^\circ$  και συνολικό χρόνο ανά βήμα (time per step) 198,8 sec. Οι συγκεκριμένες συνθήκες επιτυγχάνουν μείωση του θορύβου και καλύτερη διάκριση των ανακλάσεων η οποία έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ανάλυση σε τσιμεντοκονιάματα και ποζολανικά δείγματα.

#### 5.1.1. Αποτελέσματα περιθλασιμετρίας ακτίνων-X

Παρακάτω παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με αντικατάσταση περλίτη σε διαφορετικές περιεκτικότητες καθώς και σε διαφορετικές ημέρες και θερμοκρασίες ωρίμανσης.

Σύμφωνα με το ακτινογράφημα του "καθαρού" κλίνκερ Portland, (**Εικόνα 8**), διακρίνονται έντονες ανακλάσεις αλίτη ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ή  $\text{C}_3\text{S}$ ), σελίτη ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ή  $\text{C}_3\text{A}$ ) και βελίτη ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ή  $\text{C}_2\text{S}$ ) σε αντίθεση με αυτές του μπραουνμπερίτη που είναι σχετικά χαμηλότερης έντασης με τις προαναφερόμενες. Επιπλέον παρατηρούνται ανακλάσεις χαμηλής έντασης άσβεστου και περίκλαστου.



Εικόνα 8: Ακτινογράφημα XRD για το clinker.



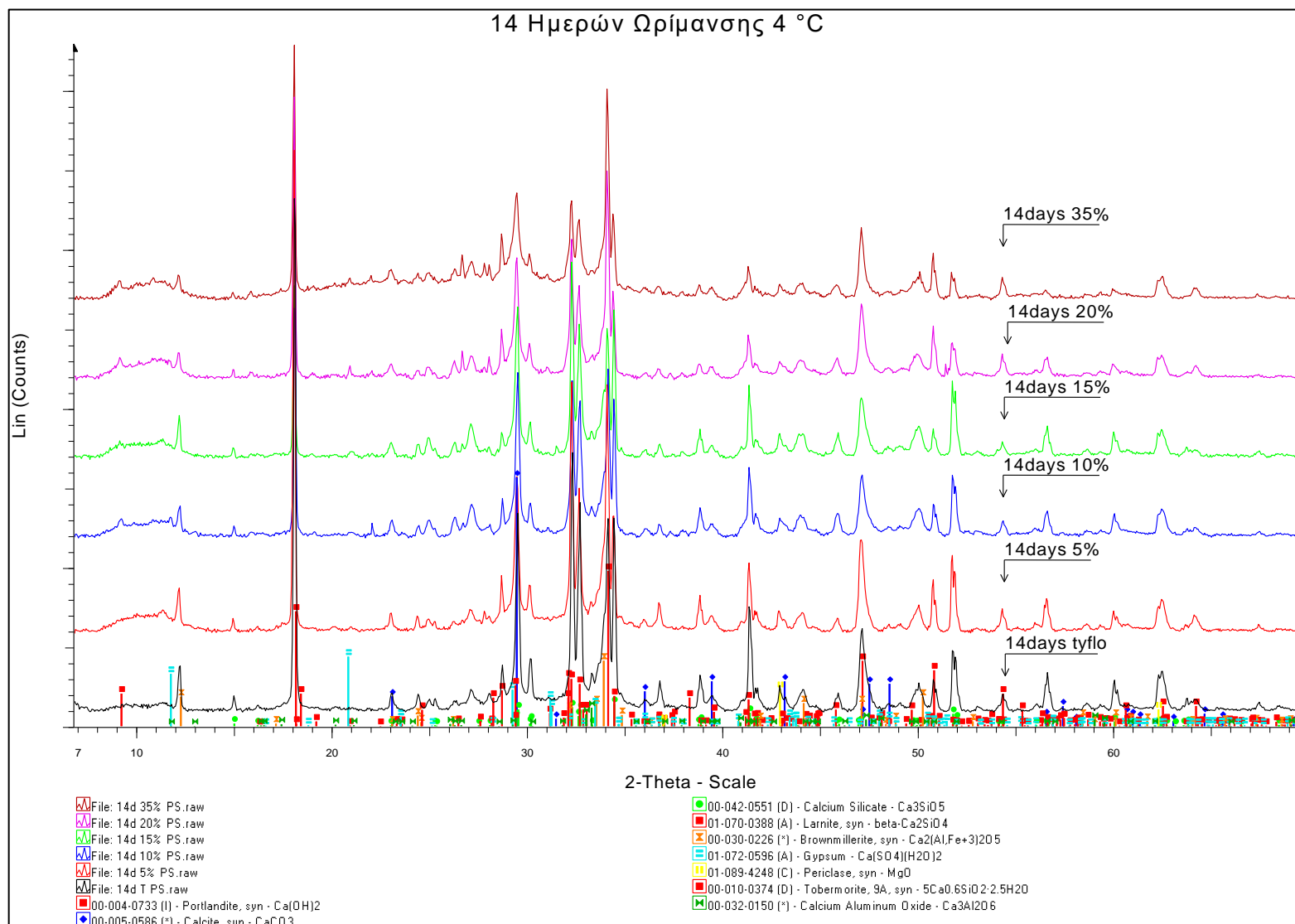


**Εικόνα 9:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 7 ημερών ωρίμανσης στους 4 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Στα παραπάνω ακτινογραφήματα (**Εικόνα 9**) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα XRD του ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 7 ημέρες ωρίμανσης στους 4°C. Αρχικά, στο τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμυλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρούνται οι ίδιες ορυκτολογικές φάσεις. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Ακόμα, παρατηρείται η αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη και ασβεστίτη. Όσον αφορά την αύξηση του πορτλανδίτη πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Έχει παρατηρηθεί σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ότι το πυριτικό διασβεστίο με την μορφή λαρνίτη μπορεί να διασπαστεί και να δώσει στο σύστημα πορτλανδίτη (Apostolaki et al., 2009). Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Τέλος, η ύπαρξη της ένυδρης φάσης του αλίτη με μορφή τομπερμορίτη δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αντικατάσταση περλίτη από το ποσοστό 5% και άνω.

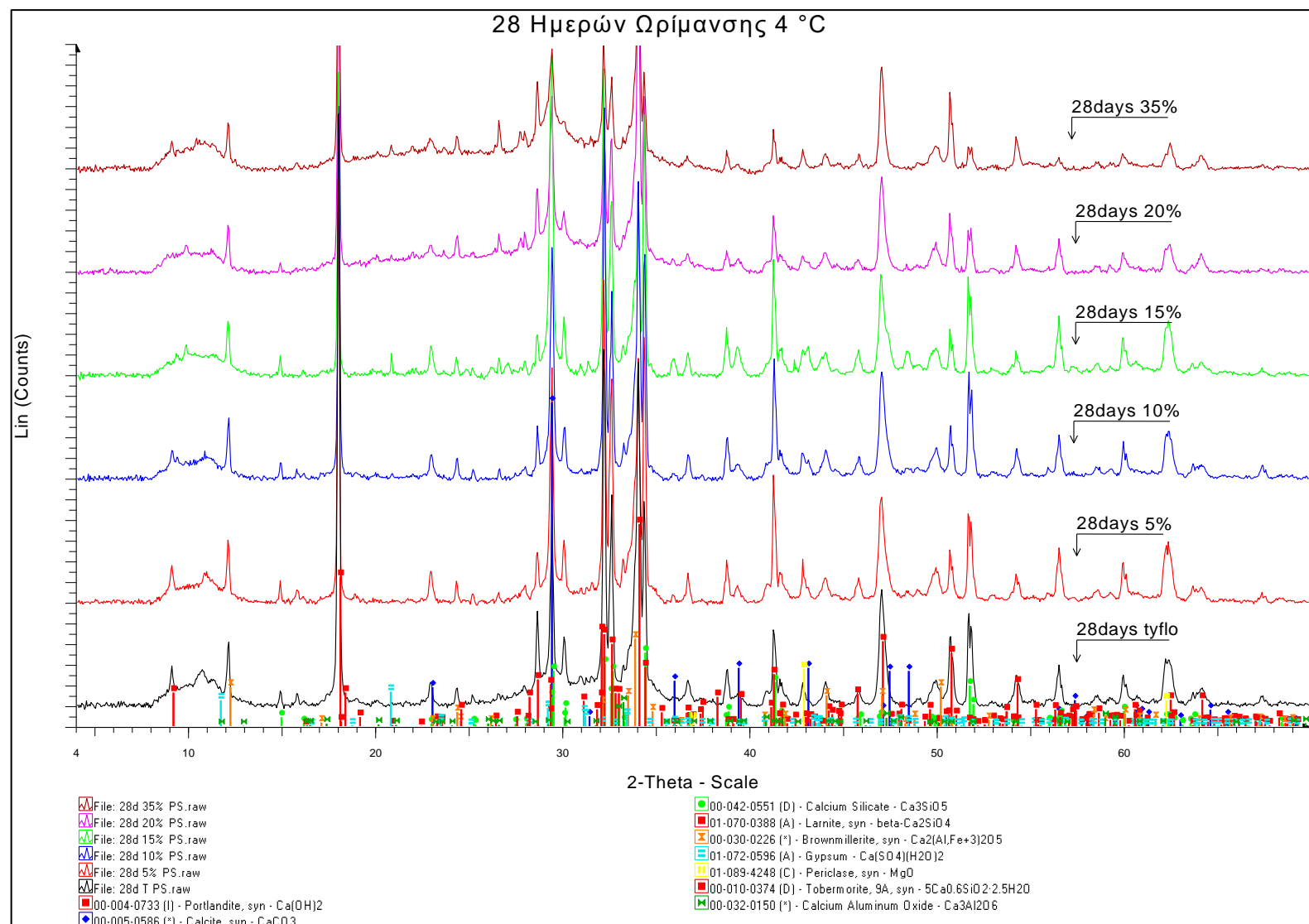


**Εικόνα 10:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 14 ημερών ωρίμανσης στους 4 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Τα ακτινογραφήματα XRD ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 14 ημέρες ωρίμανσης στους 4°C απεικονίζονται στην **Εικόνα 10**, όπου για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμυλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 10%.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Τέλος, η ύπαρξη της ένυδρης φάσης του αλίτη με μορφή τομπερμορίτη δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αντικατάσταση περλίτη από το ποσοστό 5% και άνω. Συνοπτικά παρατηρείται ότι τα ακτινογραφήματα των 7 και 14 ημερών ωρίμανσης στους 4°C, δεν έχουν αξιόλογες διαφορές κάτι το οποίο συνάδει με τα αποτελέσματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης.

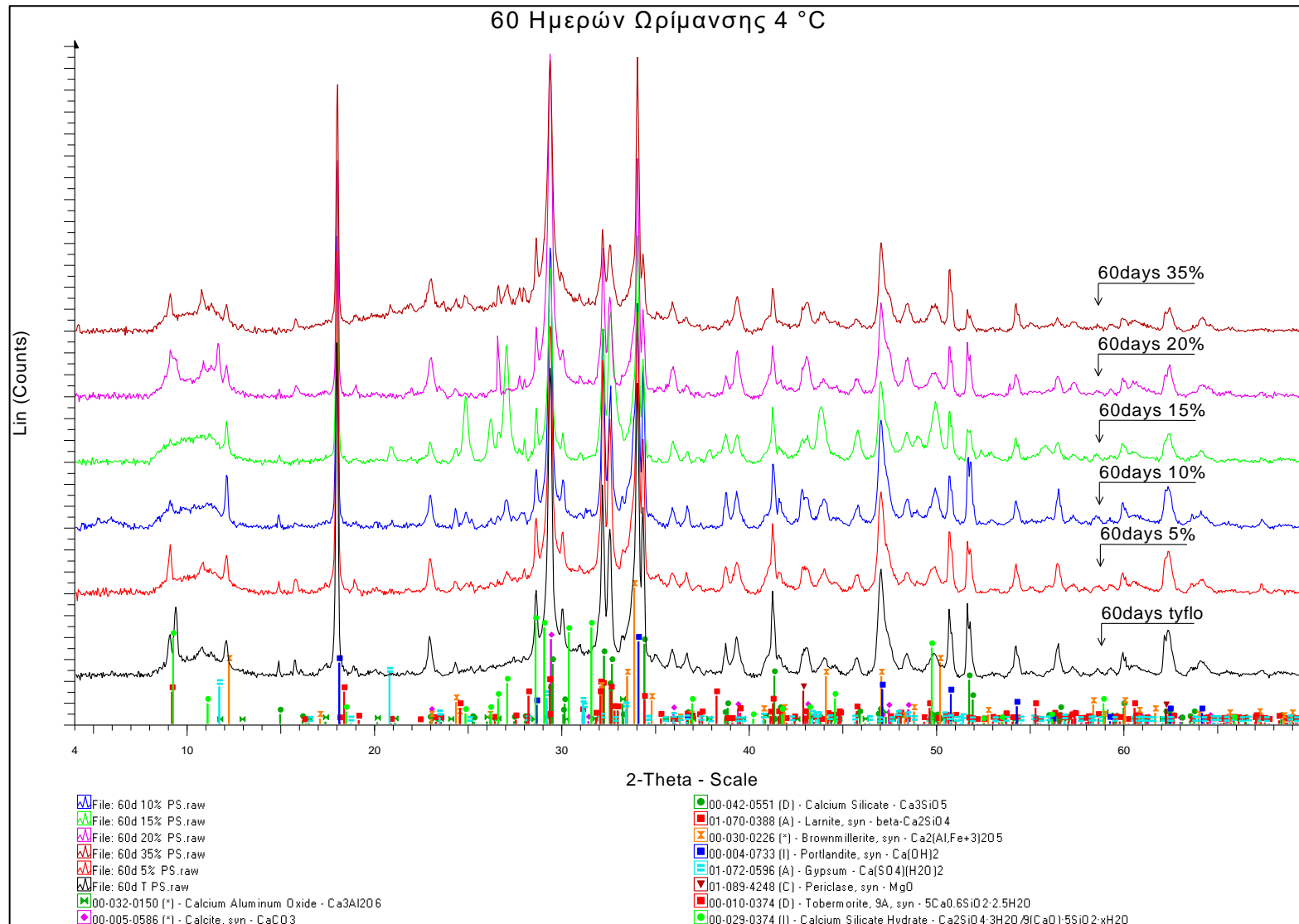


**Εικόνα 11:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 28 ημερών ωρίμανσης στους 4 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Για 28 ημέρες ωρίμανσης στους 4°C, προέκυψαν τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη όπως φαίνονται στην **Εικόνα 11**. Αρχικά, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτη, με τις ανακλάσεις του να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 7 και 14 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 15%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 15% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Στα ακτινογραφήματα με ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% παρατηρείται μείωση των ανακλάσεων του αλίτη ή πολύ έντονη αύξηση του υποβάθρου κάτι το οποίο καθιστά αδύνατο τον εντοπισμό μικρής έντασης ανακλάσεων.



