

ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΗΣ ΠΗΓΗΣ

Παπαχριστοφόρου Μιχαήλ¹ και Ξανθός Στέλιος²

¹Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ

²Τμήμα Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης
e-mail: papchr@civil.auth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μη καταστρεπτική μέθοδος μέτρησης του πορώδους του σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση της εξασθένησης της ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από στοιχείο σκυροδέματος, από όπου υπολογίζεται ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ του υλικού. Πρόκειται για μέθοδο που μπορεί με ευκολία να επεκταθεί σε επί τόπου μέτρηση (in situ) με χρήση μιας ραδιενεργής πηγής και φορητού ανιχνευτή.

Είναι γνωστό ότι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης είναι ανάλογος της πυκνότητας και κατ' επέκταση του πορώδους του υλικού. Μετρώντας τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησης για διάφορες ενέργειες και το πορώδες του υλικού με εργαστηριακές μετρήσεις προκύπτει συσχέτιση των δύο μεγεθών. Έτσι, μετρώντας τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησης ενός σκυροδέματος μπορεί να προκύψει το πορώδες ως μέση τιμή των παραπάνω συσχετίσεων.

Για τη βαθμονόμηση της μεθόδου υλοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών σκυροδέματος στα οποία μετρήθηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ , καθώς και το πορώδες εργαστηριακά με την προδιαγραφή RILEM CRC 11.3 (1984). Επαλήθευση της ορθότητας των μετρήσεων, όσον αφορά την εξασθένηση ακτινοβολίας, πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης μ/ρ του σκυροδέματος ο οποίος είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας-πορώδους του υλικού και εξαρτάται μόνο από το υλικό εξασθένησης και την ενέργεια των φωτονίων.

Τα αποτελέσματα της έρευνας κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης των δοκιμών σκυροδέματος διαφορετικής πυκνότητας-πορώδους είναι σταθερός για κάθε ενέργεια παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις, ενώ αντίθετα ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ μειώνεται όσο αυξάνεται το πορώδες. Η σχέση που προκύπτει μεταξύ μ και πορώδους εκφράζεται με τον υπολογισμό εξισώσεων που συσχετίζουν τα δυο μεγέθη, καθιστώντας δυνατή την εκτίμηση του πορώδους του σκυροδέματος μέσω της προτεινόμενης δοκιμής.

Λέξεις-Κλειδιά: πορώδες, μη καταστρεπτική μέθοδος, HPGe, εξασθένηση ακτινοβολιών

Abstract

A non-destructive method to measure porosity of concrete or other porous building materials is presented in this experimental investigation. The proposed method is based on the

Παπαχριστοφόρου Μιχαήλ, Ξανθός Στέλιος, ΑΠΘ, ΑΤΕΙΘ
Μέτρηση πορώδους σκυροδέματος με χρήση ραδιενεργής πηγής

measurement of attenuation of radiation passing through a concrete element and calculation of the linear attenuation coefficient. This measurement can easily take place in situ by using a radiation source and a portable radiation detector.

The linear attenuation coefficient is proportional to the density and hence the porosity of the material. By measuring the linear attenuation coefficient and the porosity of concrete in the laboratory, a correlation between the two can occur.

In order to calibrate the proposed method, a series of concrete specimens was implemented and the linear attenuation coefficient and the porosity according to RILEM CRC 11.3 were measured. Verification of the accuracy of radiation measurements was performed by calculating the mass attenuation coefficient of concrete which is independent of the density-porosity of the material and depends only on the material and photon energy.

Results are considered very satisfactory, since the mass attenuation coefficient of concrete specimens with different density-porosity is stable, while the linear attenuation coefficient is decreased as porosity increases. The correlation between these two sizes is expressed by calculating different equations for each photon energy, making it possible to estimate porosity of concrete with the proposed method.

