



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Καθαρισμός του νερού από τη καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου σε  
διεπιφάνεια στερεού-υγρού, υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μέσα  
σε τυρβώδη ροή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βοσκάκης Ιωάννης**

**Επίβλεψη:** Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
& ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Καθαρισμός του νερού από τη καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου σε  
διεπιφάνεια στερεού-υγρού, υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου μέσα  
σε τυρβώδη ροή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βοσκάκης Ιωάννης**

**Επίβλεψη:** Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28<sup>η</sup> Ιουνίου 2022

---

Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

---

Ιωάννης Γκόνοσ  
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

---

Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ



---

Βοσκάκης Ιωάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βοσκάκης Ιωάννης, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022, υπό την επίβλεψη του κ. Ευάγγελου Χριστοφόρου, καθηγητή του Ε.Μ.Π., της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και πρωτότυπο θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου από το εργαστήριο, οι οποίοι με τις συμβουλές και την εμπειρία τους βοήθησαν στα διάφορα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, η οποία στάθηκε για μένα στήριγμα καθ' όλα τα χρόνια των σπουδών μου και συνέβαλε τα μέγιστα στην υλοποίηση των στόχων μου.





## Περίληψη

Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σχετικά υψηλής έντασης (~0.4T) στη ροή του νερού, ευνοεί τη κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου με τη μορφή του αραγωνίτη έναντι του ασβεστίτη, στα τοιχώματα του σωλήνα. Χωρίς τη παρουσία του πεδίου, ο σχηματισμός του ασβεστίτη συμβαίνει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από το σχηματισμό του αραγωνίτη και σε συνηθισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ο ασβεστίτης είναι η κυρίαρχη κρυσταλλική μορφή με την οποία συντελείται η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου στην διεπιφάνεια στερεού-υγρού. Οι δυνάμεις συνάφειας του αραγωνίτη με το υλικό του τοιχώματος είναι ασθενείς, με αποτέλεσμα οι μικρο-δομές του ανθρακικού ασβεστίου να συμπαρασύρονται από τη ροή του νερού. Προϋπόθεση για την εμφάνιση του φαινομένου είναι η παρουσία τυρβώδους ροής, μέσω της οποίας μπορούν να ενισχυθούν οι αυθόρμητα εμφανιζόμενες μαγνητικές διακυμάνσεις, που αναπτύσσονται εντός της ροής του νερού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι κατάλληλες θερμοδυναμικές συνθήκες για το σχηματισμό του αραγωνίτη.

Με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, υπάρχουν ενδείξεις, ότι συντελείται αποδόμηση των σχηματισμών του ασβεστίτη που βρίσκονται σε επαφή με τη ροή, φαινόμενο στο οποίο επικεντρώνεται και η έρευνα της παρούσας εργασίας. Στις επιφάνειες όπου οι δομές του ανθρακικού ασβεστίου βρίσκονται σε επαφή με το νερό, έχει παρατηρηθεί αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, η οποία δύναται να προκαλέσει το θρυμματισμό της κρυσταλλικής δομής και τη σταδιακή αποδόμηση των καταλατώσεων. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε νερό βρύσης, σχετικά μεγάλης σκληρότητας, το οποίο ανακυκλώνονταν σε κλειστό υδραυλικό δίκτυο. Οι δοκιμές έγιναν σε μικρού μεγέθους δοκίμια που τοποθετήθηκαν εντός της ροής του νερού. Παρατηρήθηκε αρχικά ότι η επιβολή μαγνητικού πεδίου εμποδίζει την εναπόθεση του  $\text{CaCO}_3$ , ενώ επόμενη δοκιμή έδειξε μείωση του βάρους των επικαθίσεων. Απαιτείται ωστόσο περαιτέρω έρευνα για τη παροχή ισχυρότερων ενδείξεων, σχετικά με την εμφάνιση του φαινομένου της αλλαγής φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη.

**Λέξεις κλειδιά:** Ανθρακικό ασβέστιο, νερό, ασβεστίτης, αραγωνίτης, καθαρισμός του νερού με μαγνητικό πεδίο, μετατροπή κρυσταλλικής δομής, διεπιφάνεια στερεού-υγρού, τυρβώδης ροή, μαγνητική επεξεργασία νερού.



## **Abstract**

The application of an external magnetic field of relatively high intensity ( $\sim 0.4\text{T}$ ) to the water flow, favors the precipitation of calcium carbonate in the form of aragonite versus calcite, on the walls of the tube. Without the presence of the field, the formation of calcite occurs at a lower energy level than the formation of aragonite, and in normal conditions of pressure and temperature, calcite is the predominant crystalline form with which the precipitation of calcium carbonate on the solid-liquid interface occurs. The forces of affinity with the wall material are weak, as a result of which the micro-structures of calcium carbonate are carried away by the flow of water. A prerequisite for the appearance of the phenomenon is the presence of turbulent flow, through which the spontaneously occurring magnetic fluctuations that develop within the water flow can be enhanced, resulting in the creation of appropriate thermodynamic conditions for the formation of aragonite.

With the application of the magnetic field, there are indications that there is a degradation of the calcite formations that are in contact with the flow, a phenomenon on which the research of the present work is also focused. On surfaces where calcium carbonate structures are in contact with water, a phase change has been observed from calcite to aragonite, which may cause the fragmentation of the crystalline structure and the gradual degradation of desalination. For the experiments, tap water, of relatively high hardness, was used, which was recycled in a closed hydraulic network. The tests were conducted on small test pieces placed within the water flow. It was initially observed that the imposition of a magnetic field prevents the deposition of  $\text{CaCO}_3$ , while a subsequent test showed a reduction in the weight of deposits. However, further research is needed to provide stronger evidence of the phenomenon of phase change from calcite to aragonite.

**Key words:** Calcium carbonate, water, calcite, aragonite, descaling of water with a magnetic field, transition/polymorphic transformation of crystalline structure, solid-liquid interface, turbulent flow, magnetic water treatment.



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	vii
Περίληψη.....	ix
Abstract.....	xi
Περιεχόμενα.....	xiii
Εισαγωγή.....	xv
Θεωρητικό Μέρος.....	1
Κεφάλαιο 1: Μαγνητισμός.....	1
1.1. Οι εξισώσεις του Maxwell.....	2
1.2. Μαγνητοστατικά πεδία.....	7
1.3. Μαγνητισμός στην ύλη.....	8
Κεφάλαιο 2: Δομή και ιδιότητες του νερού.....	14
2.1. Το μόριο του νερού.....	15
2.2. Δομή και ιδιότητες του νερού στην υγρή φάση.....	17
2.3. Μαγνήτιση του νερού.....	19
Κεφάλαιο 3: Στοιχεία υδροδυναμικής.....	22
3.1. Υδροδυναμική.....	22
3.2. Εξισώσεις Navier-Stokes.....	25
3.3. Τυρβώδης ροή.....	26
Κεφάλαιο 4: Φαινόμενο.....	32
4.1. Εισαγωγικές έννοιες.....	32
4.2. Καταβύθιση του $\text{CaCO}_3$ εντός της ροής του νερού, παρουσία του μαγνητικού πεδίου 36	
4.3. Το φαινόμενο της αλλαγής φάσης του $\text{CaCO}_3$ στα οριακά στρώματα της ροής λόγω της επιβολής μαγνητικού πεδίου.....	41
Πειραματικό Μέρος.....	52
Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός του πειράματος.....	52
5.1. Σχεδιασμός της διάταξης.....	52
5.2. Πειραματική διάταξη.....	55
5.3. Παράμετροι του πειράματος.....	59
5.4. Αναμενόμενα αποτελέσματα.....	63
Κεφάλαιο 6: Πείραμα.....	64
6.1. Αρχικές προσπάθειες.....	64
6.2. Πιο συστηματική πειραματική διαδικασία.....	65
6.3. Συμπεράσματα.....	70
6.4. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες.....	72
Πηγές.....	75



## Εισαγωγή

Το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) σχηματίζεται όταν ιόντα ασβεστίου, διαλυμένα στο νερό, αντιδρούν με ανθρακικά ιόντα και δημιουργούν άλας, το οποίο λαμβάνει μία από τις τρεις διαφορετικές κρυσταλλικές μορφές. Σε κανονικές συνθήκες, ο ασβεστίτης είναι η πιο σταθερή μορφή, με ρομβοεδρική-εξαγωνική συμμετρία και αποτελεί το πιο συχνό τρόπο κρυστάλλωσης του  $\text{CaCO}_3$  στη φύση. Ο αραγωνίτης έχει χαμηλότερη συμμετρία με ορθορομβική κρυσταλλική δομή και δεν προσκολλάται στις επιφάνειες των σωληνώσεων με ισχυρούς χημικούς δεσμούς όπως ο ασβεστίτης, με αποτέλεσμα να παρασύρεται από τη ροή του νερού. Ο βατερίτης είναι η λιγότερο ευσταθής μορφή και σταδιακά μετατρέπεται σε ασβεστίτη ή αραγωνίτη.

