

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΤΜΗΣΗΣ LAGUERRE

Χ.Σ. Στιάπης^{1,2}, Ε.Δ. Σκούρας¹, Β.Ν. Μπουργανός^{1,*}

¹Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ),
Πάτρα, Ελλάδα

²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα

(*vbur@iceht.forth.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κεραμικοί αφροί είναι πολλά υποσχόμενα υλικά και χαρακτηρίζονται από το μεγάλο πορώδες αλλά και από το μεγάλο εύρος ειδικής επιφάνειάς τους. Η δομή τους αποτελείται κυρίως από μακροκενά τα οποία οριοθετούνται από στερεούς κλάδους, διαμορφώνοντας έτσι μια δομή με χαμηλή αντίσταση στην ροή και με κατάλληλες ιδιότητες για διαδικασίες διήθησης. Στην παρούσα εργασία εισάγουμε την ξεχωριστή ψηφιακή ανακατασκευή του κάθε κλάδου χρησιμοποιώντας την κατάτμηση Laguerre προκειμένου να αποκτήσουμε την χωρική διασπορά των κυψελών, που αποτελούν τον αφρό. Στόχος της εργασίας είναι η επιτυχής ψηφιακή ανακατασκευή και ο δομικός χαρακτηρισμός μιας σειράς κεραμικών αφρών, αποτελούμενων από SiC-Al₂O₃. Χρησιμοποιώντας υπολογιστικές μεθόδους με την προτεινόμενη μέθοδο, έγινε δυνατό να υπολογίσουμε το πορώδες, την αποτελεσματική διαπερατότητα και την ειδική επιφάνεια των δομών αυτών. Η προτεινόμενη μέθοδος ανακατασκευής αποδεικνύεται πιο αξιόπιστη από ορισμένες αναλυτικές εκφράσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, προσφέροντας αυξημένη ακρίβεια στην πρόβλεψη των προαναφερθεισών ιδιοτήτων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κεραμικοί αφροί είναι εξαιρετικά πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα διαφόρων τεχνολογικών εφαρμογών. Οι κεραμικοί αφροί παράγονται κυρίως με την μέθοδο της δημιουργίας αντιγράφου πολυμερούς αφρού. Σε αυτή τη διαδικασία, ένας πολυμερής αφρός χρησιμοποιείται ως καλούπι και βυθίζεται σε έναν κεραμικό πολτό, όπου στη συνέχεια πιέζεται και ακολουθεί η ξήρανσή του. Το στάδιο αυτό ενδέχεται να επαναληφθεί αρκετές φορές, ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας από το πολυμερές και να αντικατασταθεί από τον κεραμικό πολτό. Επίσης, αργότερα συμπιέζεται ξανά ώστε να απομακρυνθεί η περίσσεια κεραμικού πολτού. Μετά την ξήρανση λαμβάνει χώρα η εξάχνωση του πολυμερούς και το απομένον κεραμικό υφίσταται πυροσυσσωμάτωση, παρέχοντας ένα σχετικά πιστό αντίγραφο του αρχικού πολυμερούς αφρού^[1]. Οι δομικές ιδιότητες του κεραμικού αφρού που παράγεται με την τεχνική αυτή υπαγορεύονται, κυρίως, από τα χαρακτηριστικά του πολυμερούς αφρού, όπως το πορώδες, το μέγεθος των πόρων και η πυκνότητα των πόρων ανά μονάδα επιφάνειας (PPI)^[2]. Η διαπερατότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των κεραμικών αφρών όταν χρησιμοποιούνται σε διεργασίες διήθησης. Μια ακριβής εκτίμηση της πτώσης πίεσης σε φίλτρο αποτελούμενο από κεραμικό αφρό επιτρέπει τον έλεγχο της ενέργειας που απαιτείται για τη ροή για να ξεπεραστεί η αντίσταση του πορώδους μέσου στην ροή^[3]. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την εκτίμηση της διαπερατότητας αυτών των πορωδών μέσων που αρχικά βασίστηκαν στην πειραματική εκτίμηση^[4] και αργότερα εξελίχθηκαν σε αναλυτικά μοντέλα με συγκεκριμένες και καλά καθορισμένες, αλλά απλές, τοπολογίες^[5-7]. Αυτές οι αναλυτικές εκφράσεις ισχύουν μόνο για μια συγκεκριμένη περιοχή πορώδους, καθώς και για ένα συγκεκριμένο εύρος πυκνότητας πόρων, και η τοπολογία του αφρού αντιμετωπίζεται ως μια διατεταγμένη διάταξη πόρων ή κυλίνδρων και κλάδων. Ωστόσο, η κύρια πρόκληση στην αξιολόγηση της διαπερατότητας με χρήση των προαναφερόμενων αναλυτικών εκφράσεων είναι ο ακριβής ορισμός των βασικών δομικών ιδιοτήτων του καθώς και ο ορισμός μιας αντιπροσωπευτικής διαμέτρου πόρων. Είναι