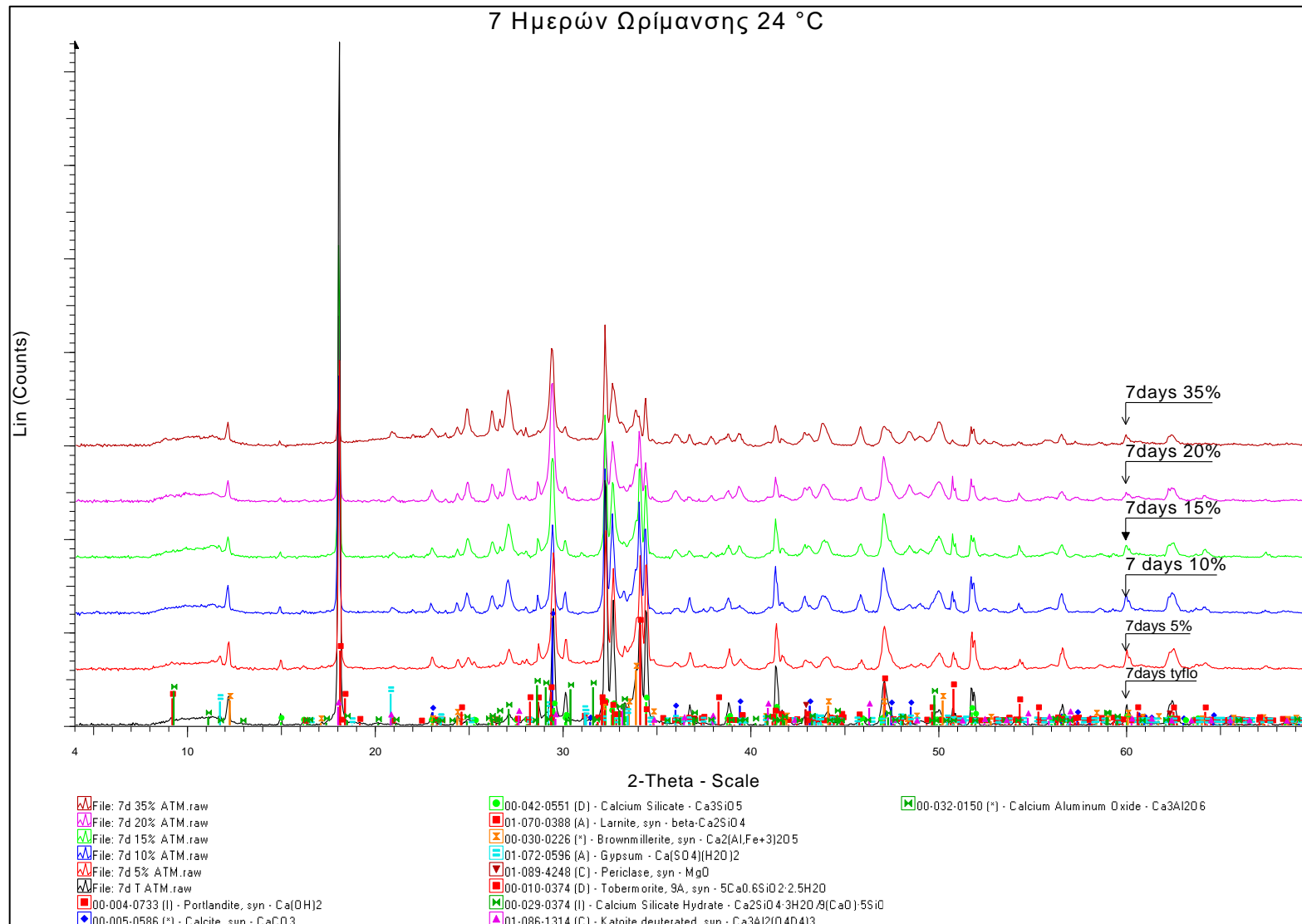
**Εικόνα 12:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 60 ημερών ωρίμανσης στους 4 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Στην παραπάνω εικόνα, παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 60 ημέρες ωρίμανσης στους 4°C. Αρχικά όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 12**, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμιλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτη, με τις ανακλάσεις του να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 28 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου, τομπερμορίτη και ένυδρη ασβεστοπυριτική φάση γεννίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 15%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση. Επιπλέον, εντοπίζονται πληθώρα ανακλάσεων ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη με το ποσοστό αντικατάστασης από 5% έως 15%, με το ποσοστό του 5% να δίνει τις μέγιστες ανακλάσεις τόσο σε ένταση όσο και σε πλήθος. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επηρεάζει άμεσα τις αντοχές μονοαξονικής θλίψης.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 10% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου.





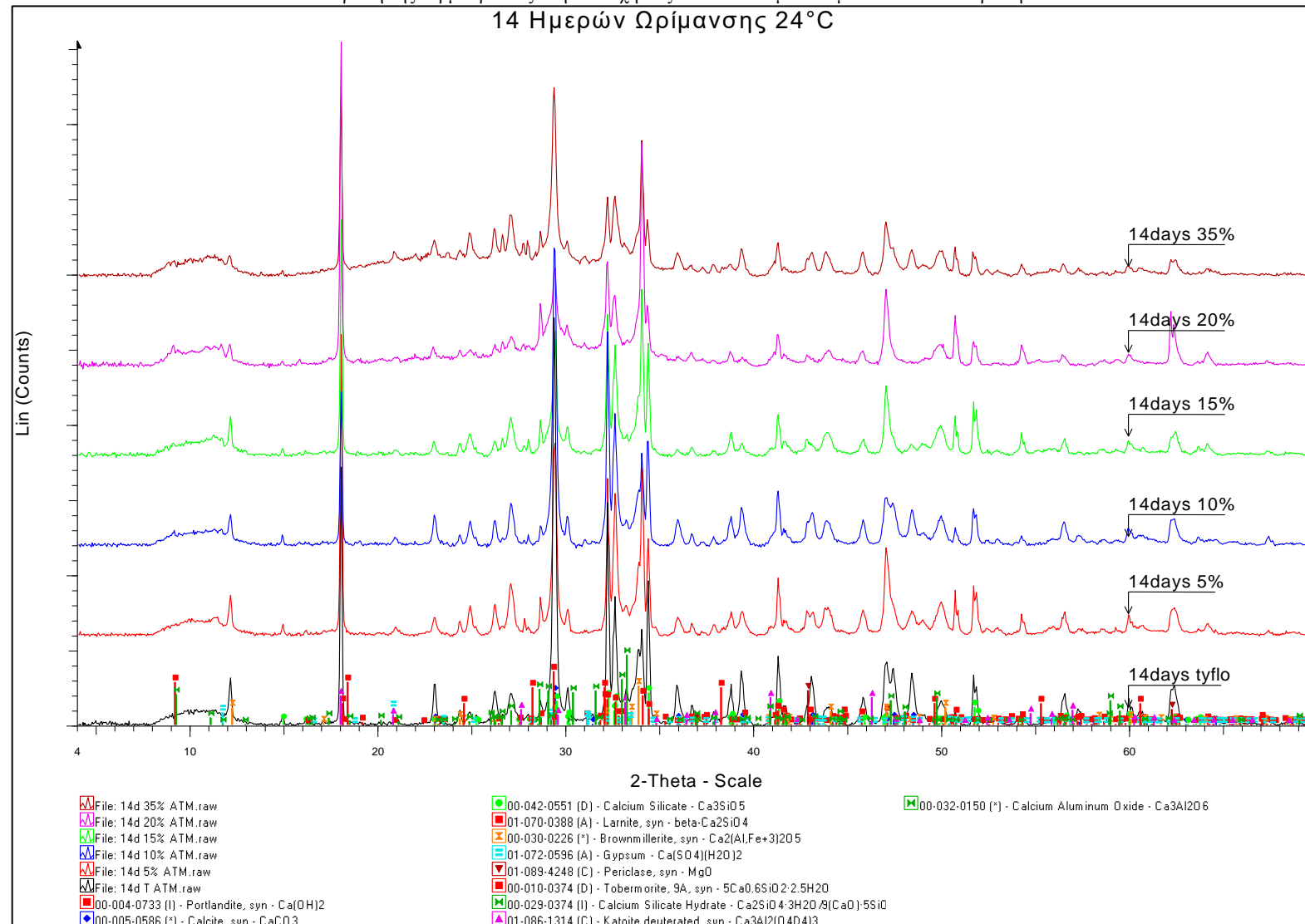
**Εικόνα 13:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 7 ημερών ωρίμανσης στους 24 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Για τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου, με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 7 ημέρες ωρίμανσης στους 24°C όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 13**, στο τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων καθώς και δευτερέων κατοίτης. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Ακόμα, παρατηρείται η αύξηση των ανακλάσεων του τομπερμορίτη και ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη για ποσοστό αντικατάστασης 10% και άνω. Ωστόσο, οι ανακλάσεις του γεννίτη φαίνεται να μειώνονται σε ποσοστό 35% αντικατάστασης. Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη και ασβεστίτη. Όσον αφορά την αύξηση του πορτλανδίτη πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Τέλος, η ύπαρξη της ένυδρης φάσης του αλίτη με μορφή τομπερμορίτη δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αντικατάσταση περλίτη από το ποσοστό 10% και άνω.

Επίδραση της θερμοκρασίας στην αντοχή ποζολανικού τσιμέντου με λεπτόκοκκο περλίτη  
14 Ημερών Ωρίμανσης 24°C

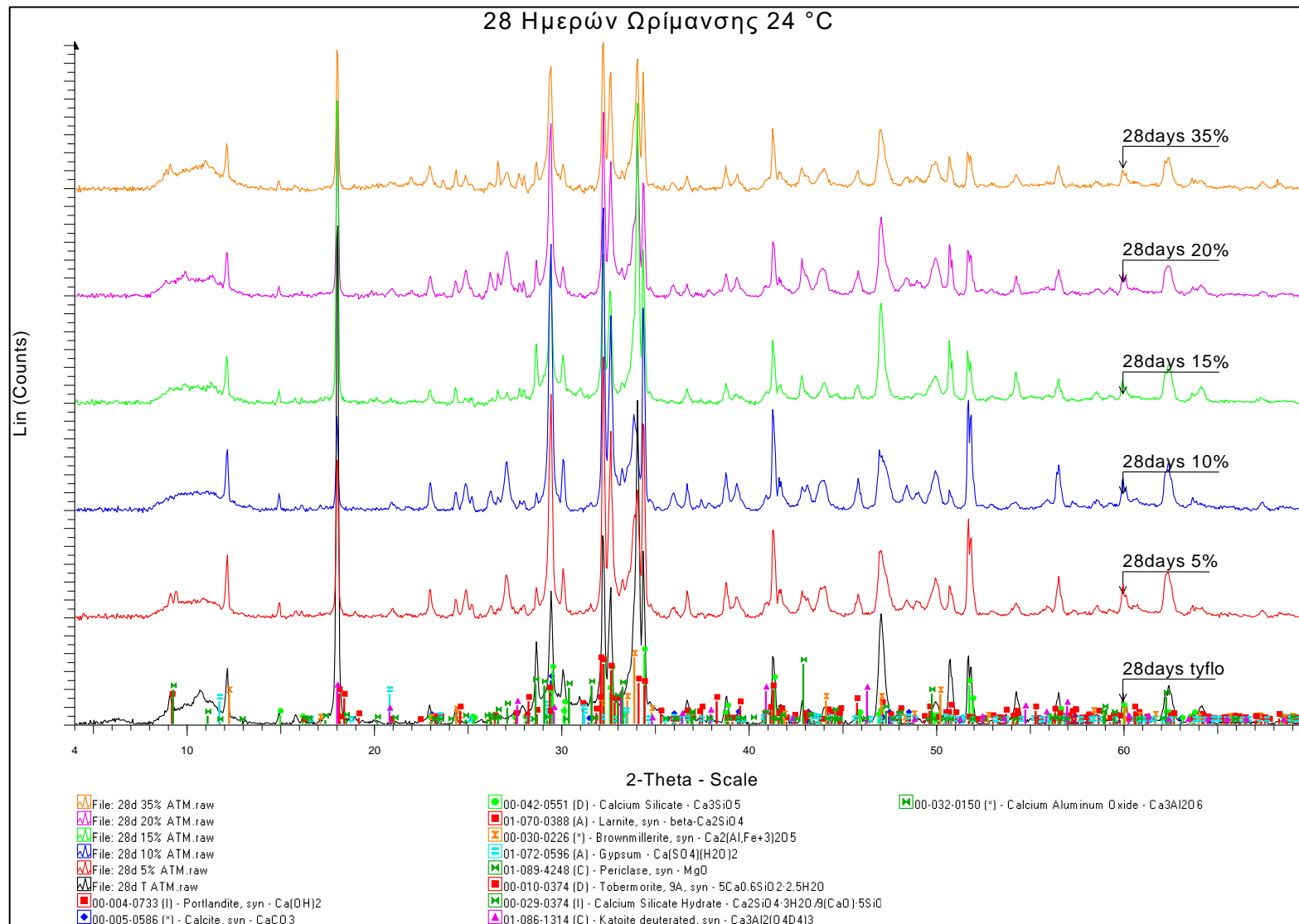


Εικόνα 14: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 14 ημερών ωρίμανσης στους 24 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Για τα δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου των 14 ημερών ωρίμανσης, με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη, στους 24°C, προέκυψαν τα ακτινογραφήματα της **Εικόνας 14**. Αρχικά, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου, τομπερμορίτη και ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 10%, ενώ έντονη αύξηση τόσο στο πλήθος όσο και στις εντάσεις των ανακλάσεων εντοπίζεται για τον γεννίτη σε ποσοστό 5% και άνω.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 15% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Συνοπτικά παρατηρείται ότι τα ακτινογραφήματα των 7 και 14 ημερών ωρίμανσης στους 24°C, δεν έχουν αξιόλογες διαφορές κάτι το οποίο συνάδει με τα αποτελέσματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης.