Το νερό όπως απαντάται στη φύση, στη πλειοψηφία των περιπτώσεων, περιέχει ένα μεγάλο αριθμό από διαλυμένες ουσίες σε μορφή ιόντων, μία από τις οποίες είναι και το ασβέστιο. Το τρεχούμενο νερό εναποθέτει σταδιακά άλατα ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) στις επιφάνειες από τις οποίες διέρχεται και στη περίπτωση πολλών βιομηχανικών εφαρμογών υποβαθμίζει τα υδραυλικά συστήματα καθώς προκαλεί στένωση των σωληνώσεων και διάβρωση των μεταλλικών διεπαφών. Το κόστος επισκευής και συντήρησής των υδραυλικών συστημάτων καθιστά απαραίτητη τη χρήση χημικών μεθόδων για την αντιμετώπιση του φαινομένου της καθαλάτωσης, με δυσμενείς επιπτώσεις για το περιβάλλον.

Η επεξεργασία του νερού με μαγνητικό πεδίο είναι μια εναλλακτική τεχνική καθαρισμού του νερού, η οποία έχει δοκιμαστεί και στο παρελθόν, με διφορούμενα πολλές φορές αποτελέσματα και συμπεράσματα μεταξύ των ερευνών. Η θεωρητική υλοποίησή της προσφέρει λύσεις τόσο από θέμα κόστους, στην εφαρμογή και συντήρηση των διατάξεων, όσο και από θέμα περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συγκριτικά με τις συμβατικές χημικές διεργασίες οι οποίες μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα.

Έτσι, ήδη από τις προηγούμενες δεκαετίες, έχουν κατασκευαστεί εμπορικές εφαρμογές με βάση τη τεχνική αυτή, χωρίς, ωστόσο, να επιτευχθούν σημαντικά βήματα για τη καθιέρωσή της. Ο τρόπος επίδρασης, εξάλλου, του μαγνητικού πεδίου στις ιδιότητες του νερού και στη διαδικασία καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου, δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητός.

Σκοπός των ερευνών πάνω στο συγκεκριμένο θέμα είναι η παροχή ικανών ενδείξεων, ότι η επιβολή του μαγνητικού πεδίου αλληλεπιδρά με το τρεχούμενο νερό, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται παρεμπόδιση της διαδικασίας σχηματισμού του ασβεστίτη στα

τοιχώματα αγωγών ή και αποκόλληση των ήδη υπάρχουσών δομών μέσω της αλλαγής φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη.

Στη παρούσα εργασία, θα γίνει προσπάθεια να περιγραφούν τα φαινόμενα που προέκυψαν κατά τη πειραματική διαδικασία, με βάση τις αρχές του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού, όπως αυτός διατυπώθηκε από τον James Maxwell και της υδροδυναμικής, η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes.

Στόχος της εργασίας είναι η πειραματική αναπαραγωγή του φαινομένου<sup>1</sup> και όχι η θεμελίωση των αρχών οι οποίες διέπουν το φαινόμενο στη μικροσκοπική κλίμακα. Εξάλλου οι συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος, δεν είναι οι ιδανικές<sup>2</sup> ώστε να καθοριστεί με ακρίβεια η ποσοτική συνεισφορά των μεταβλητών του φαινομένου (ένταση του πεδίου, ταχύτητα ροής, θερμοκρασία, συγκέντρωση ιόντων, ...) στις τιμές των μετρήσεων. Έτσι, το θεωρητικό υπόβαθρο στηρίζεται περισσότερο σε μακροσκοπικά μοντέλα, όσον αφορά το τρόπο αναπαράστασης της ροής και του μαγνητικού πεδίου και αποσκοπεί στην παροχή ικανοποιητικών ενδείξεων για την ύπαρξη του φαινομένου που εξετάζεται.

---

<sup>1</sup> Η αποκόλληση των δομών του  $\text{CaCO}_3$  από τη διεπιφάνεια νερού και στερεού, μέσω της μετατροπής τους από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, χάρη στη συνέργεια του μαγνητικού πεδίου και της διερχόμενης τυρβώδους ροής.

<sup>2</sup> Αβεβαιότητες ως προς την ακρίβεια των μετρούμενων τιμών για το μαγνητικό πεδίο, τη ροή του νερού, τις συγκεντρώσεις των ιόντων στο νερό (νερό βρύσης), ενώ δεν έγινε προσπάθεια σταθεροποίησης της θερμοκρασίας του νερού η οποία κυμαινόταν από 20 έως 50 βαθμούς.



# Θεωρητικό Μέρος

## Κεφάλαιο 1: Μαγνητισμός

Ο όρος μαγνητισμός αναφέρεται σε ένα σύνολο φυσικών φαινομένων τα οποία προκαλούνται από τα μαγνητικά πεδία στο χώρο. Ο μαγνητισμός είναι μία από τις δύο όψεις του ενιαίου φαινομένου του ηλεκτρομαγνητισμού, που απορρέει από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων. Όπως ορίζει η ειδική σχετικότητα, ένα φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί καλύτερα ως ηλεκτρικό ή ως μαγνητικό, ανάλογα με το σύστημα αναφοράς που ορίζεται. Ο τρόπος, δηλαδή, με τον οποίο ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο εμφανίζεται, εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του παρατηρητή ως προς τη τροχιά των φορτισμένων σωματιδίων που συμμετέχουν στο φαινόμενο. Σύμφωνα με τη σύγχρονη θεωρία, οι πηγές του μαγνητισμού είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και η μαγνητική ροπή των θεμελιωδών σωματιδίων. Αυτό σημαίνει, ότι ο μαγνητισμός είναι ένα εγγενές φαινόμενο της ύλης, αφού η ύλη απαρτίζεται σε μεγάλο βαθμό από πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα σωματίδια αυτά μέσω των αλληλεπιδράσεών τους, ευθύνονται για τη πλειοψηφία των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στη φύση και κατά συνέπεια για την οργάνωση της συνηθισμένης ύλης που συναντιέται στο περιβάλλον.

Μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία, που σχετίζεται τόσο με τη μαθηματική όσο και τη φυσική τους περιγραφή, έγκειται στην έννοια του φορτίου. Για τον ηλεκτρισμό, το φορτίο ορίζεται ως ιδιότητα ορισμένων σωματιδίων της ύλης και είναι ένα μετρήσιμο φυσικό μέγεθος. Αντίθετα, για το μαγνητισμό, η έννοια του μαγνητικού φορτίου δε σχετίζεται με κάποια παρατηρήσιμη φυσική οντότητα και μπορεί να οριστεί μόνο μαθηματικά, για την απλοποίηση των υπολογισμών. Ένα χρήσιμο μέγεθος για τη περιγραφή της μαγνητικής συμπεριφοράς των μαγνητών ή άλλων αντικειμένων που παράγουν μαγνητικό πεδίο γύρω τους, είναι η μαγνητική ροπή. Η βασική συνιστώσα της μαγνητικής ροπής, η οποία συνήθως επαρκεί για μια καλή προσέγγιση του πεδίου των μαγνητών, είναι η μαγνητική διπολική ροπή. Αυτό το είδος μαγνητικής ροπής προέρχεται, όπως δηλώνει και η ονομασία του, από το μαγνητικό δίπολο το οποίο μπορεί να περιγραφεί σαν ένα ζεύγος δύο αντίθετων

μαγνητικών πόλων, όταν η απόσταση μεταξύ του βόρειου και του νότιου πόλου του ζεύγους τείνει στο μηδέν ενώ η μαγνητική του ροπή διατηρείται σταθερή.

Όσον αφορά τη μελέτη του φαινομένου που εξετάζεται, δηλαδή, η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου, γίνεται προσπάθεια ούτως ώστε η ανάλυση που θα ακολουθήσει να κινείται στα πλαίσια του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού. Στη πραγματικότητα, τόσο το φαινόμενο της κρυστάλλωσης, όσο και εκείνο της αλλαγής φάσης, που στην ουσία απασχολούν την έρευνα, περιγράφονται κατά κύριο λόγο στην ατομική κλίμακα όπου εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις κβαντικού τύπου. Παρόλα' αυτά, τα αποτελέσματα της θεωρίας του Maxwell συνεχίζουν να δίνουν χρήσιμα συμπεράσματα για την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση που συμβαίνει μεταξύ της ροής και του μαγνητικού πεδίου και μπορούν να οδηγήσουν σε μια ποιοτική ανάλυση του φαινομένου.