σχετικά δύσκολο να παρασχεθεί ένας γενικός ορισμός για την διάμετρο αυτή, λόγω του γεγονότος ότι οι πόροι χαρακτηρίζονται από κατανομή μεγεθών και παραλλαγές σχημάτων. Δύο εξαιρέσεις σε αυτόν τον κανόνα προκύπτουν στις ειδικές περιπτώσεις, είτε των μη επικαλυπτόμενων ομοιόμορφων κυλινδρικών πόρων, είτε των μη επικαλυπτόμενων ομοιόμορφων σφαιρικών πόρων. Έτσι, σε αυτές τις ειδικές περιπτώσεις ο πόρος χαρακτηρίζεται από μία μόνο παράμετρο, π.χ. τη διάμετρο της σφαίρας. Αν και αυτή η παράμετρος μπορεί να ποσοτικοποιηθεί απλά για κάποια μέσα, προκύπτουν δυσκολίες όταν υποθέτουμε ότι μια δομή αφρού, που αποτελείται από στερεούς κλάδους διασυνδεδεμένους σε τρεις διαστάσεις, μπορεί να οριστεί αποκλειστικά με μία μοναδική διάμετρο πόρων. Εντούτοις, η δυνατότητα πρόβλεψης της διαπερατότητας ενός κεραμικού αφρού με μη επεμβατικές μεθόδους παραμένει ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η πειραματική διαδικασία πρέπει να διεξάγεται σε έντονες συνθήκες, όπως στη ροή λειωμένων μετάλλων^[3].

Το κύριο αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των ιδιοτήτων μεταφοράς κεραμικών αφρών και στις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις, με την καθιέρωση συγκεκριμένης διαδικασίας ψηφιακής ανακατασκευής με πρωτογενή δεδομένα από ηλεκτρονική μικροσκοπία. Για την επικύρωση, καθώς και για τους σκοπούς του χαρακτηρισμού, διεξάγεται εκτενής σειρά υπολογισμών που περιλαμβάνουν τη μέση διάμετρο πόρου, την ειδική επιφάνεια και την αποτελεσματική διαπερατότητα στο ψηφιακά ανακατασκευασμένο μοντέλο κάθε αφρού. Οι τιμές που εξάγονται μέσω των υπολογισμών συγκρίνονται με δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μεθοδολογία, ανακατασκευάζονται τρεις διαφορετικοί αφροί για να αναδειχθεί το εύρος της εφαρμοσιμότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας για κεραμικούς αφρούς με διαφορετικά PPI.