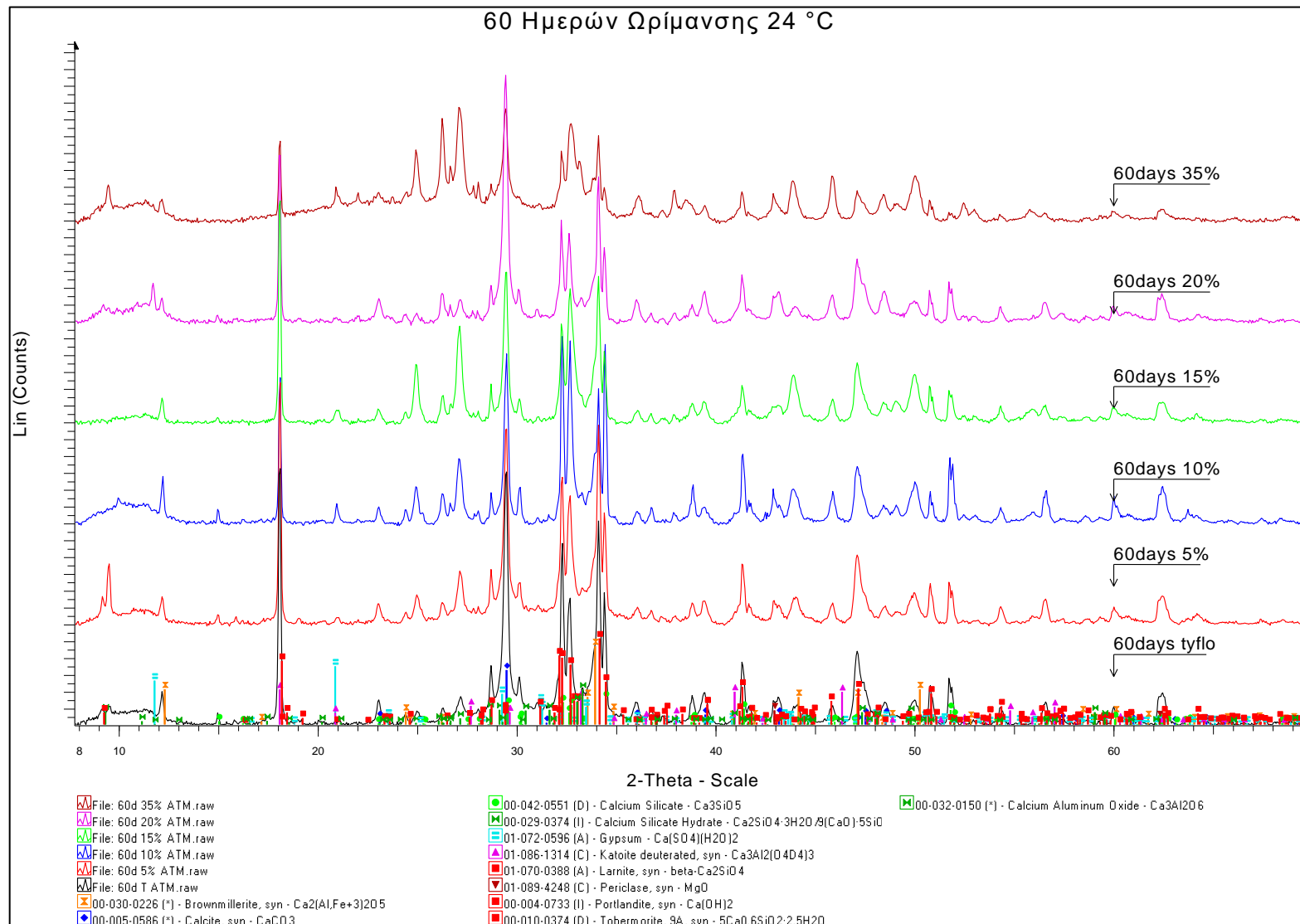


**Εικόνα 15:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 28 ημερών ωρίμανσης στους 24 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Στα ακτινογραφήματα της **Εικόνας 15**, παρουσιάζονται οι ανακλάσεις των δοκιμίων του ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 28 ημέρες ωρίμανσης στους 24°C. Αρχικά, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμιλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, με τις ανακλάσεις του τελευταίου να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 7 και 14 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων, καθώς και δευτερέων κατοΐτης. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 20%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 15% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Επίσης για το ίδιο ποσοστό αντικατάστασης, παρατηρείται η ύπαρξη ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη, η οποία συνεχίζει να εντοπίζεται και πάνω από αυτό το ποσοστό. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου.



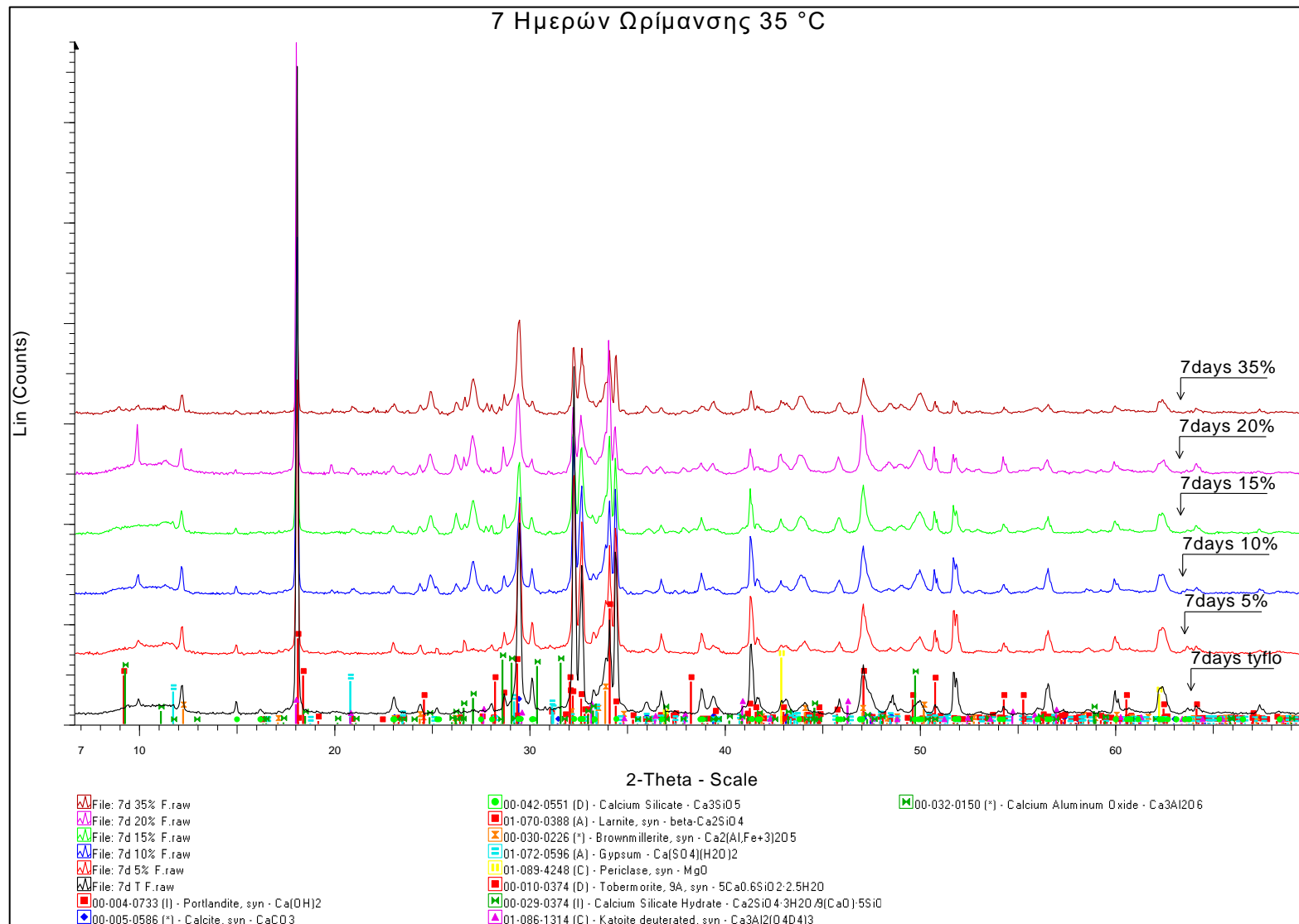
**Εικόνα 16:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 60 ημερών ωρίμανσης στους 24 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Για συνθήκες ωρίμανσης στους 24°C και 60 ημέρες παρατίθενται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη, όπως φαίνονται στην **Εικόνα 16**. Στο τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμιλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, με τις ανακλάσεις του τελευταίου να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 28 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου, τομπερμορίτη και ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 15%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση. Επιπλέον, εντοπίζονται πληθώρα ανακλάσεων ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη στο ποσοστό αντικατάστασης από 5% έως 15%, με το ποσοστό του 5% να δίνει τις μέγιστες ανακλάσεις τόσο σε ένταση όσο και σε πλήθος. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επηρεάζει άμεσα τις αντοχές μονοαξονικής θλίψης.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 10% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου και δευτερεύοντος κατοΐτη.



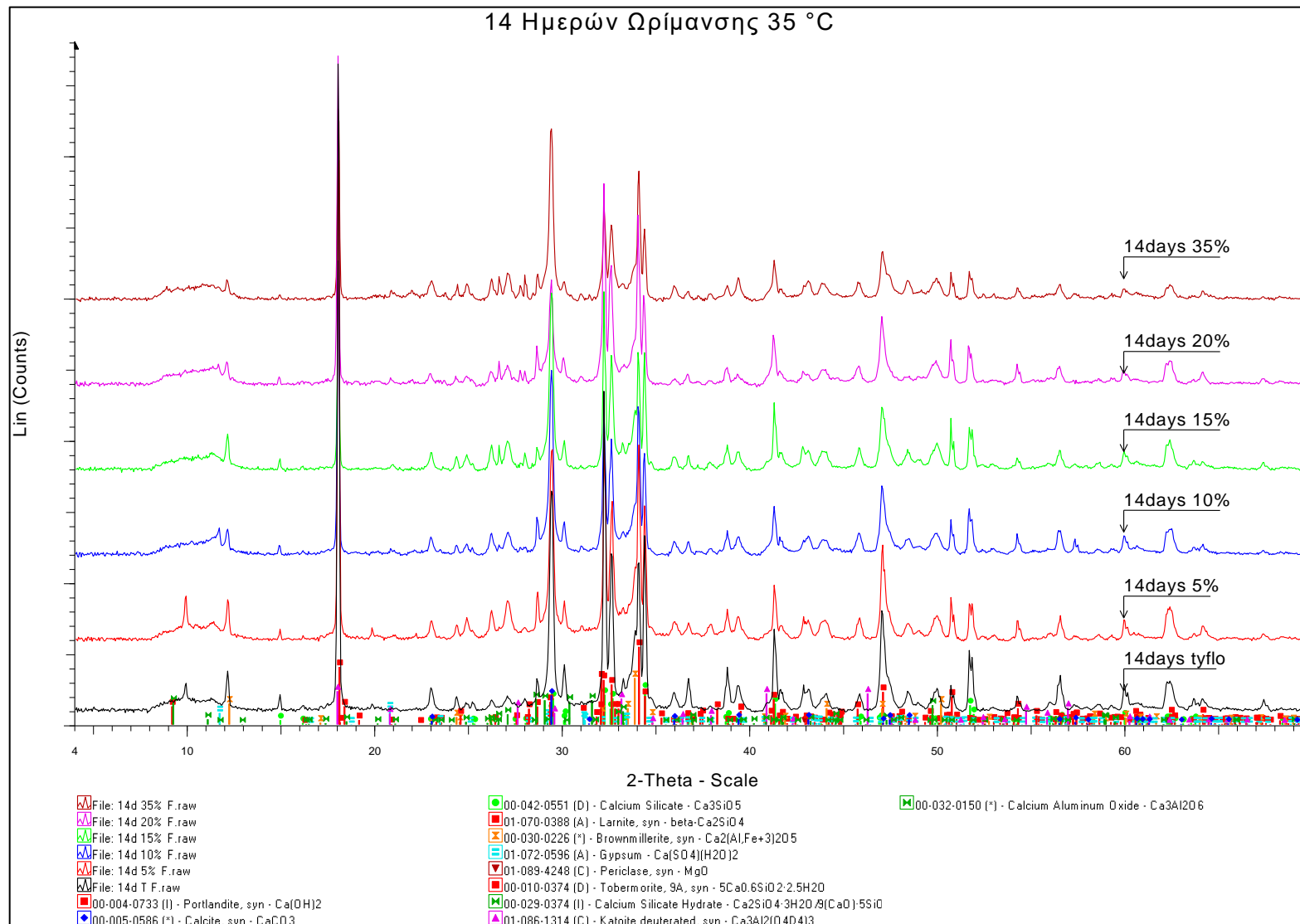


**Εικόνα 17:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 7 ημερών ωρίμανσης στους 35°C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 7 ημέρες ωρίμανσης στους 35°C. Αρχικά όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 17**, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμιλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων καθώς και δευτερεύων κατοΐτης και ένυδρη ασβεστοπυριτική φάση γεννίτη. Με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Ακόμα, παρατηρείται η αύξηση των ανακλάσεων του τομπερμορίτη και ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη για ποσοστό αντικατάστασης 5% και άνω. Ωστόσο, οι ανακλάσεις του γεννίτη φαίνεται να μειώνονται σε ποσοστό 35% αντικατάστασης. Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη και ασβεστίτη. Όσον αφορά την αύξηση του πορτλανδίτη πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Έχει παρατηρηθεί σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ότι το πυριτικό διασβεστίο με την μορφή λαρνίτη μπορεί να διασπαστεί και να δώσει στο σύστημα πορτλανδίτη. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου. Τέλος, η ύπαρξη της ένυδρης φάσης του αλίτη με μορφή τομπερμορίτη καθώς και του γεννίτη, δεν φαίνεται να επηρεάζονται από την αντικατάσταση περλίτη από το ποσοστό 5% και άνω.