### 1.1. Οι εξισώσεις του Maxwell

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f \quad \text{ο νόμος του Gauss για τον ηλεκτρισμό} \quad (1-1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό} \quad (1-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad \text{ο νόμος του Faraday για την επαγωγή} \quad (1-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}_f \quad \text{ο κυκλωματικός νόμος του Ampère} \quad (1-4)$$

(με τη προσθήκη του Maxwell)

όπου  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ , το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$ , τα μακροσκοπικά πεδία της ηλεκτρικής μετατόπισης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου και  $\rho_f$ ,  $\mathbf{J}_f$ , οι κατανομές πυκνότητας των "ελεύθερων" φορτίων και ρευμάτων στο χώρο.

Οι παραπάνω σχέσεις είναι μακροσκοπικές και απορρέουν από τις εξισώσεις του Maxwell για τη μικροσκοπική κλίμακα, όπου οι σχέσεις (1-1) και (1-4) ισχύουν με τη μορφή:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\eta}{\epsilon_0} \quad \text{και} \quad \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{j}$$

όπου  $\eta$ ,  $j$  είναι οι πυκνότητες φορτίων και ρευμάτων στη μικροσκοπική κλίμακα για την οποία όμως θεωρούνται οι πυρήνες των ατόμων και τα ηλεκτρόνια ως σημειακές πηγές,  $\epsilon_0$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Οι εξισώσεις του Maxwell υποθέτουν ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό, ορίζεται ως παγκόσμια σταθερά ίση με  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ , ανεξαρτήτως της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Επιπλέον, για την ανάλυση της κίνησης ενός φορτισμένου σωματιδίου στα πλαίσια της κλασικής μηχανικής, είναι απαραίτητη η εξίσωση του Lorentz:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1-5)$$

η οποία δίνει τη δύναμη που ασκείται σε ένα σημειακό φορτίο  $q$ , όταν αυτό βρίσκεται υπό την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, δεδομένου ότι η ταχύτητά του  $v$  είναι μικρή σε σχέση με τη ταχύτητα του φωτός.

Το ηλεκτρικό πεδίο  $\mathbf{E}$  και το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  (ή μαγνητική επαγωγή), είναι διανυσματικά μεγέθη, τα οποία ορίζουν μονοσήμαντα τη δύναμη που δέχεται ένα σημειακό φορτίο, λόγω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Επιπλέον, τα πεδία  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ , ορίζονται και είναι ικανά να μεταφέρουν ορμή, στροφορμή και ενέργεια, ακόμη και σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν πηγές, δηλαδή, φορτία  $\rho$  και ρεύματα  $\mathbf{J}$ . Σαν έννοια, μπορούν να θεωρηθούν ως το κλασικό όριο της κβαντομηχανικής για τον ηλεκτρομαγνητισμό, όταν ο αριθμός των φωτονίων που εμπλέκονται στα φαινόμενα είναι αρκετά μεγάλος, ενώ η ενέργεια του ενός φωτονίου είναι αρκετά μικρή [1].

Τα πεδία  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$ , της ηλεκτρικής μετατόπισης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου, είναι βοηθητικά πεδία για τη μακροσκοπική κλίμακα και χρησιμεύουν στη περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στο εσωτερικό της ύλης. Συνδέονται με τα πεδία  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  συνήθως μέσω πολύπλοκων εξισώσεων, μιας και αναλόγως της εφαρμογής (είδος της ύλης, ένταση των πεδίων), μπορεί να παρουσιάσουν μη γραμμική συμπεριφορά ή και εξάρτηση από προηγούμενες χρονικές στιγμές [1].

Οι εξισώσεις αυτές, λέγονται συντακτικές σχέσεις και παρουσιάζονται παρακάτω με συνοπτικό τρόπο:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}[\mathbf{E}, \mathbf{B}] \quad \text{και} \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}[\mathbf{E}, \mathbf{B}]$$

Οι πηγές του ηλεκτρομαγνητισμού σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, είναι τα “ελεύθερα” φορτία και ρεύματα τα οποία αποκαλούνται έτσι στη μακροσκοπική κλίμακα, για να διαχωριστούν από τα δέσμια φορτία λόγω της πόλωσης  $\mathbf{P}$  των υλικών και από τα δέσμια ρεύματα που δημιουργούνται από μεταβολές στη πόλωση ή λόγω μαγνήτισης ( $\mathbf{M}$ ) στο εσωτερικό των υλικών.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, αν πρέπει να δοθεί μια περιγραφή της ύλης όπως γίνεται αντιληπτή πειραματικά τουλάχιστον, υπάρχει μια περιοχή του χώρου ουσιαστικά κενή, με ένα πολύ μικρό συνολικά τμήμα του όγκου της να καταλαμβάνεται από άτομα και μόρια. Υπό την επίδραση των ηλεκτρικών πεδίων τα άτομα και τα μόρια πολώνονται και μετατρέπονται σε στοιχειώδη δίπολα, ενώ η παρουσία μαγνητικών πεδίων προκαλεί σε αυτά την εμφάνιση στοιχειωδών μαγνητικών ροπών, η φορά και η ένταση των οποίων εξαρτάται από το είδος των ατόμων και των μορίων. Τα μικροσκοπικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που εμφανίζονται στην ατομική κλίμακα, λόγω των στοιχειωδών αυτών δίπολων και μαγνητικών ροπών, είναι υπεύθυνα για τη μεγάλη πλειονότητα των φαινομένων που παρατηρούνται καθημερινά στη φύση. Ο υπολογισμός όμως των πεδίων αυτών, με χρήση των σχέσεων του Maxwell για το κενό, είναι τρομερά πολύπλοκος όταν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που παρατηρούνται, λαμβάνουν χώρα σε αποστάσεις μεγαλύτερες κατά λίγες τάξεις μεγέθους από εκείνες των ατομικών μεγεθών.

Ευτυχώς, στις περισσότερες των περιπτώσεων, ο υπολογισμός των πεδίων που δημιουργούνται ανάμεσα στα άτομα και τα μόρια δεν είναι απαραίτητος, οπότε γίνεται χρήση των χωρικών μέσων όρων για τα μικροσκοπικά αυτά πεδία, καθώς και για όλα τα υπόλοιπα μεγέθη που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς [2].

Είναι πλέον επόμενο, πως για την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στο εσωτερικό των υλικών, χρειάζεται εκτός από τις εξισώσεις του Maxwell και τις συντακτικές εξισώσεις που προαναφέρθηκαν, μέσω των οποίων ορίζονται τα μακροσκοπικά πεδία  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1-6)$$

$$\mathbf{H} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right) \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (1-7)$$

όπου  $\mathbf{P}$  είναι η πόλωση και  $\mathbf{M}$  η μαγνήτιση, μεγέθη τα οποία εξαρτώνται από τη φύση της ύλης, στο εσωτερικό της οποίας υπολογίζονται τα πεδία. Η πόλωση  $\mathbf{P}$  έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται τα άτομα και τα μόρια που απαρτίζουν τα διάφορα υλικά, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ως δίπολα, είτε υπό την επίδραση εξωτερικά επιβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων, είτε λόγω κάποιας επεξεργασίας με μόνιμη επίδραση στη δομή τους. Σε αντιστοιχία, η μαγνήτιση  $\mathbf{M}$  αναφέρεται στη διάταξη και στο τρόπο διέγερσης των στοιχειωδών μαγνητικών ροπών στο εσωτερικό των υλικών, είτε λόγω της φύσης του υλικού, είτε λόγω της επιβολής ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Οι μαγνητικές ροπές των ατόμων και των μορίων, προκύπτουν ως συνδυασμός τριών παραγόντων, οι οποίοι αναφορικά είναι: η περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από το πυρήνα, το spin των ηλεκτρονίων και το spin του πυρήνα.

Υπάρχουν για παράδειγμα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν μόνιμη πόλωση ή μαγνήτιση, ανεξάρτητη των εξωτερικά επιβαλλόμενων πεδίων. Γενικά, στις περισσότερες χημικές ενώσεις, η πόλωση ή η μαγνήτιση παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από τα εξωτερικά ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία, χωρίς ωστόσο η εξάρτηση αυτή να είναι απαραίτητα μια απλή γραμμική σχέση. Συνήθως, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε ομογενή υλικά, για τα οποία η μακροσκοπική ανάλυση είναι ικανή να δώσει χρήσιμες πληροφορίες και εξισώσεις, όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται στα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

### **Συνοριακές συνθήκες**

Οι εξισώσεις του Maxwell, στη μορφή που έχουν γραφτεί, εκφράζουν διαφορικές σχέσεις οι οποίες εφαρμόζονται τοπικά σε κάθε σημείο του χώρου και του χρόνου. Μέσω του θεωρήματος της απόκλισης και του θεωρήματος του Stokes, είναι δυνατόν να μετατραπούν σε ολοκληρωτικές σχέσεις, οι οποίες αποδεικνύονται πολύ χρήσιμες όταν υπάρχουν γεωμετρίες του χώρου που παρουσιάζουν κάποιου είδους συμμετρία, καθώς και για την εύρεση των πεδίων στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ δύο υλικών.