Στην παρούσα προσέγγισή μας, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο χωρικής κατάτμησης, γνωστή ως κατάτμηση Laguerre, για την ανακατασκευή κεραμικών αφρών που αποτελούνται από κυρτά κύτταρα με μεγάλη διακύμανση κυψελίδων. Οι εικόνες SEM των αφρών χρησιμοποιούνται πλήρως για να παρέχουν δομικές πληροφορίες σχετικά με τα ειδικά χαρακτηριστικά του αφρού. Αναπτύξαμε μια πολύπλοκη αλλά συστηματική διαδικασία προκειμένου να εξαγάγουμε το μέγεθος των κυψελών, καθώς και τα σχήματα των κλάδων, απευθείας από τις εικόνες SEM των αντίστοιχων αφρών και να εισαγάγουμε αυτά τα δείγματα σε μια διαδικασία ανακατασκευής του αφρού. Αυτά τα δείγματα χρησιμοποιούνται περαιτέρω για να παραγάγουν κατάλληλες κατανομές μεγέθους κυττάρων, καθώς και την τρισδιάστατη μορφολογία των κλάδων.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την ψηφιακή ανακατασκευή αφρώδων τοπολογιών είναι οι κατατμήσεις χώρου. Ο χωρικός διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση ορισμένα σημεία στον χώρο και ένα κριτήριο απόστασης που επιλέγεται ώστε να σχηματιστούν οι υποπεριοχές. Μεταξύ των μεθόδων κατάτμησης χώρου, οι τρεις πιο γνωστές και δημοφιλείς είναι οι κατατμήσεις Voronoi, οι κατατμήσεις Laguerre, επίσης γνωστές ως διαγράμματα ισχύος, και οι κατατμήσεις Johnson-Mehl. Και τα τρία μοντέλα βασίζονται στο μοντέλο της ιστροπικής ανάπτυξης. Στην παρούσα εργασία, η επιλογή της βασικής παραλλαγής της κατάτμησης Laguerre χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί μια τρισδιάστατη στοχαστική δομή αφρώδους υλικού. Οι πολυεδρικές κυψέλες που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας αντιπροσωπεύουν τον κενό χώρο του υλικού. Αντίθετα, οι πολυεδρικές ακμές κατασκευάζονται με σκοπό να αναπαράγουν τους κλάδους που αντιπροσωπεύουν την περιοχή τοιχώματος πόρων. Η μαθηματική περιγραφή βασίζεται σε ένα πεπερασμένο σύνολο σταθμισμένων σημείων που προκύπτει από μια κατάλληλη διαδικασία παραγωγής ενός συνόλου χωρικών σημείων και συζευγμένων ακτίνων

$$[\vec{x}, w] \in \psi \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R} \quad (1)$$

που ονομάζονται πυρήνες, οι οποίοι αλληλοεπιδρούν μέσω της απόστασης ισχύος

$$pow(z, [\vec{x}, w]) = \|z - \vec{x}\| - w \quad (2)$$

και οδηγούν στον σχηματισμό πολυεδρικών κυψελών

$$Cell([\vec{x}, w], \psi) = \{z \in \mathbb{R}^n \mid pow(z, [\vec{x}^*, w^*]) \leq 0, [\vec{x}^*, w^*] \in \psi\}. \quad (3)$$

$n=3$ για τρισδιάστατες κατασκευές. Η μαθηματική περιγραφή μπορεί να ερμηνευτεί ως σφαίρα με κέντρο στο \vec{x} και ακτίνα $r_{sphere} = \sqrt{w}$.

Στην προτεινόμενη προσέγγιση υποθέτουμε ότι οι πυρήνες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν είναι στοίβες μη αλληλεπικαλυπτόμενων σφαιρών, των οποίων η ακτίνα λαμβάνεται από μια προκαθορισμένη κατανομή, η οποία εξάγεται από τον χώρο των πόρων στις εικόνες SEM. Η διάταξη των σφαιρών χρησιμοποιείται για να προσεγγιστούν ποιοτικά ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αφρού, όπως η χωρική διάταξη και διάσταση των κυψελών που παράγονται από την κατάτμηση Laguerre. Η εναπόθεση των σφαιρών / πυρήνων γίνεται με τον αλγόριθμο συσκευασίας Lubachevsky-Stillinger^[8,9]. Αυτός ο αλγόριθμος διάταξης των σφαιρών δημιουργεί μια μη επικαλυπτόμενη διάταξη παρακείμενων σφαιρών και παρέχει πολλά υποσχόμενη δυναμική κατά την ανακατασκευή:

1. Κατά γενικό κανόνα, η κυψέλη που δημιουργείται περιβάλλει εντελώς τη σφαίρα που έδρασε ως πυρήνας. Ο ελάχιστος όγκος κυψέλης είναι τουλάχιστον ίσος ή μεγαλύτερος από τη σφαίρα πυρήνωσης που την δημιούργησε.
2. Η κατανομή μεγέθους των κυψελών εξαρτάται έντονα από την κατανομή και το μέγεθος των σφαιρών πυρήνωσης.

Στην οριακή περίπτωση, όπου η συσσώρευση των σφαιρών είναι αρκετά πυκνή, η κατανομή μεγέθους των κυψελών που λαμβάνονται με την κατάτμηση Laguerre είναι παρόμοια με την κατανομή μεγέθους των σφαιρών της εναπόθεσης. Στην τελευταία περίπτωση, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι επιτυγχάνεται μια ποιοτική περιγραφή του πορώδους μέσου. Ένα άλλο κρίσιμο γεωμετρικό στοιχείο της δομής του αφρού σχετίζεται με το σχήμα του κλάδου. Το μεγαλύτερο μέρος των μοντέλων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία υποθέτουν κλάδους σταθερής διαμέτρου κατά μήκος των κυρτών ακμών των κυψελών, που ομοιάζουν με το σχήμα ενός κυλίνδρου. Στην παρούσα προσέγγιση, ο κλάδος αποκτά ένα πιο πολύπλοκο αξονοσυμμετρικό σχήμα. Αυτή η μεταβολή του τοπικού πάχους έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει πολλές από τις ελαστικές ιδιότητες και τις ιδιότητες ροής και μεταφοράς μάζας και ενέργειας του αφρού^[10-12]. Η ανακατασκευή των κλάδων επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ του σχήματος των κλάδων από την εικόνα SEM. Αυτό γίνεται με την εξαγωγή πολλαπλών σημείων στην διεπιφάνεια κενού-στερεού κατά μήκος του κάθε κλάδου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για το σύνολο των κλάδων στην εικόνα SEM, αντιστοιχίζοντας σε λίστες μνήμης το προφίλ του κάθε κλάδου, καθώς και το μήκος τους. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία συνάρτηση, η οποία ως είσοδο δέχεται το μήκος ενός κλάδου και επιστρέφει το προφίλ του κλάδου.

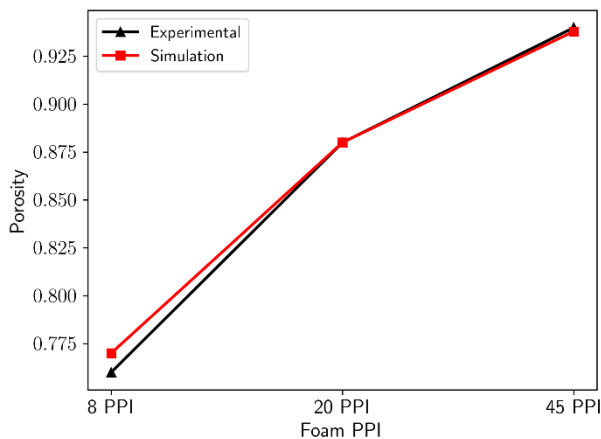
Μετά το πέρας της χωρικής κατάτμησης αποκτάμε κυψέλες που χαρακτηρίζονται από τους κόμβους και τις ακμές τους. Σκοπός μας είναι να περιβάλλουμε τις ακμές με το κατάλληλο τρισδιάστατο προφίλ του στερεού σώματος του αφρού. Έτσι, χρησιμοποιώντας το μήκος της ακμής ως χαρακτηριστικό μέγεθος, τροφοδοτούμε κάθε φορά, για κάθε ακμή, την συνάρτηση την οποία δημιουργήσαμε προηγουμένως, αποκτώντας το αντίστοιχο προφίλ στερεάς φάσης που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη ακμή. Στο επόμενο βήμα, αφού το προφίλ αυτό περιστραφεί γύρω