Key words: porosity, non-destructive, HPGe, attenuation of radiation

1. Εισαγωγή

Το πορώδες του σκυροδέματος, δηλαδή το ποσοστό των πόρων του υλικού επηρεάζει σημαντικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την ανθεκτικότητά του, μεταβάλλεται με το χρόνο και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η ποσότητα και ο τύπος της συνδετικής κονιάς, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το επίπεδο συμπύκνωσης, η συντήρηση του νωπού σκυροδέματος κ.α. (Ιωάννα Παπαγιάννη, 2009). Η μέτρηση του πορώδους στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες εργαστηριακές μεθόδους (στερεοσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση, RILEM CRC 11.3, EN 1015-18:2002, μέθοδος της απορρόφησης αζώτου, υδραργυρικό πορωσίμετρο) Stefanidou (2010), και σπανίως με επί τόπου μετρήσεις. Απαιτείται η λήψη δείγματος του προς μέτρηση υλικού με αποτέλεσμα την μερική καταστροφή του προς μέτρηση αντικειμένου.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μη καταστρεπτική μέθοδος μέτρησης του πορώδους του σκυροδέματος και άλλων δομικών υλικών με χρήση μιας ραδιενεργής πηγής και ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe detector). Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου είναι προτιμότερος έναντι άλλων τύπων ανιχνευτή για φασματοσκοπική ανάλυση λόγω της μεγαλύτερης διακριτικής του ικανότητας Knoll (1979). Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί με ευκολία να επεκταθεί σε επί τόπου μέτρηση (in situ) με χρήση ραδιενεργής πηγής και φορητού ανιχνευτή.

Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ του υλικού. Η εξασθένηση ακτινοβολίας δίνεται από τον τύπο $I=I_0 e^{-\mu x}$, όπου I_0 είναι η αρχική ένταση της ακτινοβολίας, x το πάχος του υλικού, I η ένταση της ακτινοβολίας που διαπερνά το υλικό

χωρίς να αλληλεπιδράσει και με ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού, που εκτός από το είδος του υλικού και την ενέργεια της ακτινοβολίας, εξαρτάται και από την πυκνότητα (άρα και από το πορώδες) του υλικού απορρόφησης. Γνωρίζοντας τα I_0 , I και x μπορούμε να υπολογίσουμε το μ για διάφορες ενέργειες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Με δεδομένο τον μ και μια βάση δεδομένων όπου ο μ συσχετίζεται με το πορώδες, μπορεί να υπολογιστεί το πορώδες του υλικού.

2. Μεθοδολογία

Για τη βαθμονόμηση της προτεινόμενης μεθόδου υλοποιήθηκε μια σύνθεση σκυροδέματος με τις αναλογίες υλικών που φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αναλογίες υλικών της σύνθεσης σκυροδέματος

Υλικό	kg/m ³	(%) κ.β.	Πυκνότητα (g/cm ³)
Τσιμέντο CEM I 42,5N	300	12,34	3,14
Νερό	150	6,17	1,00
Λεπτόκοκκα αδρανή (θραυστά ασβεστολιθικά)	793	32,61	2,68
Χονδρόκοκκα αδρανή (θραυστά ασβεστολιθικά)	1189	48,89	2,68
Σύνολο	2432	100,00	

Σκυροδετήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 10 cm, στα οποία επιβλήθηκαν διαφορετικά επίπεδα συμπύκνωσης ώστε να προκύψει σκυρόδεμα με διαφορετικό ποσοστό κενών μέσα στη μάζα του (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Δοκίμια σκυροδέματος με διαφορετική πυκνότητα-πορώδες

Στα δοκίμια αυτά μετρήθηκε η εξασθένηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γ η οποία διέρχεται μέσα από στοιχείο σκυροδέματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε

ραδιενεργή πηγή ευρωπίου (Eu-152) και ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (High Purity Germanium (HPGe) detector) απόδοσης 50%. Το σήμα που λαμβάνει ο ανιχνευτής οδηγείται σε υπολογιστή με ενσωματωμένο ενισχυτή σήματος (amplifier), πολυκαναλικό αναλυτή (MCA) και κάρτα υψηλής τάσης (HV) (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Εξοπλισμός μέτρησης ακτινοβολίας γ και δοχείο φύλαξης ραδιενεργού πηγής

Σε κάθε μέτρηση λαμβάνεται φάσμα του ρυθμού των κρούσεων των φωτονίων στον κρύσταλλο του ανιχνευτή συναρτήσει της ενέργειάς τους. Κατόπιν επεξεργασίας του φάσματος προκύπτει ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτουν στο μπροστινό παράθυρο του ανιχνευτή για κάθε ενέργεια.