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) = \mathbf{K}$$

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) \times \mathbf{n} = 0$$

$$(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{n} = \sigma \quad \text{και} \quad (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{n} = 0$$

για την πόλωση και την μαγνήτιση, ισχύει:

$$\sigma_p = -(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) \cdot \mathbf{n} \quad \text{και} \quad \sigma_m = \mathbf{n} \cdot \mathbf{M}$$

Καθώς, η ανάλυση που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια, βασίζεται στις αρχές του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού, κρίνεται χρήσιμη μια πιο διεξοδική παρουσίαση των εξισώσεων του Maxwell, σε μια προσπάθεια να αναδειχθεί η φυσική τους σημασία. Οι δυο πρώτες εξισώσεις, είναι οι νόμοι του Gauss για τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό και αφορούν την απόκλιση των πεδίων, ενώ οι δύο τελευταίες εξισώσεις είναι ο νόμος του Faraday και ο νόμος του Ampère και αναφέρονται στο στροβιλισμό του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Είναι επομένως πλήρεις, όπως προκύπτει από το θεώρημα Helmholtz, που ορίζει πως κάθε διανυσματικό πεδίο στο χώρο, του οποίου η ένταση φθίνει αρκετά γρήγορα μακριά από τις πηγές του, αναπαρίσταται με μοναδικό τρόπο ως συνιστώσα ενός αστρόβιλου κι ενός σωληνοειδούς πεδίου.

Ο νόμος του Gauss για τον ηλεκτρισμό, αναφέρει πως τα φορτία δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από τα θετικά φορτία και καταλήγουν στα αρνητικά. Κατ' αυτό το τρόπο, η ροή του ηλεκτρικού πεδίου που διέρχεται διαμέσου μιας κλειστής επιφάνειας, είναι ανάλογη της ποσότητας του συνολικού φορτίου που περικλείεται από αυτή την επιφάνεια.

Ο νόμος του Gauss για το μαγνητισμό, βασίζεται στην υπόθεση ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα, καθώς η ύπαρξη τους δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ πειραματικά και ορίζει πως το μαγνητικό πεδίο έχει μόνο συνιστώσα στροβιλισμού. Με διαφορετική περιγραφή, μπορεί να λεχθεί πως η μαγνητική ροή διαμέσου οποιασδήποτε κλειστής επιφάνειας είναι πάντοτε μηδενική και αντίστοιχα, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές διαγράφουν πάντοτε κλειστές καμπύλες.

Ο νόμος του Faraday, είναι μια σχέση ανάμεσα στο ηλεκτρικό πεδίο και σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Ορίζει, πως η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο χρόνο, δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο στροβιλίζεται γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Ο τελευταίος κατά σειρά είναι ο νόμος του Ampère, ο οποίος τροποποιήθηκε από τον Maxwell, ούτως ώστε η θεμελίωση του ηλεκτρομαγνητισμού να βρίσκεται σε συμφωνία με την αρχή διατήρησης του φορτίου. Με τη προσθήκη του Maxwell, ο νόμος ορίζει πως τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται είτε από ηλεκτρικά ρεύματα, είτε από χρονο-μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία και στροβιλίζονται γύρω από τις δυναμικές γραμμές των πεδίων-πηγών τους.

Όπως γίνεται φανερό, από τη παραπάνω περιγραφή των εξισώσεων του Maxwell, τα χρονο-μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούν γύρω τους μαγνητικά πεδία, ενώ τα χρονο-μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία δημιουργούν γύρω τους ηλεκτρικά πεδία. Η εν δυνάμει αλληλεπίδραση, κατά την οποία ένα παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα παλλόμενο μαγνητικό πεδίο και το αντίστροφο, καθιστά δυνατή τη εμφάνιση κυμάτων, τα οποία διαδίδονται στο χώρο δίχως την ανάγκη ύπαρξης κάποιου μέσου. Η θεωρία επομένως, ενοποιεί τις έννοιες του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού και εξηγεί με συνεκτικό τρόπο πως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι ικανά να μεταφέρουν ενέργεια και ορμή διαμέσου του κενού και μάλιστα με σταθερή ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός  $c$  στο κενό, ανεξαρτήτως της συχνότητάς τους.

## 1.2. Μαγνητοστατικά πεδία

Για έναν αγωγό που κινείται με ταχύτητα  $\mathbf{v}$  εντός μαγνητικού πεδίου, για τη πυκνότητα ρεύματος που τον διαρρέει, ισχύει:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}'$$

από το νόμο του Ohm, όπου  $\sigma$  η αγωγιμότητα του αγωγού και  $\mathbf{E}'$  το ηλεκτρικό πεδίο στο κινούμενο σύστημα συντεταγμένων.

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

όπου  $\mathbf{E}$  το ηλεκτρικό πεδίο για το σύστημα αναφοράς του σταθερού παρατηρητή. Οπότε το ρεύμα που δημιουργείται εντός του αγωγού:

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1-8)$$

Επιπλέον, από την εξίσωση του Maxwell (1-4) ισχύει:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H}$$

Οπότε,

$$\sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \nabla \times \mathbf{H} \Rightarrow \mathbf{E} = \frac{1}{\sigma}(\nabla \times \mathbf{H}) - \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Από την (1-3) και αν θεωρηθεί ότι εξετάζεται ομοιογενής αγωγός σταθερής αγωγιμότητας  $\sigma$  και μαγνητικής επιτρεπτότητας  $\mu$ , από τη παραπάνω εξίσωση συνάγεται:

$$\begin{aligned} \nabla \times \left( \frac{1}{\sigma}(\nabla \times \mathbf{H}) - \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) &= \nabla \times \mathbf{E} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{\sigma}(\nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H}) - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) &= \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1-9)$$

### 1.3. Μαγνητισμός στην ύλη

Μαγνητικά υλικά, γενικά, θεωρούνται εκείνα τα υλικά τα οποία είτε εμφανίζουν παραμένουσα μαγνήτιση, δηλαδή, συμπεριφέρονται ως μόνιμοι μαγνήτες, είτε παρουσία μαγνητικού πεδίου μαγνητίζονται έντονα και έλκονται προς τη κατεύθυνση του πεδίου. Η ονομασία αναφέρεται συνήθως στα σιδηρομαγνητικά και τα σιδηριμαγνητικά υλικά τα οποία εμφανίζουν έντονη μαγνητική συμπεριφορά.

Το φαινόμενο του μαγνητισμού παρουσιάζεται με διάφορες μορφές στην ύλη και η έκφασή του εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη δομή της, το τρόπο, δηλαδή, που διαρθρώνονται τα άτομα και τα μόρια του υλικού, παρουσία ή μη του μαγνητικού πεδίου.

Ένα χρήσιμο μέγεθος, που δείχνει κατά πόσο ένα υλικό μαγνητίζεται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα και αποτελεί ένα καλό κριτήριο για την ταξινόμηση των υλικών που δε παρουσιάζουν έντονη μαγνητική συμπεριφορά, σε παραμαγνητικά και διαμαγνητικά. Πρόκειται για μια αδιάστατη ποσότητα που συμβολίζεται ως  $\chi_m$  και είναι ο λόγος της μαγνήτισης  $\mathbf{M}$  ως προς την ένταση  $\mathbf{H}$  του επιβαλλόμενου πεδίου.

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad (1-10)$$



Αξίζει να αναφερθεί πως ορισμένα υλικά παρουσιάζουν ασυνήθιστες μαγνητικές ιδιότητες οι οποίες εκδηλώνονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ή λόγω της επιβολής ενός αρκετά ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Γενικά, η μαγνητική συμπεριφορά των υλικών ερμηνεύεται με ακρίβεια, μόνο με τη χρήση της κβαντομηχανικής. Εξάλλου, μία από τις πηγές του μαγνητισμού σε μικροσκοπικό επίπεδο, είναι το spin των θεμελιωδών σωματιδίων που αποτελεί μια καθαρά κβαντική ιδιότητα.

Σε αυτή την ενότητα, θα αναλυθούν οι κυριότερες μορφές μαγνητισμού στην ύλη, βάσει των οποίων μπορούν να καταταχθούν τα περισσότερα υλικά στις εξής κατηγορίες: Διαμαγνητικά, παραμαγνητικά, σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά.