από τον άξονά συμμετρίας του, δημιουργεί ένα αξονοσυμμετρικό στερεό, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στους κόμβους που συνδέονται από την ακμή. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για το σύνολο των κυψελίδων καταλήγουμε στην τελική δομή του κεραμικού αφρού. Η ψηφιακή ανακατασκευή του κεραμικού αφρού χρησιμοποιείται για να εξαχθούν τόσο οι δομικές ιδιότητες, όσο και οι αποτελεσματικές ιδιότητες μεταφοράς της ανακατασκευής, οι οποίες και συγκρίνονται με αναλυτικές εκφράσεις από την βιβλιογραφία, καθώς και με πειραματικά δεδομένα του υπό διερεύνηση αφρού.

Για την συγκεκριμένη εργασία λήφθηκαν υπόψη κεραμικοί αφροί που παράχθηκαν με την διαδικασία αντιγραφής πολυμερικών αφρών. Ασχοληθήκαμε με τρεις κεραμικούς αφρούς οι οποίοι, ενώ παράχθηκαν με την ίδια μέθοδο, είχαν διαφορετικό PPI, αλλά και πορώδες. Στόχος μας ήταν να εξετάσουμε εάν η μέθοδος που αναπτύξαμε δύναται να αναπαραστήσει ένα ευρύ φάσμα κεραμικών αφρών που παράγονται με την μέθοδο της αντιγραφής. Τα δομικά στοιχεία που εξετάστηκαν ήταν η ειδική επιφάνεια του αφρού και το πορώδες, ενώ ως κρίσιμη ιδιότητα μεταφοράς εξετάσαμε την αποτελεσματική διαπερατότητα. Οι αναλυτικές εκφράσεις που χρησιμοποιήθηκαν από την βιβλιογραφία για την αποτελεσματική διαπερατότητα είναι του Calmidi^[13], του Hooman και Dukhan^[14], καθώς και του Depois και Mortensen^[15], ενώ για την ειδική επιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν οι αναλυτικές εκφράσεις των Calmidi^[13] και DuPlessis^[16].