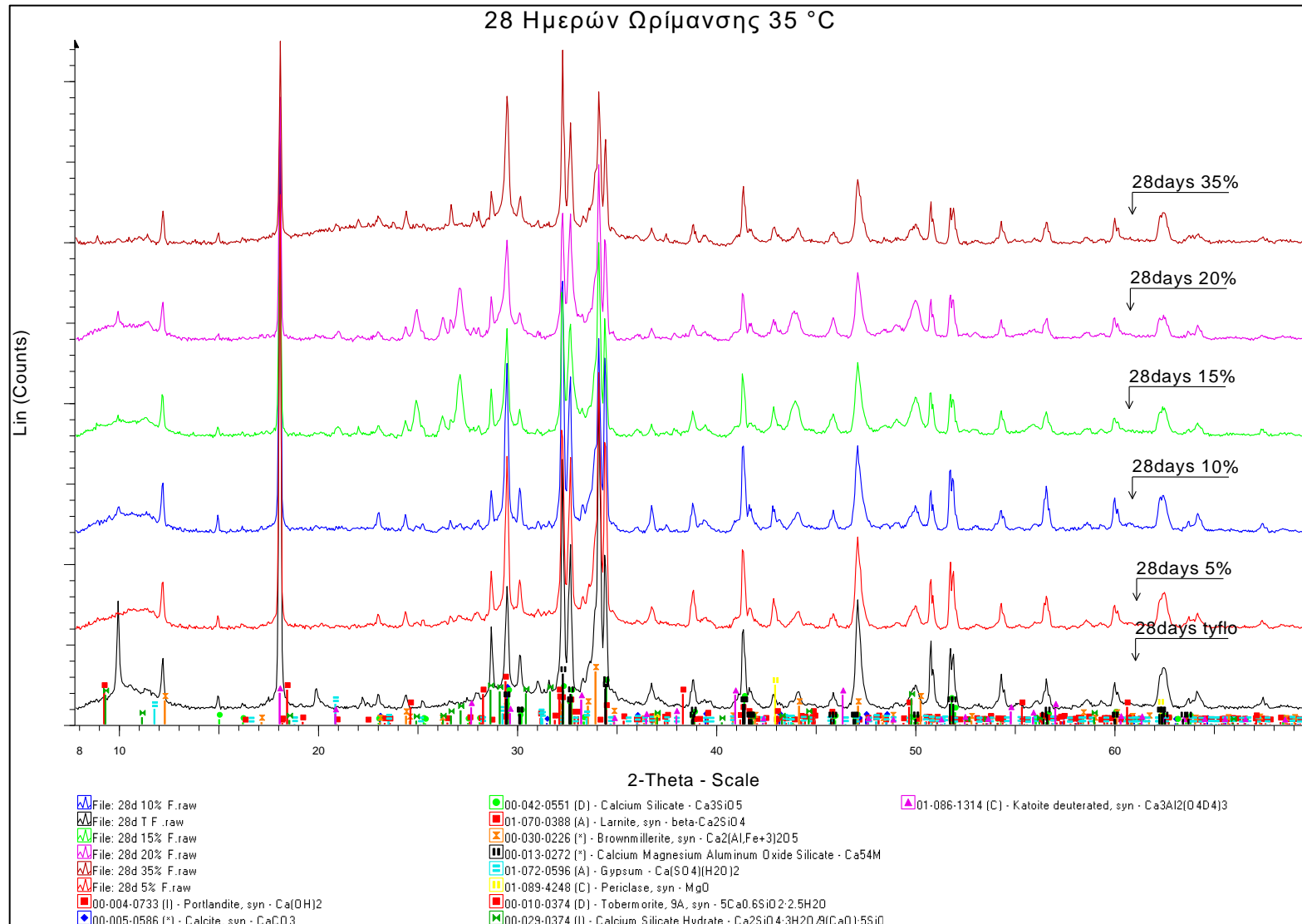


**Εικόνα 18:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 14 ημερών ωρίμανσης στους 35°C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Βάσει της **Εικόνας 18**, όπου παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 14 ημέρες ωρίμανσης στους 35°C, στο τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμυλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου, τομπερμορίτη και ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων και αύξηση του πλήθους των ανακλάσεων τομπερμορίτη. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 10%, ενώ έντονη αύξηση τόσο στο πλήθος όσο και στις εντάσεις των ανακλάσεων εντοπίζεται για τον δευτερεύων κατοΐτη σε ποσοστό 15% και άνω.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 20% και 35% εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 15% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου.

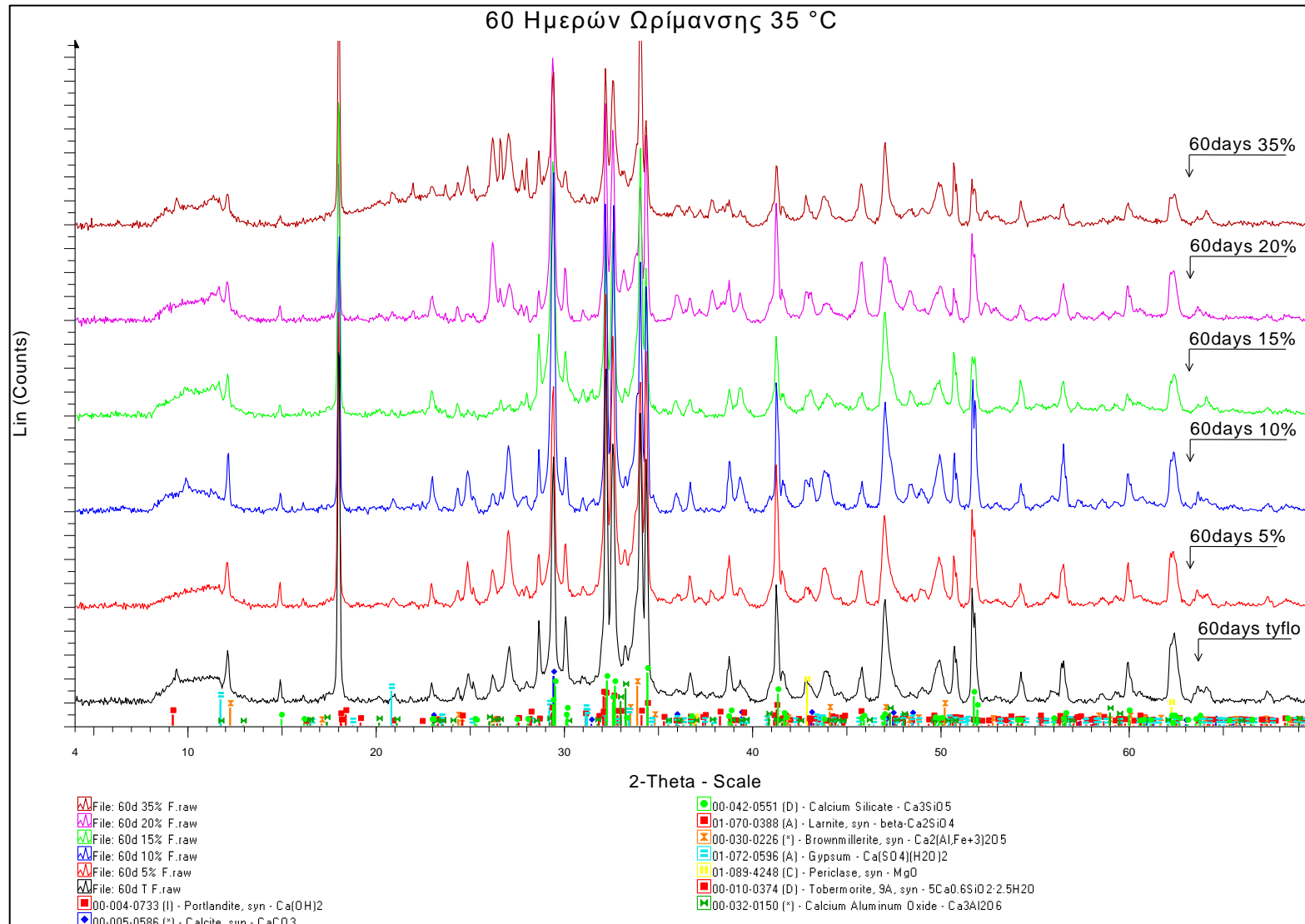


**Εικόνα 19:** Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 28 ημερών ωρίμανσης στους 35 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Στο τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), όπως παρουσιάζονται στα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου, **Εικόνα 19**, με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 28 ημέρες ωρίμανσης στους 35°C, παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, με τις ανακλάσεις του τελευταίου να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 7 και 14 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου, τομπερμορίτη και δευτερεύων κατοΐτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 15%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση.

Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 15% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Επίσης για ποσοστό αντικατάστασης 5% μέχρι 15%, παρατηρείται η ύπαρξη ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης γεννίτη, η οποία συνεχίζει να εντοπίζεται και πάνω από αυτό το ποσοστό, με μειωμένη ένταση στις ανακλάσεις και στο πλήθος αυτών. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου.



Εικόνα 20: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων – X (XRD), 60 ημερών ωρίμανσης στους 35 °C για διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη.

Παραπάνω παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα ποζολανικού τσιμέντου με διαφορετικές περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη για 60 ημέρες ωρίμανσης στους 35°C. Αρχικά, για το τυφλό δείγμα (0% αντικατάσταση περλίτη), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 20**, παρατηρείται να κυριαρχούν ανακλάσεις των αλίτη, βελίτη, σελίτη και μπραουνμιλερίτη. Επίσης, εντοπίζονται ασβεστίτης, περίκλαστο καθώς και πορτλανδίτης, με τις ανακλάσεις του να εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με το τυφλό δείγμα των 28 ημερών ωρίμανσης, ενώ δεν υπάρχουν ανακλάσεις άσβεστου μετά την προσθήκη νερού. Τέλος, υπάρχουν χαμηλής έντασης ανακλάσεις γύψου και τομπερμορίτη.

Στο ακτινογράφημα με αντικατάσταση περλίτη 5%, παρατηρείται η ύπαρξη των ίδιων ορυκτολογικών φάσεων. Ωστόσο, με την προσθήκη περλίτη υπάρχει μία μικρή αύξηση του υποβάθρου το οποίο υποδηλώνει την ύπαρξη άμορφου υλικού. Παρόμοιες ορυκτολογικές φάσεις παρατηρούνται και στα υπόλοιπα ακτινογραφήματα με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης περλίτη (10, 15, 20 και 35%). Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης τόσο αυξάνεται και το υπόβαθρο, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, λόγω του άμορφου υλικού που περιέχεται στον περλίτη. Τέλος, αύξηση των ανακλάσεων τομπερμορίτη παρατηρείται μετά την αντικατάσταση περλίτη σε ποσοστό άνω του 5% και πιο συγκεκριμένα μέχρι το ποσοστό του 15%. Από αυτό το ποσοστό και άνω, παρατηρείται μικρή μείωση. Στις 60 ημέρες ωρίμανσης δεν εντοπίζεται ένυδρη ασβεστοπυριτική φάση γεννίτη και οι ανακλάσεις του τομπερμορίτη είναι αισθητά μειωμένες συγκριτικά με τις ανακλάσεις στις πρώιμες ηλικίες ωρίμανσης. Το γεγονός αυτό φαίνεται να επηρεάζει άμεσα τις αντοχές μονοαξονικής θλίψης που εμφανίζονται μειωμένες.