### **Διαμαγνητισμός**

Ο διαμαγνητισμός προκαλεί μια μικρή αρνητική συνεισφορά στη μαγνητική διαπερατότητα των υλικών, το οποίο ισοδυναμεί με μια ασθενή απώθηση στη κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Ο διαμαγνητισμός μπορεί να περιγραφεί, μακροσκοπικά, ως υπέρθεση των μικροσκοπικών μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων ενός υλικού, είτε αυτά βρίσκονται σε σταθερές τροχιές γύρω από τους πυρήνες των ατόμων, είτε είναι ελεύθερα όπως συμβαίνει στα μέταλλα. Κατ' αυτή την έννοια, ο διαμαγνητισμός αποτελεί ιδιότητα όλων των υλικών, παρόλο που στη πράξη, πρόκειται για ένα πολύ ασθενές φαινόμενο, το οποίο συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη όταν άλλες μορφές μαγνητισμού συμμετέχουν στο προσδιορισμό της μαγνητικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Ο διαμαγνητισμός εμφανίζεται μόνο ως απόκριση σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και δεν έχει μόνιμη επίδραση στη μαγνήτιση ενός υλικού. Αντίθετα με τις άλλες μορφές μαγνητισμού που θα περιγραφούν, ο διαμαγνητισμός αντιτίθεται στην επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο ισοδυναμεί με τη τάση που έχουν τα διαμαγνητικά υλικά να εμποδίζουν τη διέλευση των μαγνητικών γραμμών από το εσωτερικό τους. Η μαγνητική επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι ελάχιστα μικρότερη της μονάδας με συνέπεια τα υλικά αυτά να απωθούνται ελαφρώς από τους μαγνητικούς πόλους. Στα διαμαγνητικά υλικά ανήκουν το νερό και το ανθρακικό

ασβέστιο, οι περισσότερες οργανικές χημικές ενώσεις και αρκετά μέταλλα όπως ο χαλκός και ο χρυσός.

### **Παραμαγνητισμός**

Ο παραμαγνητισμός είναι μια μορφή μαγνητισμού, μέσω της οποίας τα υλικά παρουσιάζουν μια ασθενή έλξη στη κατεύθυνση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Πηγές του παραμαγνητισμού, είναι οι διπολικές μαγνητικές ροπές λόγω του spin των ασύζευκτων ηλεκτρονίων στο εσωτερικό των υλικών. Ασύζευκτα ή μονήρη ηλεκτρόνια, λέγονται εκείνα τα ηλεκτρόνια, τα οποία δεν απαντώνται σε ζεύγη στα τροχιακά τα οποία καταλαμβάνουν. Επομένως κατά κανόνα, τα άτομα και κατ' επέκταση τα μόρια, που διαθέτουν τροχιακά με ασύζευκτα ηλεκτρόνια, εμφανίζουν μια μόνιμη μαγνητική ροπή με τυχαίο προσανατολισμό στο χώρο. Εξαιτίας της τυχαίας κατεύθυνσής τους, οι μικροσκοπικές αυτές μαγνητικές ροπές συνολικά αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα τα παραμαγνητικά υλικά να εμφανίζονται ως μη μαγνητικά. Επιπλέον, απουσία μαγνητικού πεδίου, τα παραμαγνητικά υλικά δε διατηρούν κάποια μόνιμη μαγνήτιση, όπως συμβαίνει με τα σιδηρομαγνητικά υλικά και ως εκ τούτου, η μαγνητική τους συμπεριφορά μπορεί εύκολα να μοντελοποιηθεί σαν μια γραμμική σχέση, με τη χρήση της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Συγκεκριμένα, η μαγνητική επιδεκτικότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας, με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να έλκονται ελαφρώς από τους μαγνητικούς πόλους. Τα παραμαγνητικά υλικά περιλαμβάνουν όλα σχεδόν τα καθαρά χημικά στοιχεία, καθώς και μερικές χημικές ενώσεις (πχ. FeO), οι οποίες αποτελούνται από μόρια με μη συζευγμένα ηλεκτρόνια.

### **Σιδηρομαγνητισμός**

Όπως και με το παραμαγνητισμό, ο σιδηρομαγνητισμός οφείλεται στην ύπαρξη ατομικών ηλεκτρονιακών τροχιακών, για τα οποία οι μαγνητικές ροπές λόγω του spin των ηλεκτρονίων τους, δεν εξουδετερώνονται. Η παραπάνω όμως θεώρηση αναφέρεται σε απλά ελεύθερα άτομα κι αυτό γιατί στη στερεά κατάσταση τα πράγματα περιπλέκονται, αφού καθένα από τα γειτονικά άτομα επιδρά ισχυρά στον προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των διπλανών του ατόμων. Η επίδραση των γειτονικών ατόμων ελαττώνει τη μαγνητική ροπή, σχετικά με τη τιμή που θα είχε σ' ένα

μόνο ελεύθερο άτομο, αλλά είναι τόσο ισχυρή, ώστε στα σιδηρομαγνητικά υλικά, να προσανατολίζει παράλληλα και ομόρροπα τις γειτονικές μαγνητικές ροπές.

Αυτός ο αυθόρμητος, χωρίς τη παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, παραλληλισμός των μαγνητικών ροπών, δεν οφείλεται απλά στη μαγνητική τους αλληλεπίδραση, αλλά σε συνδυασμό μαγνητικής και ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης. Προκαλείται από πολύ ισχυρές δυνάμεις, κβαντομηχανικής φύσης, μεταξύ γειτονικών μαγνητικών διπόλων, οι οποίες ονομάζονται δυνάμεις ανταλλαγής (exchange forces). Στη πραγματικότητα δεν πρόκειται για δυνάμεις με τη κλασική έννοια του όρου, αλλά για αλληλεπιδράσεις που σχετίζονται με το spin των ηλεκτρονίων. Οι δυνάμεις αυτές, δεν εμφανίζονται στα παραμαγνητικά υλικά και κατά συνέπεια, δεν εμφανίζεται ούτε αυθόρμητος παραλληλισμός των γειτονικών μαγνητικών ροπών. Είναι αυτές οι δυνάμεις που διαφοροποιούν τα παραμαγνητικά από τα σιδηρομαγνητικά υλικά, καθώς και από τα αντισιδηρομαγνητικά και σιδηρομαγνητικά υλικά. Για την ερμηνεία του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού, ο Pierre Weiss διατύπωσε την υπόθεση για την ύπαρξη ισχυρού τοπικού πεδίου στα σιδηρομαγνητικά υλικά, το οποίο τείνει να ευθυγραμμίσει τις ατομικές μαγνητικές ροπές.

Μια δεύτερη υπόθεση του Weiss αναφέρεται στο κατακερματισμό των σιδηρομαγνητικών υλικών σε πολλές μικρότερες μαγνητικές περιοχές, καθεμία από τις οποίες είναι αυθόρμητα μαγνητισμένη. Όλες οι ατομικές μαγνητικές ροπές σε κάθε μαγνητική περιοχή είναι παράλληλες μεταξύ τους, αλλά οι διευθύνσεις τους διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Σε αποστάσεις που περιέχουν πολλά άτομα (της τάξης των nm), όπου οι δυνάμεις ανταλλαγής εξασθενούν, υπερισχύει η τάση που έχουν τα μαγνητικά δίπολα να προσανατολίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις, προκειμένου να ελαττώσουν τη συνολική τους ενέργεια. Λόγω των τυχαίων προσανατολισμών των μαγνητικών ροπών στις διάφορες περιοχές, το υλικό εμφανίζεται μακροσκοπικά αμαγνήτιστο.

Η θεωρία του Weiss, η οποία στηρίχθηκε στις δύο παραπάνω υποθέσεις, επαληθεύτηκε αργότερα από τη κβαντομηχανική. Με τη χρήση της θεωρίας αυτής, μπορεί να ερμηνευτεί η ύπαρξη του χαρακτηριστικού βρόχου υστέρησης στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Ο βρόχος υστέρησης περιγράφει την ιδιότητα που έχουν τα υλικά αυτά, να διατηρούν μέρος της μαγνήτισής τους ακόμη και μετά τη παύση ενός εξωτερικού

μαγνητικού πεδίου. Γενικότερα, ο βρόχος υστέρησης δίνει τη σχέση μεταξύ των πεδίων  $B$ ,  $H$  στα σιδηρομαγνητικά υλικά, η οποία είναι έντονα μη γραμμική και εξαρτάται από την ένταση του επιβαλλόμενου πεδίου  $H$  σε προηγούμενες χρονικές στιγμές.