Κάθε δοκίμιο μετρήθηκε δυο φορές και υπολογίστηκε ο μέσος όρος του N , δηλαδή του αριθμού των φωτονίων που καταγράφονται με το δοκίμιο να παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή. Στη συνέχεια με γνωστό το πάχος του δοκιμίου (x) και τον αριθμό των φωτονίων που καταγράφονται χωρίς το δοκίμιο να παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή (N_0), υπολογίστηκε ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ του υλικού καθώς και η τυπική αβεβαιότητα $u(\mu)$ που υπεισέρχεται από τις τυπικές αβεβαιότητες $u(N)$ και $u(N_0)$ των τιμών των N και N_0 αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$\mu = \frac{1}{x} \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) \quad u_{(\mu)} = \sqrt{\left(\frac{u_N}{x \cdot N}\right)^2 + \left(\frac{u_{N_0}}{x \cdot N_0}\right)^2} \quad (1,2)$$

Το πορώδες των σκυροδεμάτων μετρήθηκε εργαστηριακά με την προδιαγραφή RILEM CRC 11.3 (1984), μέθοδος που βασίζεται στην πλήρωση των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους (ανοικτό πορώδες) με νερό. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και εκτίμηση του ολικού πορώδους (ανοικτό και κλειστό πορώδες) που υπολογίστηκε από τη διαφορά της θεωρητικής πυκνότητας που θα είχε το σκυρόδεμα σύμφωνα με την αναλογία σύνθεσης και της πραγματικής του. Η θεωρητική πυκνότητα ρ' του μίγματος μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\rho' = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i}} \quad (3)$$

όπου w_i είναι η % κ.β. συμμετοχή του κάθε υλικού στο μίγμα και ρ_i οι πυκνότητες αυτών των υλικών. Η πραγματική πυκνότητα ρ των δοκιμίων σκυροδέματος μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642-97.

Για επαλήθευση της μεθόδου υπολογίστηκε ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης μ/ρ ο οποίος δεν θα πρέπει να μεταβάλλεται για δοκίμια σκυροδέματος με διαφορετικό πορώδες.

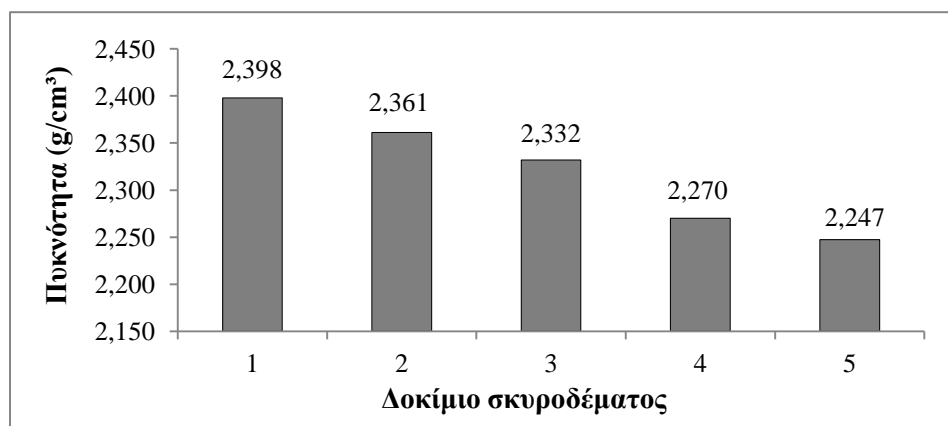
3. Βαθμονόμηση μεθόδου

3.1 Υπολογισμός πυκνότητας, μ και μ/ρ

Από τα κυβικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν επιλέχθηκαν 5 δοκίμια με διαφορετικό βάρος. Στα δοκίμια αυτά αρχικά μετρήθηκε η φαινόμενη ειδική πυκνότητα ρ του σκυροδέματος που προκύπτει από την παρακάτω σχέση σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 642-97:

$$\rho = \frac{A}{A - D} \quad (4)$$

όπου A είναι το βάρος του δοκιμίου μετά από θέρμανση σε φούρνο και D το βάρος του όταν είναι βυθισμένο σε νερό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 3: Φαινόμενη ειδική πυκνότητα δοκιμίων σκυροδέματος

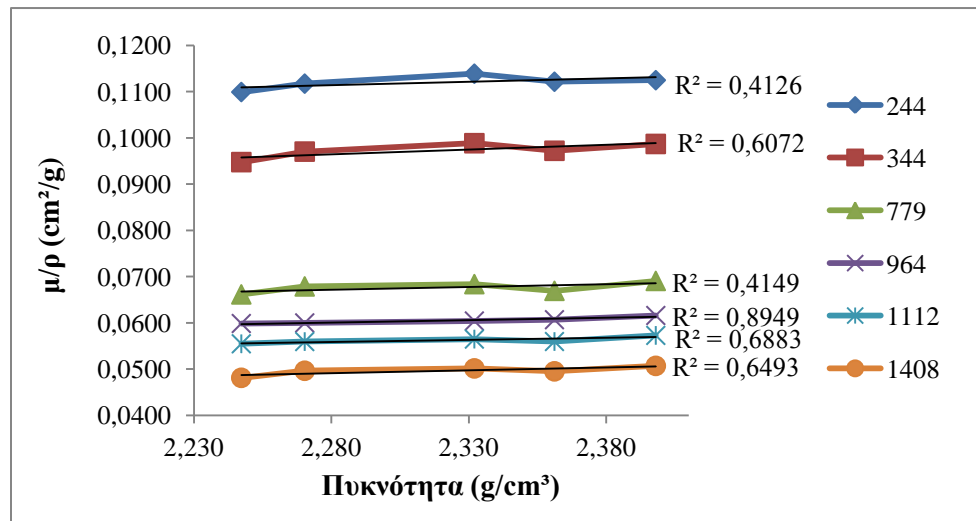
Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ των δοκιμίων σκυροδέματος μετρήθηκε για τις ενέργειες 244, 344, 779, 964, 1112 και 1408 keV, ενέργειες στις οποίες εκπέμπει φωτόνια η

ραδιενεργή πηγή ευρωπίου (Eu-152) που χρησιμοποιήθηκε. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 2. Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης δοκιμίων σκυροδέματος (cm^{-1})

Ενέργεια (keV)	1	2	3	4	5
244	$0,270 \pm 0,003$	$0,265 \pm 0,003$	$0,267 \pm 0,001$	$0,254 \pm 0,004$	$0,247 \pm 0,003$
344	$0,237 \pm 0,001$	$0,230 \pm 0,001$	$0,231 \pm 0,001$	$0,220 \pm 0,001$	$0,213 \pm 0,001$
779	$0,166 \pm 0,001$	$0,158 \pm 0,001$	$0,161 \pm 0,001$	$0,154 \pm 0,002$	$0,149 \pm 0,001$
964	$0,148 \pm 0,001$	$0,143 \pm 0,001$	$0,143 \pm 0,001$	$0,136 \pm 0,001$	$0,135 \pm 0,001$
1112	$0,137 \pm 0,001$	$0,132 \pm 0,001$	$0,134 \pm 0,001$	$0,127 \pm 0,001$	$0,125 \pm 0,001$
1408	$0,122 \pm 0,001$	$0,117 \pm 0,001$	$0,118 \pm 0,001$	$0,113 \pm 0,001$	$0,108 \pm 0,001$
Πυκνότητα (g/cm^3)	2,398	2,361	2,332	2,270	2,247

Με γνωστό τον γραμμικό συντελεστή και την πυκνότητα των σκυροδεμάτων υπολογίστηκε ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης για τις συγκεκριμένες ενέργειες, ο οποίος είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας-πορώδους του υλικού.