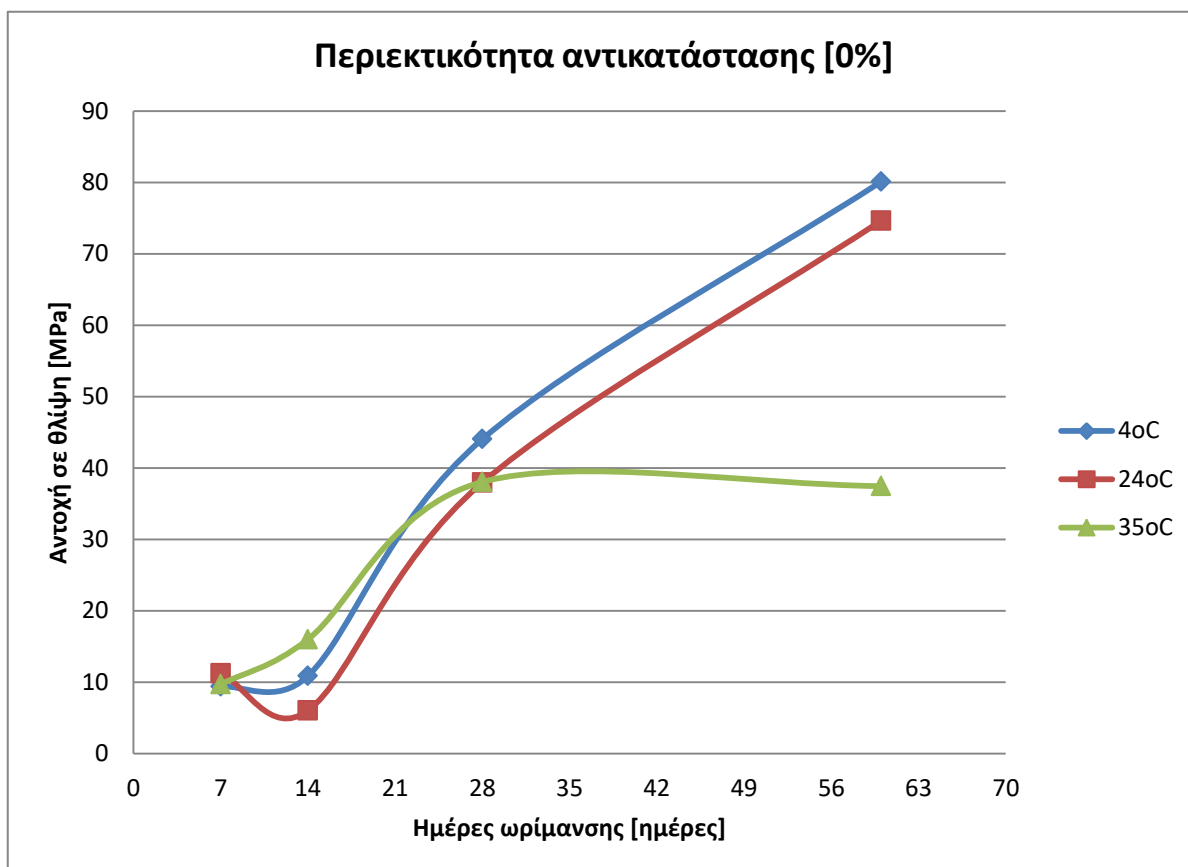
Για τα ακτινογραφήματα που αφορούν το ποσοστό αντικατάστασης 5% και άνω, εντοπίζεται σημαντική αύξηση στο πλήθος των ανακλάσεων πορτλανδίτη. Η αύξηση αυτή πιθανά να οφείλεται στη διάσπαση του πυριτικού διασβεστίου. Για περιεκτικότητες άνω των 10% εντοπίζονται εντονότερες ανακλάσεις γύψου.



## 5.2. Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης

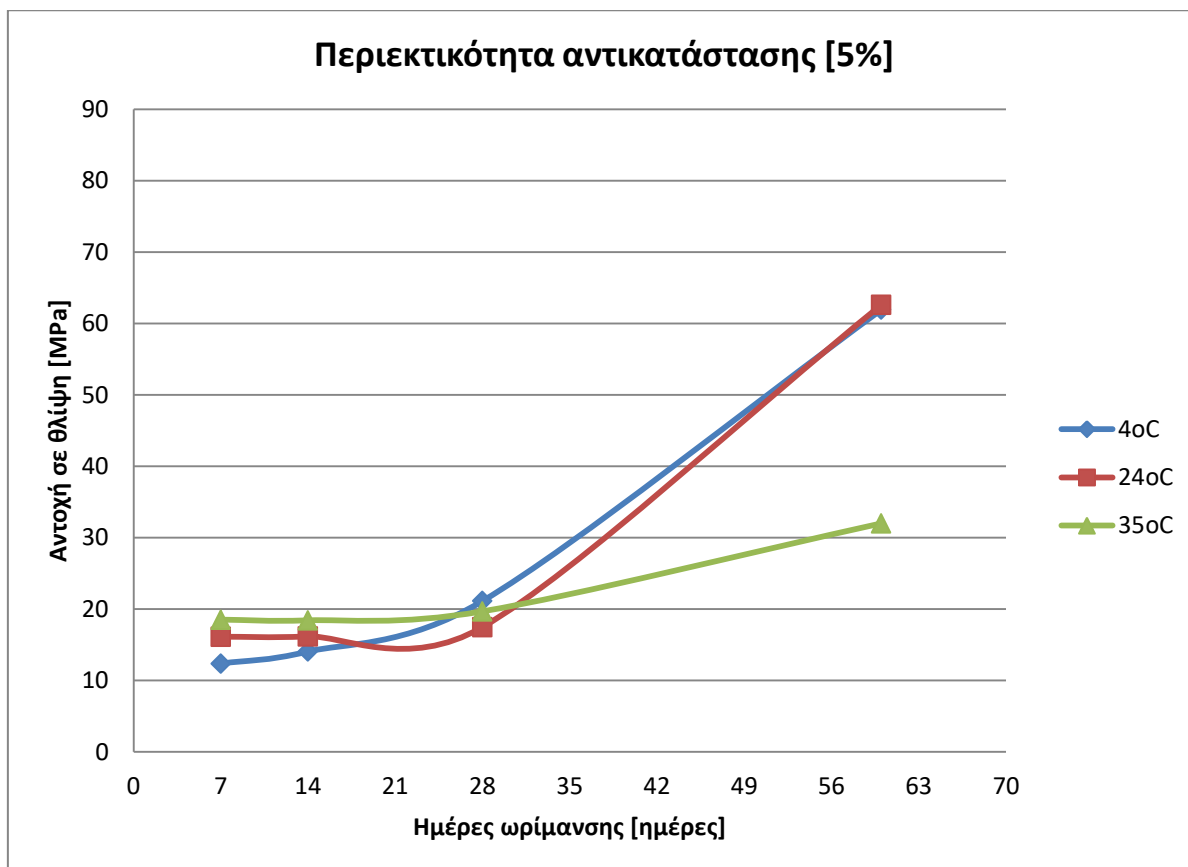
Οι πίνακες με τις τιμές των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη, καθώς και τα διαγράμματα αντοχών σε σχέση με την περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη, παρουσιάζονται στο **Παράρτημα**.

Τα διαγράμματα των αντοχών σε σχέση με τον χρόνο ωρίμανσης που προέκυψαν από τις τιμές των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, που πραγματοποιήθηκαν στα παραγόμενα δοκίμια για το κάθε εξεταζόμενο υλικό παρουσιάζονται παρακάτω.



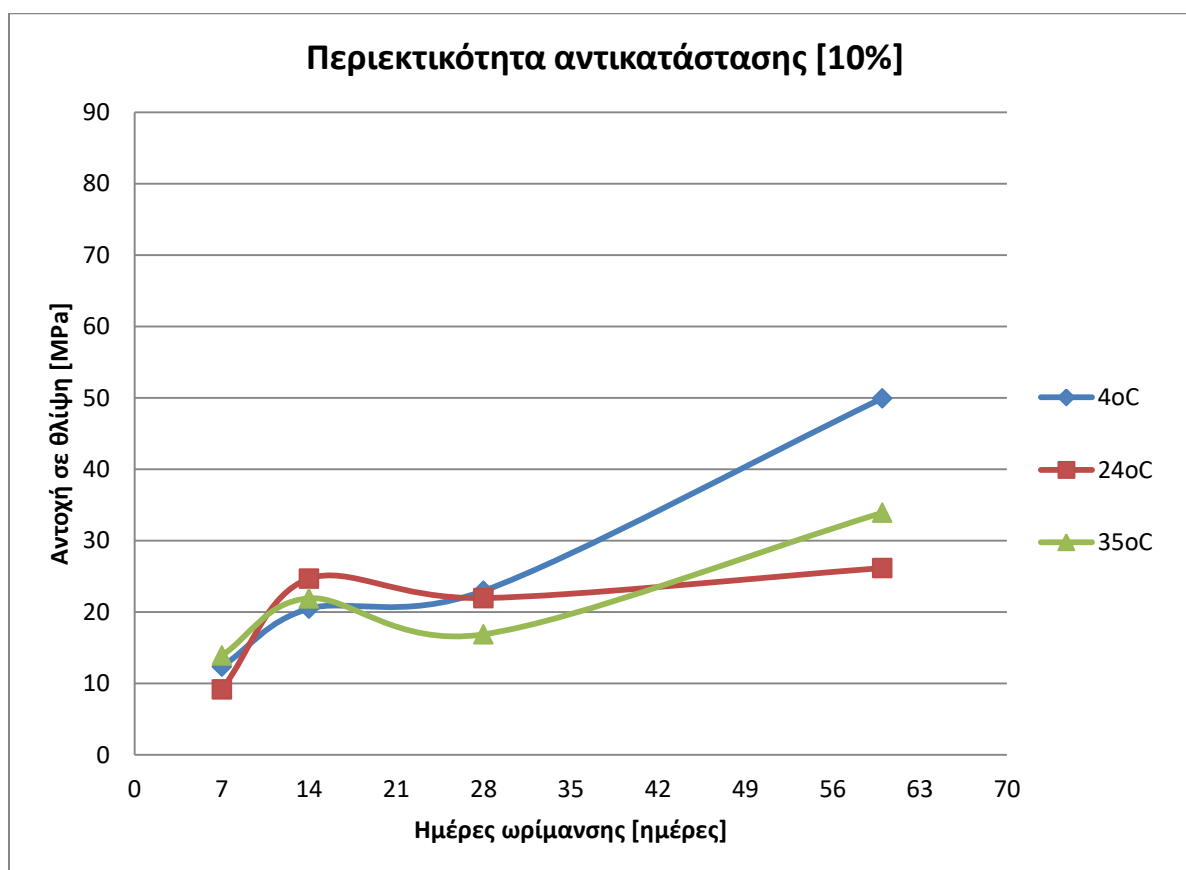
**Σχήμα 4:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 0%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει των ημερών ωρίμανσης των δοκιμίων σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης για περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη 0% (τυφλό δείγμα). Όπως παρατηρείται, στο **Σχήμα 4**, τα δοκίμια με θερμοκρασία ωρίμανσης 4°C και 24°C αντίστοιχα παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής του καθώς αυξάνονται οι ημέρες ωρίμανσης. Αντίθετα στους 35°C παρατηρείται αύξηση της αντοχής μέχρι τις 28 ημέρες ωρίμανσης και στη συνέχεια η αντοχή παραμένει σχεδόν σταθερή έως και τις 60 ημέρες ωρίμανσης. Η υψηλότερη αντοχή σημειώνεται για την συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε συνθήκες ψύξης (4°C) και 60 ημερών ωρίμανσης, με τιμή 80,11 MPa.



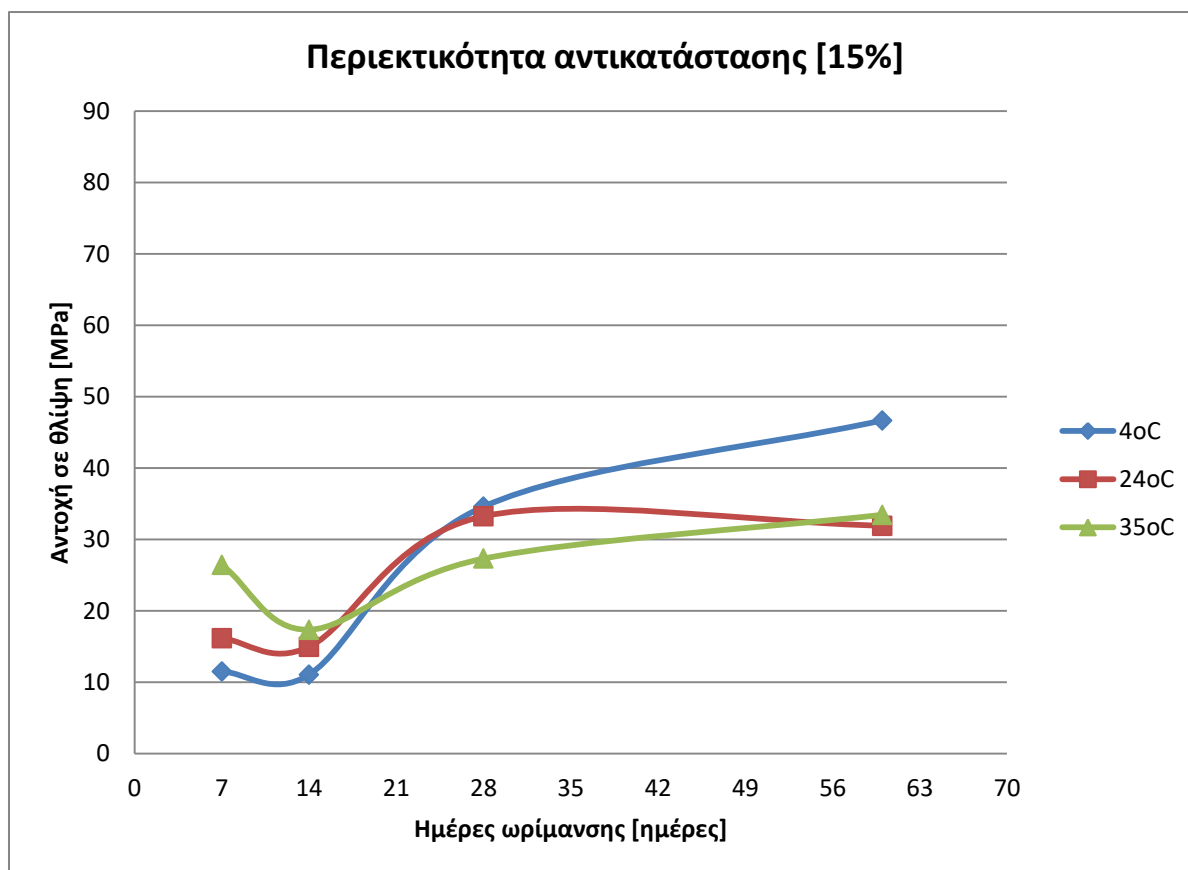
**Σχήμα 5:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 5%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Για τα δοκίμια με περιεκτικότητα αντικατάστασης 5% περλίτη απεικονίζονται στο **Σχήμα 5**, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει των ημερών ωρίμανσης των δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης. Όπως παρατηρείται, τα δοκίμια με θερμοκρασία ωρίμανσης 4°C και 24°C αντίστοιχα παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής του καθώς αυξάνονται οι ημέρες ωρίμανσης. Επίσης και στους 35°C παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης αλλά όχι της τάξης μεγέθους των δύο προαναφερόμενων θερμοκρασιών ωρίμανσης. Η υψηλότερη αντοχή σημειώνεται για την συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε συνθήκες περιβάλλοντος (24°C) και 60 ημερών ωρίμανσης, με τιμή 62,61 MPa.