Ανάλογα με την ευκολία με την οποία μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται τα σιδηριμαγνητικά υλικά διακρίνονται σε “μαλακά” και σε “σκληρά”. Τα μαλακά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα, εμφανίζουν πολύ μεγάλες τιμές του  $B$  για μικρές τιμές του  $H$  και συνεπώς στενό μέγιστο βρόχο υστέρησης. Τα υλικά αυτά πρέπει να είναι καθαρά, με ελάχιστες προσμίξεις στη κρυσταλλική τους δομή, έτσι ώστε τα σύνορα μεταξύ των μαγνητικών περιοχών τους να μετακινούνται εύκολα. Τα σκληρά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, εμφανίζουν μεγάλες τιμές του  $B$  μόνο για μεγάλες τιμές του  $H$  και συνεπώς πλατύ μέγιστο βρόχο υστέρησης. Στα σκληρά υλικά η μετακίνηση των συνόρων μεταξύ των μαγνητικών τους περιοχών γίνεται δύσκολα. Τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μόνιμων μαγνητών, όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στη πειραματική διάταξη [2].

### **Αντισιδηρομαγνητισμός**

Αντισιδηρομαγνητισμός ονομάζεται το φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο οι ισχυρές δυνάμεις ανταλλαγής, οι οποίες εξασκούνται μεταξύ γειτονικών ατομικών μαγνητικών δίπολων (ατόμων ή μορίων), προσανατολίζουν παράλληλα και αντίρροπα τις μαγνητικές ροπές τους (spins), οι οποίες μάλιστα είναι ίσου μέτρου. Οι αντιπαράλληλες μαγνητικές ροπές εξουδετερώνονται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά να εμφανίζονται αμαγνήτιστα χωρίς τη παρουσία ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Όμως, ακόμη και η παρουσία ενός τέτοιου πεδίου προκαλεί μικρή συνολική καθαρή μαγνητική ροπή και επομένως μικρή μαγνήτιση του υλικού [2].

### **Σιδηριμαγνητισμός**

Ο σιδηριμαγνητισμός είναι φαινόμενο ανάλογο με τον αντισιδηρομαγνητισμό, με τη μόνη διαφορά ότι στη περίπτωση αυτή οι δύο ομάδες των αντιπαράλληλων ατομικών μαγνητικών ροπών, λόγω των spin, έχουν διαφορετικά μέτρα. Επομένως, προκύπτει μια συνισταμένη μαγνητική ροπή ίση με τη διαφορά των δύο ομάδων. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά εμφανίζονται μακροσκοπικά αμαγνήτιστα χωρίς την παρουσία ενός εξωτερικού

μαγνητικού πεδίου, διότι και σ' αυτά υπάρχουν μαγνητικές περιοχές, αυθόρμητα μαγνητισμένες, με τις διευθύνσεις των μαγνητικών τους ροπών τυχαία προσανατολισμένες στο χώρο. Γι' αυτό το λόγο, η μαγνητική τους συμπεριφορά είναι ανάλογη με αυτή των σιδηρομαγνητικών υλικών, καθώς εμφανίζουν βρόχους υστέρησης, αν και η τιμή της μέγιστης μαγνήτισης τους (μαγνητική επαγωγή κόρου), είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των σιδηρομαγνητικών υλικών [2].

## Κεφάλαιο 2: Δομή και ιδιότητες του νερού

Το νερό είναι η χημική ένωση με τη μεγαλύτερη αφθονία στην επιφάνεια της Γης και στοιχείο απαραίτητο για την επιβίωση κάθε γνωστής μορφής ζωής. Πρόκειται για τη μόνη ανόργανη ουσία η οποία απαντάται σε υγρή μορφή στη φύση, καθώς και για τη μοναδική χημική ένωση η οποία μπορεί να βρεθεί και στις τρεις συνηθισμένες καταστάσεις της ύλης, όντας σε συνθήκες περιβάλλοντος. Χάρη στις ξεχωριστές φυσικές και χημικές του ιδιότητες, το νερό, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του κύκλου ζωής στο πλανήτη, τόσο ως συστατικό των κυττάρων των ζωντανών οργανισμών, όσο και ως στοιχείο του περιβάλλοντος που τους φιλοξενεί.

Το νερό, στη καθαρή του μορφή και σε θερμοκρασία δωματίου, είναι ένα άοσμο, άχρωμο και διαφανές υγρό. Πρόκειται για την ανόργανη χημική ένωση, στην οποία αποδίδεται ο όρος "παγκόσμιος διαλύτης" χάρη στην ιδιότητα που έχει να λειτουργεί ως διαλυτικό μέσο για πολλές ιοντικές ενώσεις και ουσίες με πολικά μόρια, ενώ χρησιμεύει και ως διαλύτης στο εσωτερικό των κυττάρων των έμβιων οργανισμών. Αυτός είναι και ο λόγος που το νερό δεν απαντάται σχεδόν ποτέ με τη καθαρή του μορφή στη φύση, αλλά περιέχει συνήθως έναν μεγάλο αριθμό από διαλυμένα άλατα, καθώς και διάφορες άλλες οργανικές και ανόργανες ουσίες που σχετίζονται με τη προέλευσή του.

Η σημασία του νερού για την ύπαρξη της ζωής, είναι γνωστή στον άνθρωπο, ήδη από τα αρχαία χρόνια, γεγονός που εξηγεί την επίμονη προσπάθειά του να κατανοήσει τη φύση του πολύτιμου αυτού αγαθού, το οποίο ως εκ τούτου, αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης και πηγή έμπνευσης για αναρίθμητους φυσικούς επιστήμονες και φιλόσοφους.

Στις μέρες μας, με τη γενικότερη πρόοδο της τεχνολογίας και της επιστήμης, έχουν παρατηρηθεί ορισμένα ασυνήθιστα χαρακτηριστικά όσον αφορά τις μηχανικές, ηλεκτρομαγνητικές, θερμοδυναμικές και κβαντικές ιδιότητες του νερού. Για παράδειγμα, λόγω ευκολίας, στη πλειοψηφία των εφαρμογών αντιμετωπίζεται το νερό ως ένα απόλυτα ομοιογενές υγρό που αποτελείται μόνο από ελεύθερα μόρια, πανομοιότυπα μεταξύ τους. Σύγχρονες όμως έρευνες έχουν δείξει, ότι το νερό στην υγρή φάση δεν είναι ένα απόλυτα ομοιογενές υγρό, καθώς παρουσιάζει μια πολύπλοκη δομή η οποία οφείλεται στη ισχυρή πολικότητα του μορίου του και στους δεσμούς

υδρογόνου. Έχει παρατηρηθεί ότι εκτός από ελεύθερα μόρια, στη δομή του εμφανίζονται περίπλοκοι σχηματισμοί, όπως ανοιχτές ή κλειστές αλυσίδες από μόρια νερού, που διατηρούν τη συνοχή τους χάρη στους δεσμούς υδρογόνου. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις μετρήσεις για το ιξώδες του νερού, υποδεικνύουν ότι το νερό και περισσότερο το νερό που έχει μαγνητιστεί, δεν μπορεί να είναι ένα ιδανικό νευτώνειο υγρό, αφού παρουσιάζει κάποιου είδους πλαστικότητα. Επιπλέον, παρόλο που το νερό είναι ένα διαμαγνητικό υλικό, έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζεται από τα μαγνητικά πεδία και υφίσταται αλλαγές στα δομικά του χαρακτηριστικά.

Υπό αυτή τη σκοπιά, μπορεί να ειπωθεί, πως παρά την εκτεταμένη έρευνα που έχει γίνει, δεν έχει αναλυθεί ακόμη πλήρως το φάσμα των ιδιοτήτων του νερού, καθώς υπάρχουν μηχανισμοί που φαίνεται να διέπουν τη συμπεριφορά του και για τους οποίους δεν έχει ακόμη δοθεί επαρκής ερμηνεία με βάση τη σύγχρονη θεωρία. Στη παρούσα εργασία, θα εξεταστούν οι ιδιότητες του νερού που σχετίζονται με τα δομικά χαρακτηριστικά της υγρής φάσης και ο τρόπος με τον οποίο οι ιδιότητες αυτές επηρεάζονται από την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

## **2.1. Το μόριο του νερού**

Στην προσπάθεια να ερμηνευθεί η δομή του νερού στην υγρή φάση, χρειάζεται να ερευνηθεί ο στοιχειώδης δομικός λίθος του νερού, δηλαδή, το μόριο  $H_2O$ .

Πρόκειται για ένα πολύ μικρό μόριο, το οποίο συνθέτουν δύο από τα πιο συνηθισμένα και δραστικά στοιχεία στη φύση, το οξυγόνο και το υδρογόνο.