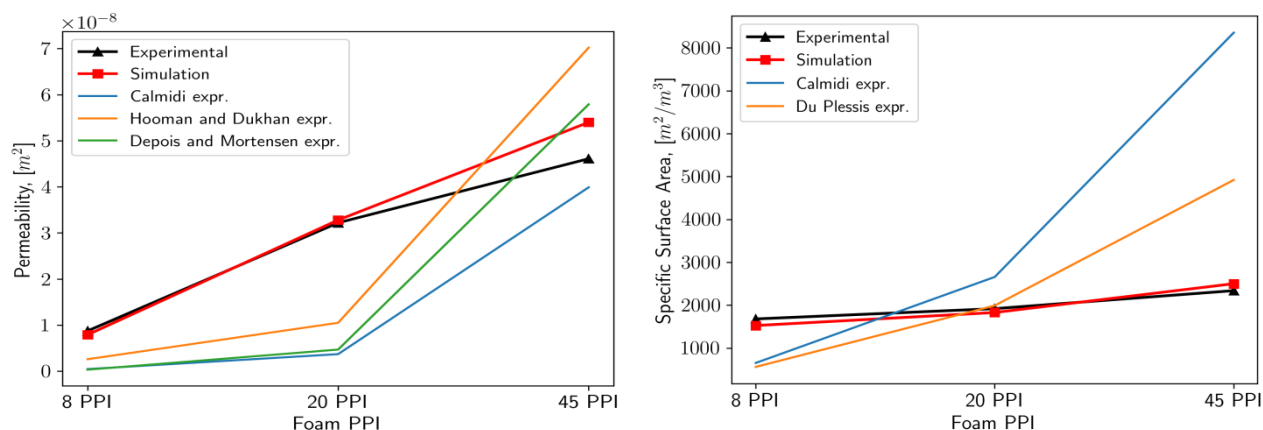
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου ανακατασκευής γίνεται με σύγκριση πειραματικών δεδομένων που έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία^[17]. Η σύγκριση του πειραματικά προσδιορισμένου πορώδους του αντίστοιχου αφρού και του υπολογιζόμενου πορώδους του ανακατασκευασμένου αφρού παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Είναι προφανές ότι οι υπολογιζόμενες τιμές για το πορώδες είναι σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το πειραματικά υπολογισμένο πορώδες, καθώς και η χαρακτηριστική ακτίνα πόρου που βρέθηκε στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αποτελεσματικής διαπερατότητας και της ειδικής επιφάνειας.



Σχήμα 1. Σύγκριση ανάμεσα στο πορώδες της ανακατασκευής και στο πειραματικά προσδιορισμένο πορώδες ^[17], για τρεις κεραμικούς αφρούς μεταβλητών PPI.

Η σύγκριση της αποτελεσματικής διαπερατότητας που προκύπτει από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στις ανακατασκευές με τις διαθέσιμες αναλυτικές εκφράσεις από τη βιβλιογραφία (Σχήμα 2), αποκαλύπτει ότι η προτεινόμενη μέθοδος ανακατασκευής παρέχει σημαντική βελτίωση ακρίβειας σε σχέση με προηγούμενες προσπάθειες. Οι περισσότερες σχετικές εκφράσεις αποτελεσματικής διαπερατότητας που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία αποτυγχάνουν σε μεγάλο βαθμό να προβλέψουν την αποτελεσματική διαπερατότητα με επαρκή ακρίβεια, δείχνοντας απόκλιση σε εύρος τάξης μεγέθους από τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2. Αριστερά: Σύγκριση ανάμεσα στη διαπερατότητα της ανακατασκευής, σε πειραματικά προσδιορισμένη τιμή της ^[17], και σε τρεις αναλυτικές προσεγγίσεις της ^[13-15], για τους τρεις διαφορετικούς κεραμικούς αφρούς. Δεξιά: Σύγκριση ανάμεσα στη ειδική επιφάνεια της ανακατασκευής, στη πειραματική τιμή της ^[17], και σε δύο αναλυτικές προσεγγίσεις της ^[13,16], για τρεις κεραμικούς αφρούς μεταβλητών PPI.