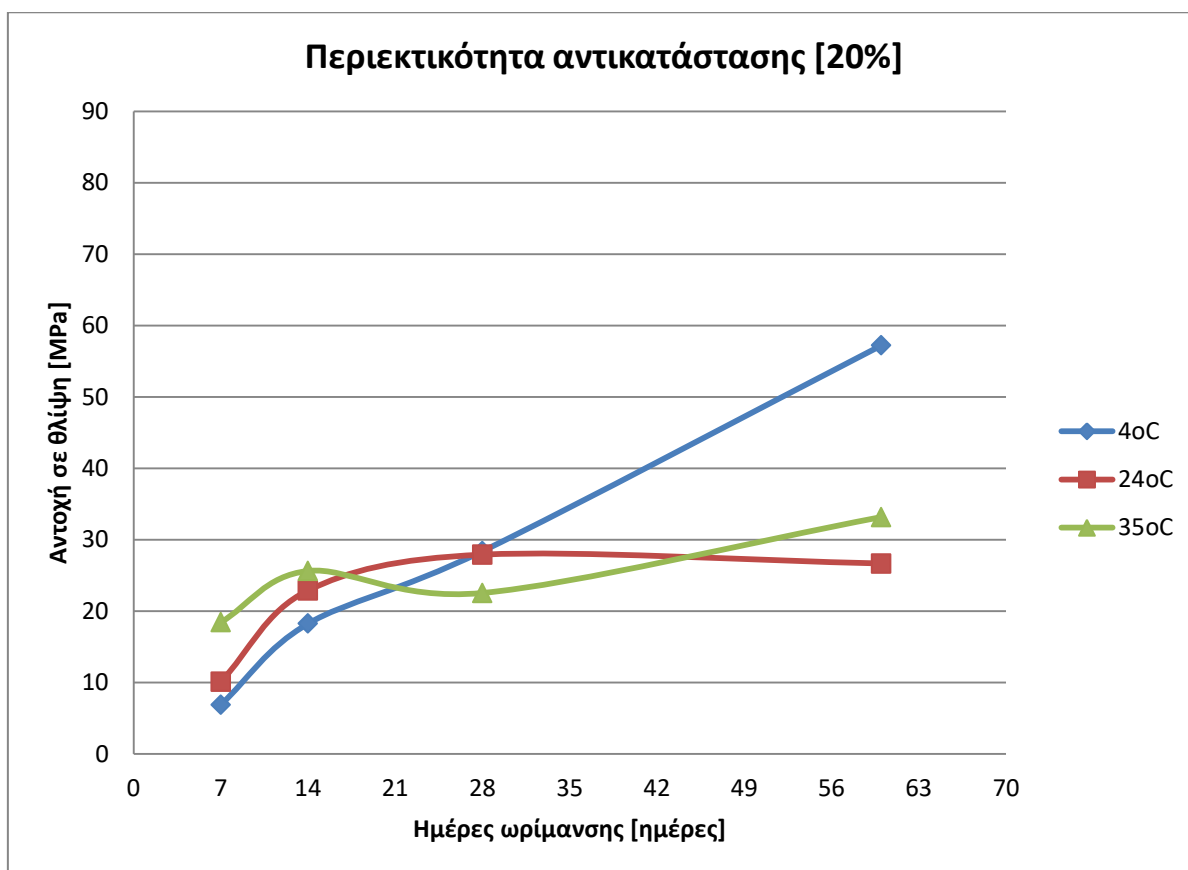
**Σχήμα 6:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 10%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτίζεται των ημερών ωρίμανσης των δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης για περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη 10%, απεικονίζεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 6**. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες και στις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης παρατηρείται μια μικρή αύξηση της αντοχής από τις 7 έως τις 14 ημέρες ωρίμανσης και παραμένει σχεδόν σταθερή, μέχρι την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης. Σε συνθήκες ψύξης (4°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 28 MPa. Σε συνθήκες θέρμανσης (35°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 17 MPa. Σε αντίθεση με τις συνθήκες περιβάλλοντος (24°C) που από τις 28 έως τις 60 ημέρες ωρίμανσης δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή της αντοχής.



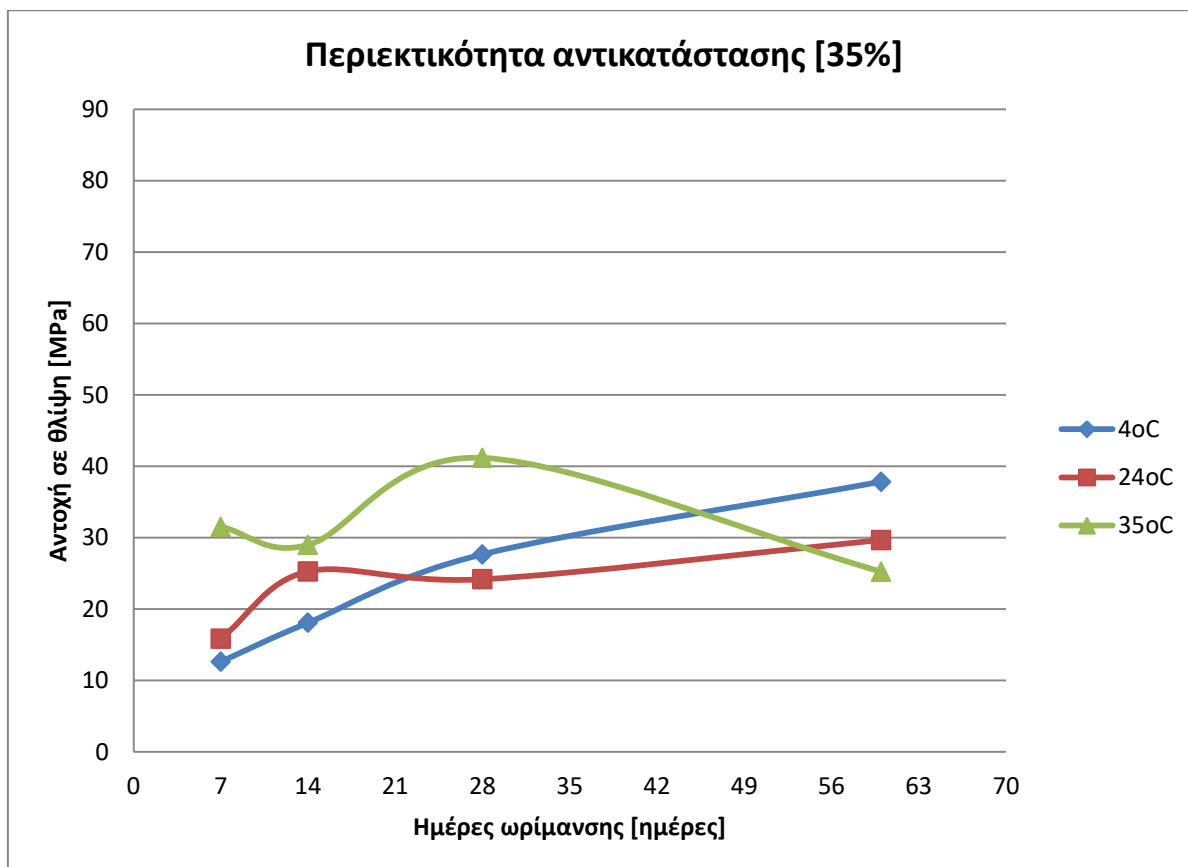
**Σχήμα 7:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 15%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Στο διάγραμμα του **Σχήματος 7**, απεικονίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει των ημερών ωρίμανσης των δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης για περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη 15%. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες και στις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης παρατηρείται μια μικρή μείωση της αντοχής από τις 7 έως τις 14 ημέρες ωρίμανσης και αύξηση αυτής μέχρι την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης. Σε συνθήκες ψύξης (4°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 12 MPa. Σε συνθήκες θέρμανσης (35°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 6 MPa. Αντίθετα, στις συνθήκες περιβάλλοντος (24°C) από τις 28 έως τις 60 ημέρες ωρίμανσης παραμένει σχεδόν σταθερή.



**Σχήμα 8:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 20%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Οι καμπύλες του διαγράμματος που απεικονίζονται στο **Σχήμα 8**, αφορούν την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει των ημερών ωρίμανσης των δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης για περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη 20%. Όπως παρατηρείται από τις καμπύλες και τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση της αντοχής από τις 7 έως τις 14 ημέρες ωρίμανσης. Από την 14<sup>η</sup> ημέρα έως την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης, σε συνθήκες ωρίμανσης των 4°C και 24°C παρατηρείται μια μικρή αύξηση της αντοχής, σε αντίθεση με τους 35° όπου διαγράφεται πτώση αυτής. Σε συνθήκες ψύξης (4°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 29 MPa. Σε συνθήκες θέρμανσης (35°C) από την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα παρατηρείται αύξηση της αντοχής της τάξεως των 11 MPa. Σε αντίθεση με τις συνθήκες περιβάλλοντος (24°C) που από τις 28 έως τις 60 ημέρες ωρίμανσης όπου φαίνεται να παραμένει σχεδόν σταθερή.



**Σχήμα 9:** Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 35%, σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης και τις διαφορετικές συνθήκες ωρίμανσης.

Για τα δοκίμια με περιεκτικότητα αντικατάστασης περλίτη 35%, απεικονίζονται στο **Σχήμα 9** η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει των ημερών ωρίμανσης των δοκιμών σε διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας ωρίμανσης για. Από την 7<sup>η</sup> ημέρα έως την 14<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης, σε συνθήκες ψύξης (4°C) και περιβάλλοντος (24°C) παρατηρείται αύξηση της αντοχής, με μεγαλύτερη αύξηση να εμφανίζεται σε συνθήκες περιβάλλοντος. Σε αντίθεση αυτών, σε συνθήκες θέρμανσης (35°C) παρατηρείται μια μικρή μείωση της αντοχής, στις προαναφερόμενες ημέρες ωρίμανσης. Σε συνθήκες ψύξης (4°C) και περιβάλλοντος (24°C), μετά την 14<sup>η</sup> ημέρα έως και την 60<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης παρατηρείται αύξηση της αντοχής, με την μέγιστη τιμή περίπου αυτή των 38 MPa να διαγράφεται στις θερμοκρασιακές συνθήκες των 4°C. Όσον αφορά τις συνθήκες ωρίμανσης που πραγματοποιούνται σε περιβάλλον των 35°C, παρατηρείται μια αύξηση της αντοχής από την 14<sup>η</sup> έως την 28<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης και εν συνεχεία μέχρι την 60<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης, πτώση αυτής και να καταλαμβάνει χαμηλότερες τιμές από αυτές που καταγράφηκαν την 14<sup>η</sup> ημέρα ωρίμανσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΖΗΤΗΣΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για την παρούσα πειραματική διαδικασία και ωρίμασαν για 60 ημέρες σε συνθήκες θέρμανσης, παρατηρήθηκε συρρίκνωση των αρχικών τους διαστάσεων 7 mm κατά μέσο όρο. Επιπλέον, όλα τα υπόλοιπα δοκίμια συρρικνώθηκαν κατά μέσο όρο 1 mm. Η παραπάνω μεταβολή, προκύπτει από την απώλεια υγρασίας κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης.

Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης, 4°C, 24°C και 35°C, επιπρόσθετα, παρατηρούνται υψηλές αντοχές στις συνθήκες ωρίμανσης των 4°C, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις μέχρι τώρα πειραματικές έρευνες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Προκύπτει, ότι η ωρίμανση στους 4°C συντελεί στη διατήρηση της υγρασίας για μεγαλύτερο διάστημα σε σχέση με υψηλότερες θερμοκρασίες ωρίμανσης. Το φαινόμενο γίνεται πιο εμφανές όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ωρίμανσης.