Στο σχηματισμό της δομής, η κίνηση ενός μορίου νερού περιέχει την κίνηση του κέντρου μάζας ολόκληρου του μορίου, συμπεριλαμβανομένης τόσο της μεταφοράς όσο και των περιστροφών και των σχετικών κινήσεων των ατόμων μέσα στο μόριο, η οποία ενσωματώνεται από τις συμμετρικές και ασύμμετρες διασταλτικές ταλαντώσεις του δεσμού  $OH$  και τη ταλάντωση κάμψης δύο δεσμών  $OH$  ή δεσμού  $H-O-H$ , στην οποία οι πυρήνες  $H$  κινούνται προς κατευθύνσεις σχεδόν κάθετες προς τους δεσμούς [3].

### **2.1.1 Πολικότητα του μορίου $H_2O$**

Σε ένα μόριο νερού η κατανομή δύο ατόμων υδρογόνου σε σχέση με το άτομο οξυγόνου δεν είναι συμμετρική λόγω της υψηλής ηλεκτραρνητικότητας του τελευταίου, στην

οποία δύο χημικοί δεσμοί OH μεταξύ οξυγόνου και των δύο ατόμων υδρογόνου σχηματίζουν γωνία  $104,5^\circ$  ή  $105^\circ$ , αντί για  $180^\circ$  και το μήκος του δεσμού ισορροπίας O-H είναι περίπου 0,0957 ή 0,1. Η μεγάλη ηλεκτραρνητική διαφορά μεταξύ των ατόμων υδρογόνου και του ατόμου οξυγόνου προσδίδει έναν ιοντικό χαρακτήρα στο δεσμό οξυγόνου-υδρογόνου και καθιστά το μόριο νερού πολικό μόριο. Έτσι, κάθε μόριο νερού πολώνεται και έχει μια μεγάλη ηλεκτρική διπολική ροπή 1,84 Debyes.

Η πολωσιμότητα (polarizability) του μορίου είναι σχεδόν ισοτροπική, γύρω από το O-άτομο με μικρές μόνο πολωσιμότητες με επίκεντρο τα άτομα H. Ακριβώς έτσι, κάθε μόριο νερού μπορεί πάντα να συνδεθεί με άλλα μόρια νερού στο νερό ή βιολογικά μόρια στους βιολογικούς ιστούς ή με άλλα μόρια σε άλλα συστήματα με δεσμούς υδρογόνου [3].

### **2.1.2 Δεσμοί υδρογόνου**

Ο δεσμός υδρογόνου είναι ένας ηλεκτροστατικός δεσμός μεταξύ ενός πρωτονίου και ενός αρνητικά φορτισμένου ιόντος όπως το  $O^{2-}$ . Επειδή το υδρογόνο έχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο, όταν μεταφέρει αυτό το ηλεκτρόνιο σε ένα άλλο πιο ηλεκτραρνητικό ιόν στον ιοντικό δεσμό, το απομένον πρωτόνιο του πυρήνα υδρογόνου παραμένει χωρίς θωράκιση. Αυτό το θετικό ιόν έχει την ικανότητα να σχηματίζει αδύναμους δεσμούς υδρογόνου με άλλα αρνητικά ιόντα ή με τα αρνητικά άκρα των πολικών μορίων, όπως το  $H_2O$ . Η εγγύτητα της προσέγγισης επιτρέπει το σχηματισμό ενός διπολικού δεσμού που είναι σχετικά αδύναμος σε σύγκριση με έναν ιοντικό ή ομοιοπολικό δεσμό. Ωστόσο, είναι σημαντικά ισχυρότερος από τον δεσμό Van der Waals και η ενέργειά του είναι το  $1/20$  περίπου της ενέργειας του ομοιοπολικού δεσμού OH. Ως εκ τούτου, ο ομοιοπολικός δεσμός και ο δεσμός υδρογόνου είναι οι βασικοί τρόποι αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών ατόμων στα μόρια του νερού και επομένως τα μόρια ελεύθερου νερού και τα συσσωματώματά τους στηρίζονται στους δεσμούς υδρογόνου, που είναι οι γενικές μορφές ύπαρξης μορίων στο νερό. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να ληφθούν σχετικά σταθερά διμερή, όπως για παράδειγμα το  $(H_2O)_2$  και άλλα πολυμερή σύμπλοκα [3, 4].



## 2.2. Δομή και ιδιότητες του νερού στην υγρή φάση

Η φύση του δεσμού υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα μια τετραεδρική διάταξη μοριακών γειτόνων γύρω από κάθε μόριο νερού. Αυτή είναι η βασική γεωμετρική διάταξη της δομής του νερού και το κλειδί για τις περισσότερες από τις ιδιότητές του. Εν τω μεταξύ, η πολική φύση ενός μορίου νερού προκαλεί το διαχωρισμό ορισμένων μορίων νερού σε ιόντα υδροξυλίου και πρωτόνια και το διαχωρισμό ορισμένων διαλυμένων ουσιών σε πρωτόνια και συναφή ανιόντα.

Εκτός των υπολοίπων δυνατών μοριακών κινήσεων, στο νερό υπάρχει συνεχής ανταλλαγή υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού - περίπου μία ανταλλαγή ανά χιλιοστό του δευτερολέπτου σε ουδέτερο pH 7 και πιο γρήγορα όταν το pH απομακρύνεται από την ουδετερότητα.

Με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού και τη σταδιακή κατάρρευση του δικτύου των δεσμών υδρογόνου επιτρέπεται στα μη-συνδεδεμένα μόρια να πλησιάσουν, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των πλησιέστερων μοριακών γειτόνων. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα περισσότερα υγρά στα οποία όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται η κινητική ενέργεια των μορίων τους και ο διαθέσιμος χώρος (λόγω της διαστολής), κάτι που σημαίνει ότι γίνεται λιγότερο πιθανό να βρεθούν τα μόρια πλησιέστερα το ένα στο άλλο [3].

Το νερό δεν είναι ένα ομοιογενές υγρό που αποτελείται μόνο από ελεύθερα μόρια νερού, αλλά ένα μη ομοιογενές υγρό, το οποίο αποτελείται από ελεύθερα μόρια νερού, γραμμικές και κυκλικές αλυσίδες από μόρια νερού συνδεδεμένα με δεσμούς υδρογόνου και συστάδες μορίων νερού με διαφορετικές συνθέσεις και βάρη. Ένα σύμπλεγμα μορίων νερού μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πολλές αλυσίδες που συνδέονται με υδρογόνο. Ως εκ τούτου, οι αλυσίδες που συνδέονται με υδρογόνο είναι μια εγγενής δομή των μορίων νερού, οι διαφορές μεταξύ των διαφορετικών αλυσίδων είναι μόνο ο αριθμός των μορίων που περιέχονται σε αυτές.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτής της υγρής δομής είναι ότι η μη ομοιογένεια της σύνθεσης μεταβάλλεται αργά με την αλλαγή της θερμοκρασίας του νερού. Πρόχειρες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι ο αριθμός των μορίων στις αλυσίδες από δεσμούς υδρογόνου μπορεί να φτάσει μέχρι τα 240 μόρια στη θερμοκρασία δωματίου, τα 150 στους 37° C και τα 120 στους 45° C, αντίστοιχα. Υπάρχουν πάντα πολλές αλυσίδες με

δεσμούς υδρογόνου στο νερό, εκτός αν η θερμοκρασία του φτάσει τους 100° C. Τα μεγέθη αυτών των αλυσίδων είναι από 10 μέχρι 70 nm περίπου.

Οι περισσότερες γραμμικές αλυσίδες και συστάδες μορίων από δεσμούς υδρογόνου, μπορούν να συνδυαστούν και να σχηματίσουν συνδυασμούς κλειστού βρόχου, των οποίων οι βαθμοί ελευθερίας είναι μικρότεροι από αυτούς των απλούστερων αλυσίδων. Έτσι, αυτοί οι κλειστοί βρόχοι έχουν χαμηλότερη ενέργεια και βρίσκονται σε πιο σταθερή κατάσταση μέσα στο νερό.

Γενικά, οι κλειστές αλυσίδες από δεσμούς υδρογόνου είναι αποτέλεσμα της μοριακής σύστασης και της φυσικής δομής των μορίων νερού και υπάρχουν πάντα στο νερό, όπως φαίνεται και από την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ενεργειακού φάσματος δόνησης, καθώς και από το φάσμα απορρόφησης του νερού στη περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας [3].