Σχήμα 4. Μαζικός συντελεστής εξασθένησης σκυροδέματος για ενέργειες από 244 έως 1408 keV

Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την ενέργεια 964 keV όπου η διακύμανση των τιμών του μ/ρ είναι η μικρότερη.

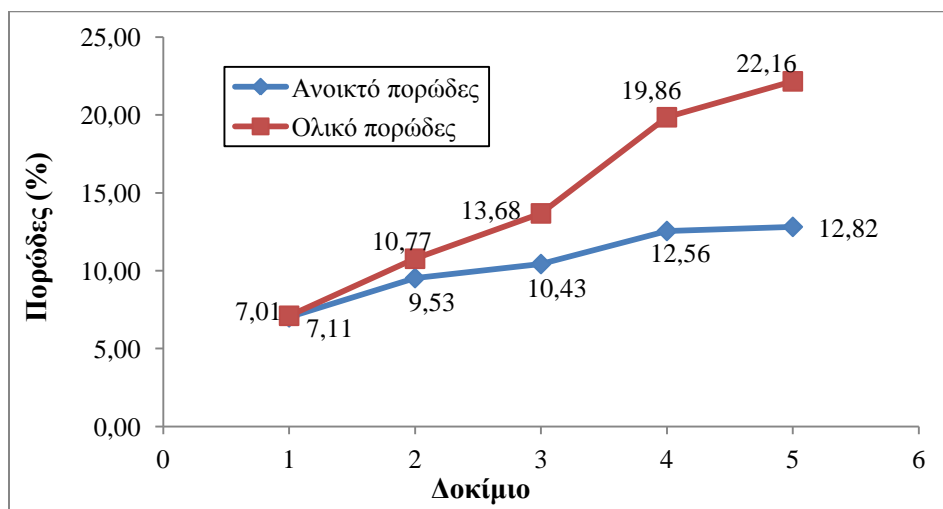
3.2 Μέτρηση πορώδους

Ο υπολογισμός του ανοικτού πορώδους, δηλαδή του συνόλου των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους, όπως μετρήθηκε με την οδηγία της RILEM, παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 3. Μετρήσεις και υπολογισμός του ανοικτού πορώδους δοκιμίων σκυροδέματος

Δοκίμιο	Όγκος δοκιμίου (cm ³)	Βάρος ξηρό (g)	Βάρος κορεσμένο (g)	Ανοικτό πορώδες (%)
1	984,66	2361,00	2430,00	7,01
2	977,45	2307,90	2401,05	9,53
3	956,30	2230,12	2329,89	10,43
4	893,05	2027,47	2139,60	12,56
5	863,01	1939,37	2050,00	12,82

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του ολικού πορώδους που υπολογίστηκε από τη διαφορά της θεωρητικής πυκνότητας που θα είχε το σκυρόδεμα σύμφωνα με την αναλογία σύνθεσης και της πραγματικής του. Η θεωρητική πυκνότητα ρ' του μίγματος υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (3) και τα δεδομένα του Πίνακα 1 και βρέθηκε ίση με 2,469 g/cm³. Στο ακόλουθο Σχήμα δίνονται οι τιμές του ολικού πορώδους μαζί με τις τιμές του ανοικτού πορώδους που υπολογίστηκαν πιο πριν ώστε να γίνει σύγκριση των τιμών:

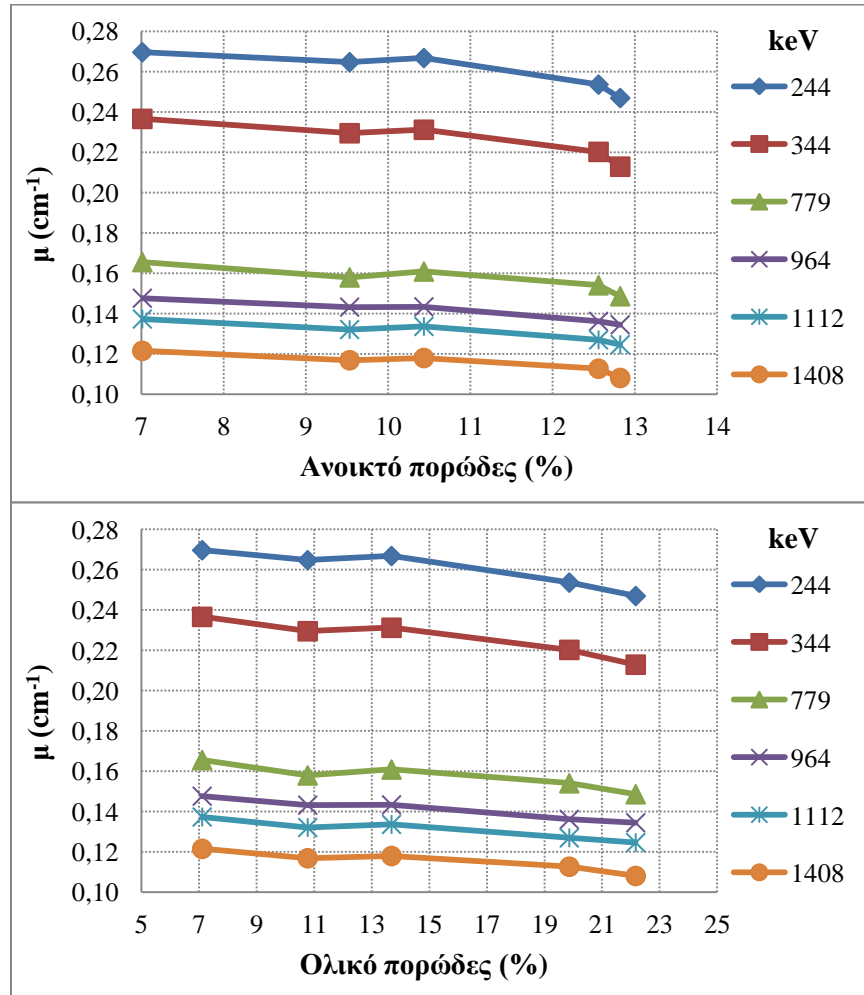


Σχήμα 5: Ανοικτό και ολικό πορώδες δοκιμίων σκυροδέματος

Η διαφορά μεταξύ ανοικτού και ολικού πορώδους είναι πολύ μικρή για χαμηλές τιμές του πορώδους και αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές.

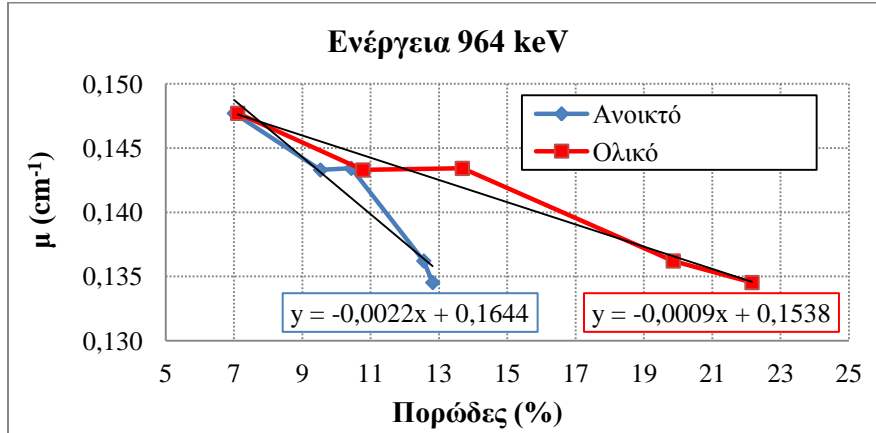
4. Συσχέτιση μ-πορώδους

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η συσχέτιση του γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ και του πορώδους του σκυροδέματος, όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 6: Συσχέτιση μ για διάφορες ενέργειες φωτονίων και πορώδες