Η διατήρηση της υγρασίας, προφανώς δρα ευεργετικά στις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη και αυτό επιβεβαιώνεται σε μεγάλο βαθμό από τα ακτινογραφήματα XRD. Σε αυτά, παρατηρείται η δημιουργία ένυδρων ασβεστοπυριτικών φάσεων αλλά και διάσπαση αρχικών φάσεων όπως ο βελίτης, ο οποίος προσφέρει οξείδιο του ασβεστίου στο σύστημα κι έτσι δημιουργείται πορτλανδίτης ο οποίος συνεισφέρει στην ποζολανική αντίδραση και καθ' επέκταση στις αντοχές μονοαξονικής θλίψης. Όπως παρατηρήθηκε στους 24°C που αποτελούν συνθήκες περιβάλλοντος, για 60 ημέρες ωρίμανσης προέκυψαν ενδιάμεσες τιμές αντοχών σε σχέση με τους 4°C (υψηλότερες) και 35°C (χαμηλότερες), το οποίο συνηγορεί στο ότι η διατήρηση της υγρασίας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα βοηθά στην αύξηση των αντοχών στα ποζολανικά τσιμέντα. Τέλος, όπως πιστοποιήθηκε και από τα XRD στα ακτινογραφήματα που αφορούν τις 60 ημέρες ωρίμανσης στους 35°C, εντοπίστηκαν υψηλές ανακλάσεις των αρχικών φάσεων του κλίνκερ κάτι το οποίο υποδηλώνει πως η απουσία υγρασίας μειώνει αρκετά την ταχύτητα αντίδρασης και την δημιουργία ένυδρων ασβεστοπυριτικών φάσεων.



Από την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη ποζολανικής αντίδρασης δεν είναι ιδιαίτερα πιθανή καθώς δεν παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με την αντικατάσταση περλίτη, παρόλη την ύπαρξη πορτλανδίτη. Επιπλέον, εάν η ποζολανική αντίδραση έχει λάβει χώρα σε κάποιο βαθμό, στα δοκίμια που ωρίμασαν σε συνθήκες ψύξης και έδωσαν τις υψηλότερες αντοχές στις 60 ημέρες ωρίμανσης, τα προϊόντα της θα βρίσκονται σε μορφή γέλης που δεν ανιχνεύεται με το XRD.
- Στα ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων - X (XRD) που αφορούν τις συνθήκες ωρίμανσης ψύξης ( $4^{\circ}\text{C}$ ) και περιβάλλοντος ( $24^{\circ}\text{C}$ ) εντοπίστηκαν η ένυδρη ασβεστοπυριτική φάση γεννίτη και τομπερμορίτης με υψηλής έντασης ανακλάσεις, κυρίως για περισσότερες μέρες ωρίμανσης. Αντιθέτως, στα XRD των δειγμάτων που ωρίμασαν σε συνθήκες θέρμανσης, οι ίδιες ένυδρες ασβεστοπυριτικές φάσεις με υψηλής έντασης ανακλάσεις εντοπίστηκαν στις 7 και 14 ημέρες ωρίμανσης. Οι παραπάνω παρατηρήσεις συνάδουν με τις υψηλές τιμές αντοχών σε μονοαξονική θλίψη που προέκυψαν για τα αντίστοιχα δοκίμια στις προαναφερόμενες μέρες ωρίμανσης. Σημειώνεται ότι οι παραπάνω φάσεις συντελούν στην αύξηση των τιμών της θλιπτικής αντοχής του ποζολανικού τσιμέντου.
- Προκύπτουν συνολικά υψηλές αντοχές σε μονοαξονική θλίψη για τα δοκίμια σε συνθήκες ωρίμανσης ψύξης ( $4^{\circ}\text{C}$ ) για τις 60 ημέρες ωρίμανσης σε όλες τις περιεκτικότητες αντικατάστασης περλίτη. Η μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής παρατηρήθηκε σε περιεκτικότητα αντικατάστασης 20% περλίτη ενώ η μικρότερη σε ποσοστό αντικατάστασης 35%.
- Παρατηρήθηκε έντονη αύξηση αντοχών μονοαξονικής θλίψης μετά τις 28 ημέρες ωρίμανσης για τις συνθήκες ωρίμανσης των  $4^{\circ}\text{C}$  και  $24^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα, για όλες τις περιεκτικότητες περλίτη. Αντίθετα, για τις συνθήκες ωρίμανσης θέρμανσης ( $35^{\circ}\text{C}$ ), παρατηρήθηκαν σταθερές τιμές αντοχής εκτός από τα δοκίμια που έχουν κατασκευασθεί με 35% αντικατάσταση περλίτη, όπου μειώθηκε η αντοχή κι έφτασε σε τιμές χαμηλότερες από αυτές των 14 ημερών.

- Σε συνθήκες ψύξης ( $4^{\circ}\text{C}$ ), για τις πρώτες 7 ημέρες ωρίμανσης παρατηρούνται χαμηλές τιμές αντοχών σε σχέση με τις άλλες δύο συνθήκες ωρίμανσης. Με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης, παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε θλίψη σε σύγκριση με τις συνθήκες περιβάλλοντος και θέρμανσης, κάτι το οποίο υποδεικνύει ότι η ποζολανική αντίδραση είναι δυνατόν να λαμβάνει χώρα και σε χαμηλές θερμοκρασίες ωρίμανσης.
- Σε συνθήκες θέρμανσης ( $35^{\circ}\text{C}$ ), για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη μέχρι 20% παρατηρήθηκε μια μικρή αύξηση της αντοχής με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης ενώ σε ποσοστό 35% επήλθε μείωση.
- Στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $24^{\circ}\text{C}$ ), σε ποσοστό αντικατάστασης περλίτη μέχρι 5% παρατηρήθηκε έντονη αύξηση της θλιπτικής αντοχής, σε ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 10% υπήρξε έντονη μείωση αυτής ενώ στη συνέχεια δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή της αντοχής όσο αυξανόταν το ποσοστό αντικατάστασης του περλίτη.
- Στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $24^{\circ}\text{C}$ ), στις 60 ημέρες ωρίμανσης και ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 5% παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής σε ποσοστό άνω του 15% σε σχέση με το τυφλό, ενώ σε ποσοστό αντικατάστασης περλίτη άνω του 10%, υπήρξε μείωση της αντοχής άνω του 50%. Σε συνθήκες ψύξης ( $4^{\circ}\text{C}$ ), και για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 5% παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής σε σχέση με το τυφλό της τάξεως άνω του 20%, ενώ για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη άνω του 10%, υπήρξε μείωση της αντοχής από 40% έως 50%. Σε συνθήκες θέρμανσης ( $35^{\circ}\text{C}$ ), για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη από 5% έως 20% παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής άνω του 10% σε σχέση με το τυφλό ενώ για ποσοστό αντικατάστασης περλίτη 35%, υπήρξε μείωση της αντοχής της τάξεως του 30%.
- Παρατηρήθηκαν υψηλότερες αντοχές σε συνθήκες θέρμανσης, σε σχέση με τις άλλες συνθήκες ωρίμανσης, για 7, 14 και 28 ημέρες ωρίμανσης με 35% αντικατάστασης περλίτη και υψηλότερες αντοχές για 60 ημέρες ωρίμανσης σε συνθήκες ψύξης για το ίδιο ποσοστό περλίτη. Επομένως, ποζολανικό τσιμέντο που περιέχει 35% περλίτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με χαμηλότερες κατά μέσο όρο θερμοκρασίες.

- Παρατηρήθηκε αυξητική τάση αντοχών από τις 28 ημέρες ωρίμανσης, σχεδόν για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης περλίτη.
- Σε συνθήκες θέρμανσης (35°C), για 7 ημέρες ωρίμανσης προκύπτουν οι υψηλότερες τιμές αντοχής για όλες σχεδόν τις περιεκτικότητες περλίτη, συγκριτικά με τις άλλες συνθήκες ωρίμανσης.

### ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- Χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης για τη βέλτιστη αξιολόγηση των αρχικών υλικών καθώς και μικροκρυσταλλικών φάσεων.
- Χρήση λογισμικού AUTOQUAN με σκοπό την ποσοτική ανάλυση των δειγμάτων.
- Χρήση μύλων λειοτρίβησης βιομηχανικού τύπου έτσι ώστε να επιτευχθεί χαμηλότερη κοκκομετρία κλίνκερ καθώς βιβλιογραφικά φαίνεται να βοηθά στην καλύτερη ομογενοποίηση των υλικών παρουσία νερού.
- Χρήση διαφορετικού ποζολανικού υλικού ως υλικό αντικατάστασης του κλίνκερ, όπως είναι η φυσική ποζολάνη.
- Αύξηση των ημερών ωρίμανσης των δοκιμίων, για καλύτερο προσδιορισμό ποζολανικής αντίδρασης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΛΟΤ EN 197-1 «Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα»
- Κωστάκης Γ. (2005): «Σημειώσεις Γενικής Ορυκτολογίας», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών ορυκτών Πόρων, Εργαστήριο Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας, Χανιά.
- Τσακαλάκης Κ., 2010, «Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος», Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλεύματος, Ε.Μ.Π.
- Τσίμας Σ. (2001): «Δομικά Υλικά», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ. (2004): «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Χρηστίδης Γ., (2012): «Σημειώσεις μαθήματος Βιομηχανικών Ορυκτών και πετρωμάτων», Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
- Apostolaki Ch., Markopoulos Th., Perdikatsis V. and Agioutantis Z. (2009): «An investigation of the hydration and carbonation mechanisms of natural hydraulic limes».
- ASTM, C 109/C 109M – 02, (2002): «Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars».
- Donatello S., Tyrer M., Cheeseman C.R., (2010): «Comparison of test methods to assess pozzolanic activity».
- J.I. Escalante-García, J.H. Sharp (2001): «The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures».
- J.I. Escalante-García, J.H. Sharp (1997): «Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part ii, blended cements».
- H.F.W Taylor., «Cement Chemistry», 2η έκδοση, University of Aberdeen, Thomas Telford edition published 1997.
- P.C. Hewlett and M. Liska, «Lea's Chemistry of Cement and Concrete», 5<sup>th</sup> edition, 1998, Published by Mathew Dean.

- P. Ragul, M. Naga Theera Hari, N. Arunachelam, M. Chellapandian (2022): «An experimental study on the partial replacement of fine aggregate with perlite in cement concrete».
- Singh M., Garg M, (1991): «Perlite-based building materials - a review of current applications».
- L. Soriano, J. Monzó, M. Bonilla, M.M. Tashima, J. Payá, M.V. Borrachero (2013): «Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cure at low temperatures».
- T.K. Erdem, C. Meral, M. Tokyay, T.Y. Erdogan (2006): « Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements».
- Wendehorst, (2019): «Δομικά Υλικά», Μετάφραση της 21ης αναθεωρημένης Γερμανικής έκδοσης, Εκδότης Μ. Γκιούρδας.
- <http://www.orykta.gr>
- <http://portal.tee.gr>
- <https://www.titan.gr>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Π.1. Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης

**Πίνακας 2:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **0%** (Τυφλό).

	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	9,46	8,99	9,72	9,39	11,67	9,83	11,06	10,86	40,58	45,01	46,54	44,04	85,69	78,88	75,77	80,11
<b>Φούρνος</b>	9,50	9,67	9,90	9,69	16,65	15,49	15,81	15,98	39,38	34,53	40,26	38,05	37,22	38,67	36,52	37,47
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	11,26	11,14	11,29	11,23	7,84	5,50	4,73	6,02	32,89	33,72	47,28	37,96	72,92	76,43	74,57	74,64

**Πίνακας 3:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **5%**.

	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	12,77	11,97	12,28	12,34	14,28	12,33	15,50	14,04	19,97	22,16	21,22	21,12	59,91	61,22	64,65	61,93
<b>Φούρνος</b>	17,09	19,09	19,32	18,50	18,40	19,56	17,25	18,40	21,41	18,39	19,21	19,67	32,92	32,25	30,80	31,99
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	16,15	16,07	16,11	16,11	16,89	15,36	16,20	16,15	18,36	16,60	17,44	17,47	65,90	58,63	63,31	62,61

**Πίνακας 4:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **10%**.

	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	12,03	12,01	12,94	12,33	19,69	20,88	20,82	20,46	23,28	22,18	23,39	22,95	50,31	48,25	51,27	49,94
<b>Φούρνος</b>	14,23	13,59	13,86	13,90	24,09	22,01	19,63	21,91	14,36	20,35	15,88	16,86	30,16	37,73	33,80	33,90
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	9,28	9,11	9,08	9,16	24,41	24,84	24,74	24,66	22,20	21,55	22,10	21,95	31,00	28,49	18,96	26,15

**Πίνακας 5:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **15%**.

	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	11,26	11,24	11,98	11,50	10,58	11,06	11,49	11,04	32,62	35,80	35,33	34,58	48,84	49,30	41,85	46,66
<b>Φούρνος</b>	28,11	24,14	27,01	26,42	17,57	16,17	18,28	17,34	27,63	26,85	27,42	27,30	30,90	39,15	30,26	33,44
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	16,70	14,65	17,04	16,13	15,10	14,86	14,89	14,95	34,01	32,60	33,09	33,23	28,50	32,56	34,68	31,91

**Πίνακας 6:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **20%**.

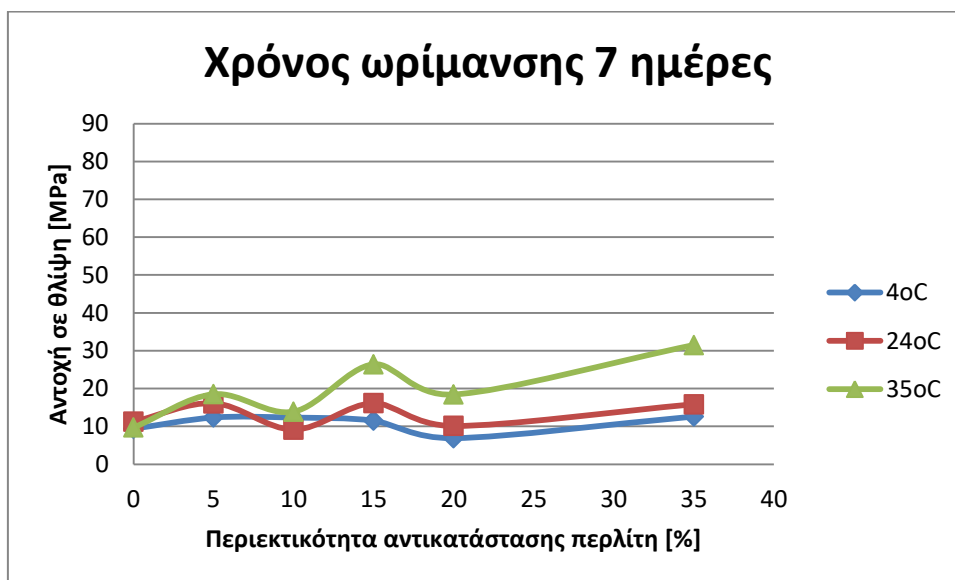
	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	6,83	7,47	6,36	6,89	18,57	18,00	18,14	18,24	27,77	27,49	29,92	28,39	68,28	50,93	52,43	57,22
<b>Φούρνος</b>	19,39	17,72	18,18	18,43	25,50	25,68	25,68	25,62	22,58	22,87	22,16	22,54	49,77	21,99	27,74	33,17
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	10,00	10,21	10,13	10,11	22,57	23,11	22,98	22,89	28,37	27,58	27,77	27,90	33,43	20,12	26,45	26,66

**Πίνακας 7:** Τιμές αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ποζολανικού τσιμέντου με ποσοστό αντικατάστασης περλίτη **35%**.