Εκτός από το πορώδες και τους αποτελεσματικούς συντελεστές μεταφοράς που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη, ο λόγος επιφάνειας προς όγκο ήταν επίσης αντικείμενο ενδιαφέροντος. Αυτή η μέτρηση αποκτάται με τον υπολογισμό της συνολικής επιφάνειας της διεπιφάνειας του όγκου ελέγχου, διαιρούμενο με τον όγκο του δείγματος ελέγχου της ανακατασκευής. Είναι προφανές ότι οι τιμές που λαμβάνονται από τα πειραματικά δεδομένα αποκλίνουν έντονα από τις τιμές που λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία. Ωστόσο, οι τιμές που λαμβάνονται από τη διαδικασία ανακατασκευής είναι σε ιδιαίτερα καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή προσφέρει μια μεθοδολογία για τη βελτίωση της περιγραφής της δομής και της μεταφοράς σε αφρώδη πορώδη μέσα. Αρχικά έγινε μια στατιστική ανάλυση των εικόνων SEM των αφρών, τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν από μια μεθοδολογία στοχαστικής ανακατασκευής προσφέροντας ακριβείς αναπαραστάσεις των αφρών. Η διαδικασία ανακατασκευής περιλάμβανε κατάτμηση Laguerre που εκτελείται σε διατάξεις σφαιρών, καθώς επίσης και έναν αλγόριθμο τοποθέτησης κλάδων, σε συμφωνία με δεδομένα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Η μέθοδος επικυρώθηκε έναντι τριών κεραμικών αφρών με διαφορετικές πυκνότητες PPI. Οι δομές που λήφθηκαν από τη διαδικασία ανακατασκευής αξιολογήθηκαν από την άποψη της ειδικής επιφάνειάς τους και της αποτελεσματικής διαπερατότητας. Τα αποτελέσματα είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, σε αντίθεση με τις προβλέψεις κλασικών εκφράσεων από τη βιβλιογραφία. Η μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτυχή συστηματική ανακατασκευή αφρωδών πορωδών υλικών και να προβλεφθούν ιδιότητες δομής και μεταφοράς με πολύ καλή προσέγγιση σε αυτές των πραγματικών δειγμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υποστηρίχθηκε οικονομικά από το ίδρυμα Σταύρος Νιάρχος στα πλαίσια του προγράμματος ARCHERS ("Advancing Young Researchers' Human Capital in Cutting Edge Technologies in the Preservation of Cultural Heritage and the Tackling of Societal Challenges").



ΙΔΡΥΜΑ ΣΤΑΥΡΟΣ ΝΙΑΡΧΟΣ
STAVROS NIARCHOS
FOUNDATION

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Sharmiwati, R. Mizan, A. Noorhelinahani, *Int. J. Sci. Technol. Res.* 3(6) (2014).
- [2] V.R. Salvini, M. Innocentini, V.-C. Pandolfelli. *Cerâmica* 48 (2002) 121-125.
- [3] M. Innocentini, V. Salvini, A. Macedo, V.-C. Pandolfelli. *Mat. Res.* 2 (1999) 283-289.
- [4] X. Yang, T. Lu, T. Kim. *Phys. Lett. A* 378 (2014) 2308-2311.
- [5] J. Liu, W.-T. Wu, W.-C. Chiu., W.-H. Hsieh. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 30 (2006) 329-336.
- [6] N. Dukhan. *Exp. Fluids.* 41 (2006) 665-672.
- [7] K. Boomsma, D. Poulikakos, F. Zwick. *Mech. Mater.* 35 (2003) 1161-1176.
- [8] V. Baranau, U. Tallarek. *Soft Matter* 10 (2014) 3826-3841.
- [9] V. Baranau, D. Hlushkou, S. Khirevich, U. Tallarek. *Soft Matter* 9 (2013) 3361-3372.
- [10] W.Y.Jang, A.M. Kraynik, S. Kyriakides. *Int. J. Solids Struct.* 45 (2008) 1845-1875.
- [11] S. Kanaun, O. Tkachenko. *Int J Eng Sci.* 46 (2008) 551-571.
- [12] M. Bracconi, M. Ambrosetti, M. Maestri, G. Groppi, E. Tronconi. *Chem. Eng. J.* 315 (2017) 608-620.
- [13] V.-V. Calmidi, University of Colorado: Boulder, Colorado, 1998.
- [14] K. Hooman, N. Dukhan. *Transp. Porous Media* 100 (2013) 393-406.
- [15] J.-F. Despois, A. Mortensen. *Acta Materialia* 53 (2005) 1381-1388.
- [16] J. Du Plessi. *Heat Mass Transfer Porous Media* (1992) 249-262.
- [17] E.-A. Moreira, M.-D.-M. Innocentini, J.-R. Coury. *J. Eur. Ceram. Soc.* 24 (2004) 3209-3218.