Ξεχωριστά δίνεται η προκύπτουσα συσχέτιση μ και πορώδες μόνο για την ενέργεια των 964 keV που είχε τη μικρότερη διακύμανση του μ/ρ :



Σχήμα 6: Συσχέτιση μ και πορώδους για την ενέργεια των 964keV

Στο άνω διάγραμμα φαίνονται και οι εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης για το ανοικτό και ολικό πορώδες. Παρακάτω δίνονται λυμένες ως προς x , δηλαδή ως προς το πορώδες για την ενέργεια των 964 keV:

$$(\%) \text{ Ανοικτό πορώδες} = 74,73 - 454,55 \cdot \mu_{964}$$

$$(\%) \text{ Ολικό πορώδες} = 170,89 - 1111,11 \cdot \mu_{964}$$

(5,6)

Οι αντίστοιχες εξισώσεις μπορούν να προκύψουν και για όλες τις ενέργειες:

$$(\%) \text{ Ανοικτό πορώδες} = \begin{cases} 82,83 - 277,78 \cdot \mu_{244} \\ 73,42 - 277,78 \cdot \mu_{344} \\ 73,40 - 400,00 \cdot \mu_{779} \\ 74,73 - 454,55 \cdot \mu_{964} \\ 76,20 - 500,00 \cdot \mu_{1112} \\ 68,25 - 500,00 \cdot \mu_{1408} \end{cases}$$

$$(\%) \text{ Ολικό πορώδες} = \begin{cases} 188,00 - 666,67 \cdot \mu_{244} \\ 165,00 - 666,67 \cdot \mu_{344} \\ 171,60 - 1000,00 \cdot \mu_{779} \\ 170,89 - 1111,11 \cdot \mu_{964} \\ 178,25 - 1250,00 \cdot \mu_{1112} \\ 158,88 - 1250,00 \cdot \mu_{1408} \end{cases}$$

(7,8)

5. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού του πορώδους σκυροδέματος με χρήση ραδιενεργής πηγής κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, αφού ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης των δοκιμίων σκυροδέματος διαφορετικής

πυκνότητας-πορώδους είναι σταθερός για κάθε ενέργεια παρουσιάζοντας μικρές αποκλίσεις, ενώ αντίθετα ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ μειώνεται όσο αυξάνεται το πορώδες. Η σχέση που προκύπτει μεταξύ μ και πορώδους εκφράστηκε με τον υπολογισμό ξεχωριστών εξισώσεων για κάθε ενέργεια που συσχετίζουν τα δυο μεγέθη. Έτσι, μετρώντας τον γραμμικό συντελεστή εξασθένηση ενός σκυροδέματος για διαφορετικές ενέργειες μπορεί να προκύψει το πορώδες ως μέση τιμή των παραπάνω συσχετίσεων. Σημαντικό είναι επίσης το ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί με ευκολία να επεκταθεί σε επί τόπου μέτρηση (in situ) με χρήση μιας ραδιενεργής πηγής και φορητού ανιχνευτή.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο δείγμα που βασίζεται η πρώτη αυτή συσχέτιση μ και πορώδους είναι μικρό. Σε επόμενο στάδιο της έρευνας πρέπει να ελεγχθεί μεγαλύτερος αριθμός δοκιμίων καθώς και συνθέσεις σκυροδέματος με διαφορετική αναλογία σύνθεσης (διαφορετική ποσότητα τσιμέντου, νερού).

6. Βιβλιογραφία

Ιωάννα Παπαγιάννη, “Σκυρόδεμα μικροδομή, ιδιότητες και υλικά, μετάφραση P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro”, 2009, Κλειδάριθμος

ASTM C 642-13, “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”, 2013

Glenn F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, 1979, John Wiley & Sons

RILEM CRC 11.3, “Absorption of water by concrete by immersion under vacuum”, 1984

Stefanidou M., “Methods for measuring porosity of lime-based mortars”, Construction and Building Materials 24, pp. 2572-2578, 2010