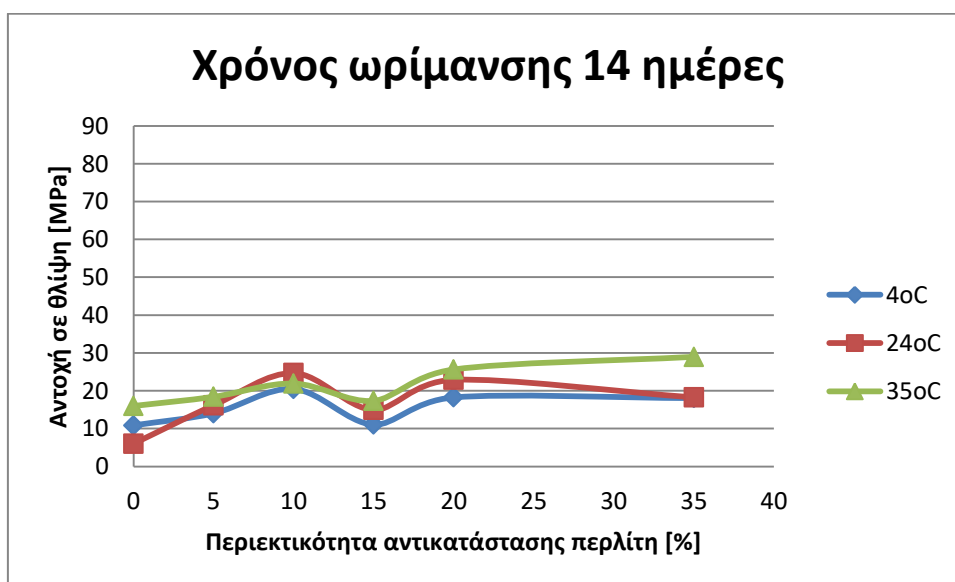
	7 days (Mpa)				14 days (Mpa)				28 days (Mpa)				60 days (Mpa)			
	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.	1	2	3	M.O.
<b>Ψυγείο</b>	13,12	12,61	12,10	12,61	17,99	18,32	17,89	18,07	28,73	26,32	27,92	27,65	40,47	37,99	35,04	37,83
<b>Φούρνος</b>	30,45	32,13	31,96	31,51	29,97	28,53	28,42	28,97	22,99	49,84	50,66	41,16	26,50	24,30	24,83	25,21
<b>Ατμοσφαιρικές συνθήκες</b>	10,49	18,48	18,61	15,86	25,71	23,76	26,31	25,26	25,47	24,55	22,46	24,16	31,17	28,64	29,21	29,67



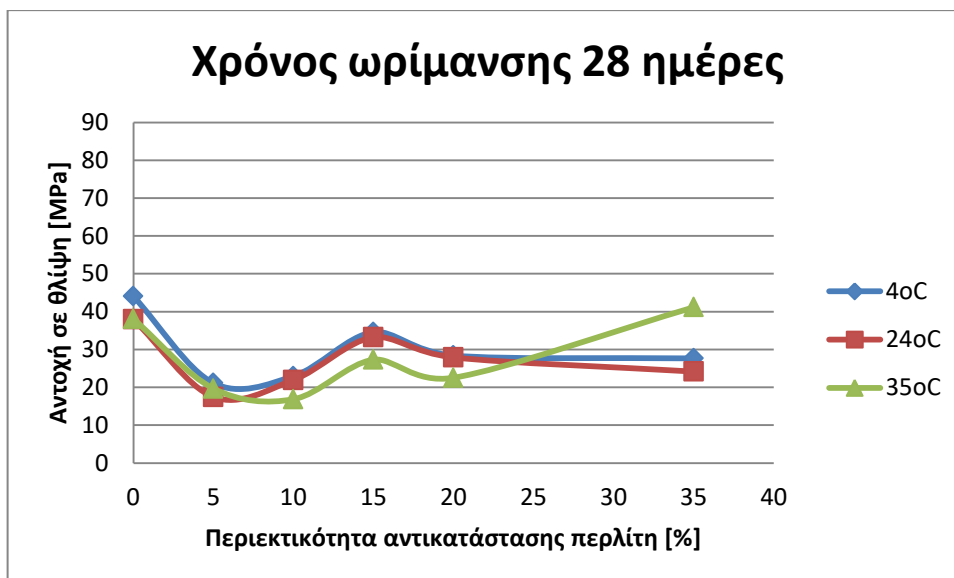
## Π.2. Διαγράμματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα για τις διαφορετικές θερμοκρασίες ωρίμανσης



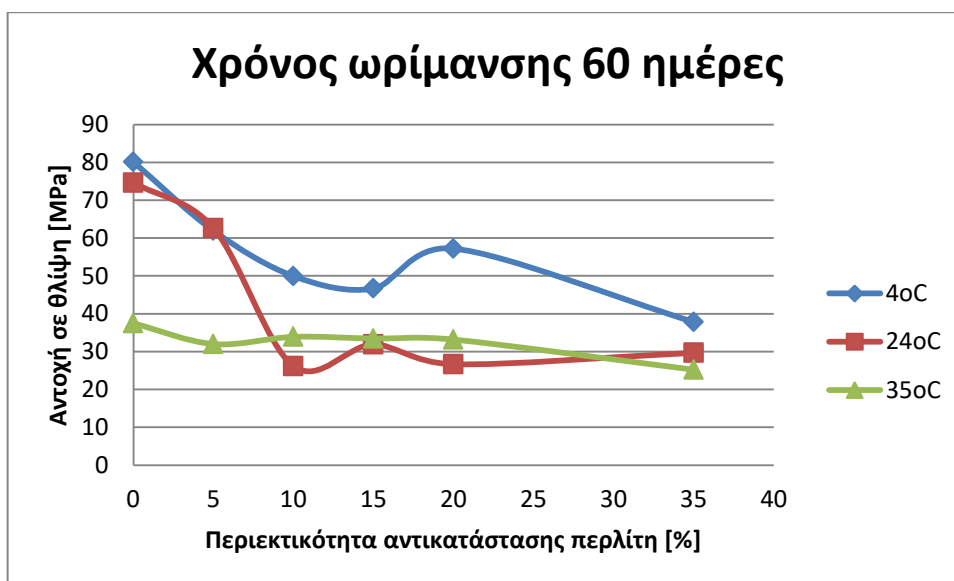
Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 7 ημέρες ωρίμανσης.



Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 14 ημέρες ωρίμανσης.

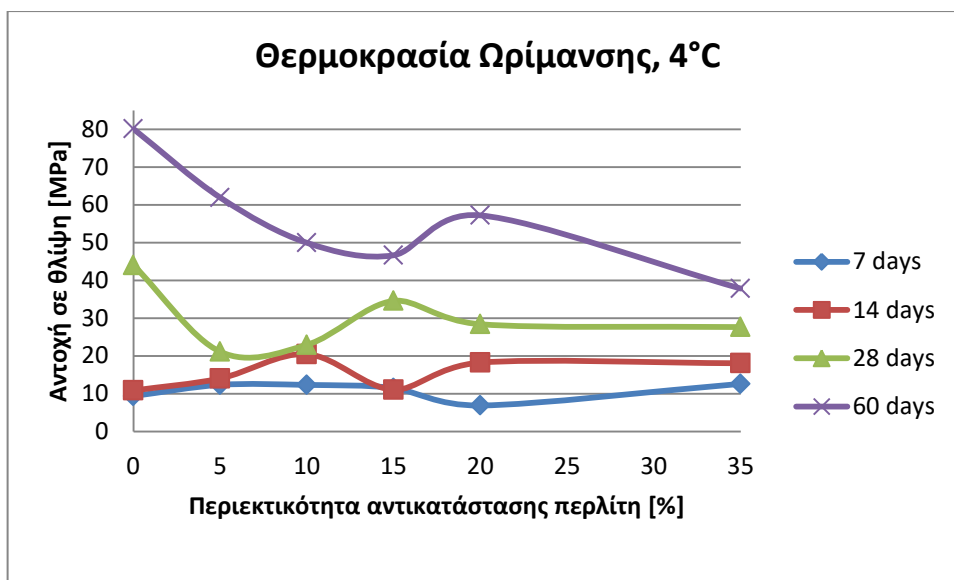


Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 28 ημέρες ωρίμανσης.

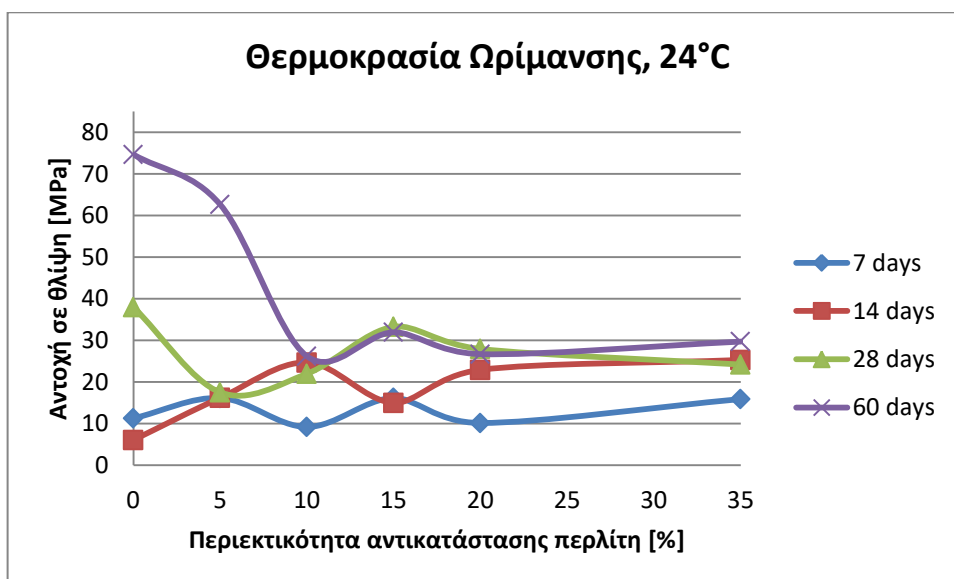


Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 60 ημέρες ωρίμανσης.

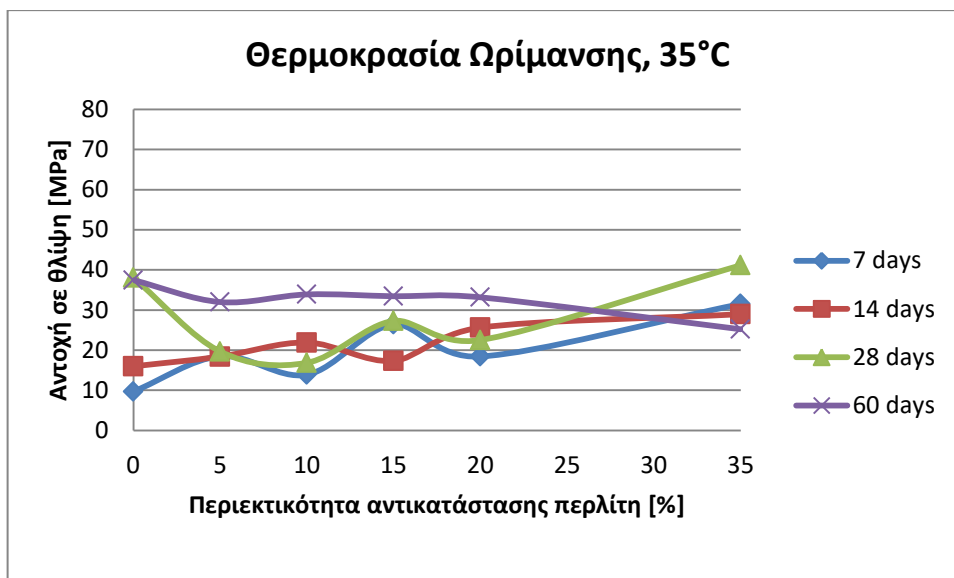
### Π.3. Διαγράμματα αντοχών μονοαξονικής θλίψης σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα για τις διαφορετικές ημέρες ωρίμανσης



Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 4°C.



Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμών ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 24°C.



Διάγραμμα μεταβολής της αντοχής των δοκιμίων ποζολανικού τσιμέντου, σε σχέση με την περιεκτικότητα για 35°C.