### **Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες**

Σε γενικές γραμμές, το μόριο νερού δεν έχει ασύζευκτα ηλεκτρόνια και επομένως είναι διαμαγνητικό. Το νερό διαθέτει ένα πολύπλοκο δίκτυο μορίων από δεσμούς υδρογόνου, μέσω του οποίου μεταδίδονται εκτενώς οι μετατοπίσεις πολικότητας μέσω των ταχέων και συνδεδεμένων συλλογικών αλλαγών στον προσανατολισμό των δεσμών υδρογόνου και ως εκ τούτου εμφανίζει μια υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Αυτό του επιτρέπει να ενεργεί ως διαλύτης για ιοντικές ενώσεις, καθώς μειώνει σημαντικά την ηλεκτρική έλξη μεταξύ των αντίθετα φορτισμένων ιόντων, επιτρέποντας στη θερμική κίνηση να διαχωρίσει τα ιόντα σε διάλυμα. Στη θέρμανση, το δίκτυο νερού γίνεται ασθενέστερο και η ροπή διπόλου του νερού μειώνεται και η διηλεκτρική του σταθερά ελαττώνεται [3].

### **Ιξώδες νερού**

Το ιξώδες ενός υγρού καθορίζεται από την ευκολία της σχετικής κίνησης των μορίων του και εξαρτάται από τις δυνάμεις που συγκρατούν τα μόρια (συνοχή). Αυτή η συνοχή είναι μεγάλη στο νερό λόγω του εκτεταμένου τρισδιάστατου δικτύου των δεσμών υδρογόνου και ως εκ τούτου έχει σχετικά υψηλό ιξώδες ( $3,59 \cdot 10^{-4}$  Pa·s στους 25° C).

Το ιξώδες του νερού φθίνει με την άνοδο της θερμοκρασίας καθώς μειώνεται το εύρος των δεσμών υδρογόνου [3].

### **2.3. Μαγνήτιση του νερού**

Το μαγνητισμένο νερό έχει αρκετές ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως η μνήμη και το φαινόμενο κορεσμού σε σχέση με εκείνες του καθαρού νερού. Η μαγνήτιση του νερού προκαλείται από τα ρεύματα πρωτονίων που κινούνται εντός των κλειστών αλυσίδων από δεσμούς υδρογόνου, με διαφορετικά μοριακά βάρη, υπό τη δράση της δύναμης Lorentz του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο επηρεάζει τη μοριακή δομή του νερού προκαλώντας την ανάπτυξη του μεγέθους των μοριακών συστάδων. Ο αντίστοιχος αριθμός δεσμών υδρογόνου βρέθηκε να αυξάνεται κατά περίπου 0,34%, υποδεικνύοντας το σχηματισμό μεγαλύτερων συστάδων μορίων νερού. Εκτός των φαινομένων που αναφέρονται παραπάνω, έχει παρατηρηθεί σε πολλά πειράματα ότι το νερό μαγνητίζεται και με άλλους μηχανισμούς, παρόλο που σε αυτές τις περιπτώσεις τα φαινόμενα μαγνήτισης είναι ασθενέστερα.

Υπάρχουν κυρίως δύο ζητήματα, που σχετίζονται με τη μαγνήτιση του νερού και στα οποία δεν συμφωνεί η επιστημονική κοινότητα:

Πρώτο ζήτημα: Ορισμένοι ισχυρίζονται ότι το νερό δεν μπορεί να μαγνητιστεί καθόλου επειδή είναι διαμαγνητικό. Ως προς αυτό υπάρχει η διαβεβαίωση [3] ότι η μαγνήτιση του νερού δεν σχετίζεται καθόλου με το διαμαγνητισμό του νερού, αλλά συνδέεται με τη πολική φύση των μορίων νερού, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ηλεκτρική διπολική ροπή και οργανώνονται σε δομές δακτυλιοειδών αλυσίδων μέσω των δεσμών υδρογόνου.

Το δεύτερο ζήτημα συνδέεται με τη χρήση των σωστών μεθόδων και τεχνικών μαγνήτισης του νερού και των μεθόδων μέτρησης, οι οποίες είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Η απουσία αποδεδειγμένων μεθόδων και τεχνικών μαγνήτισης του νερού και των κατάλληλων μεθόδων μέτρησης, οδηγεί σε διαφορετικά συμπεράσματα στις παρούσες έρευνες για το μαγνητισμένο νερό [3].

### **2.3.1 Μεταβολές των ιδιοτήτων του μαγνητισμένου νερού**

Η διηλεκτρική σταθερά, η αντίσταση και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μαγνητισμένου νερού δεν είναι σταθερές, αλλά αλλάζουν σε σχέση με εκείνες του καθαρού νερού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μαγνητισμένου νερού είναι μεγαλύτερη από εκείνη του καθαρού νερού και αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου μαγνήτισης και της συχνότητας του εξωτερικά εφαρμοσμένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, η διηλεκτρική σταθερά και η αντίσταση του μαγνητισμένου νερού είναι μικρότερες από εκείνες του καθαρού νερού και μειώνονται με την αύξηση του χρόνου μαγνήτισης και της συχνότητας του εξωτερικά εφαρμοσμένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Το νερό έχει, γενικά, θεωρηθεί ότι είναι ένα ιδανικό νευτώνειο υγρό που αποτελείται μόνο από ελεύθερα μόρια νερού. Ωστόσο, πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι τα ιζώδη των καθαρών και μαγνητισμένων υδάτων δεν είναι σταθερά και μειώνονται με αύξηση της διατμητικής τάσης. Σημειώνεται επίσης ότι ο μεγαλύτερος χρόνος μαγνήτισης οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του ιζώδους του. Ωστόσο, το ιζώδες δεν αλλάζει αφού ο χρόνος μαγνήτισης υπερβεί ένα όριο, υποδεικνύοντας έτσι ότι το ιζώδες του μαγνητισμένου νερού φτάνει την ελάχιστη τιμή του, υπό αυτές τις συνθήκες. Προφανώς, αυτό σχετίζεται με το φαινόμενο κορεσμού του μαγνητισμένου νερού. Σύμφωνα με τον ορισμό του μη-Νευτώνειου υγρού μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι τόσο το μαγνητισμένο όσο και το καθαρό νερό δεν Νευτώνεια υγρά, αλλά πλαστικά, λόγω της ανομοιογένειας στη δομή τους [3].

### **2.3.2 Κορεσμός και φαινόμενα μνήμης του μαγνητισμένου νερού**

Τα πειραματικά αποτελέσματα, δείχνουν σαφώς, ότι οι μέγιστες τιμές ισχύος του φάσματος απορρόφησης του μαγνητισμένου νερού είναι μεγαλύτερες με την αύξηση του χρόνου μαγνήτισης. Η μαγνητική επίδραση στο νερό αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου μαγνήτισης, αλλά ο ρυθμός αύξησης της ισχύος απορρόφησης δεν είναι σταθερός και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Όταν ο χρόνος μαγνήτισης είναι πολύ μεγάλος και η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δρα στο νερό είναι αρκούντως ισχυρή, το φαινόμενο μαγνητισμού φτάνει σε ένα μέγιστο μετά το οποίο οι ιδιότητες του μαγνητισμένου νερού δεν αλλάζουν πλέον. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως φαινόμενο κορεσμού του μαγνητισμένου νερού.

Σε γενικές γραμμές, όσο ισχυρότερο είναι το μαγνητικό πεδίο, τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο μαγνήτισης αποτέλεσμα. Ωστόσο, μόλις αφαιρεθεί το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο από το μαγνητισμένο νερό, διαπιστώνεται πειραματικά ότι το φαινόμενο μαγνήτισης δεν εξαφανίζεται αμέσως, αλλά μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η ένταση της υπέρυθρης απορρόφησης μειώνεται σταδιακά με την αύξηση του χρόνου και τελικά γίνεται ίδια με εκείνη του καθαρού νερού μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται φαινόμενο μνήμης του μαγνητισμένου νερού [3].

## Κεφάλαιο 3: Στοιχεία υδροδυναμικής

### 3.1. Υδροδυναμική

Η επιστήμη της υδροδυναμικής ασχολείται με τη μελέτη της κίνησης των υγρών και των συμπαγών σωμάτων που κινούνται εντός της ροής των υγρών. Οι θεμελιώδεις αρχές της υδροδυναμικής, είναι οι νόμοι διατήρησης της μάζας, της γραμμικής ορμής και της ενέργειας των σωμάτων και των υγρών που εμπλέκονται στα φαινόμενα.

Η θεμελιώδης υπόθεση της υδροδυναμικής είναι ότι οι αλλαγές που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ρευστού, γίνονται αρκετά αργά, ώστε το σύστημα να μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε κατάσταση τοπικής θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αυτός είναι και ο λόγος που στα θεμελιώδη μεγέθη δεν συμπεριλαμβάνεται η θερμοκρασία, αφού γίνεται η υπόθεση ότι η μεταβολή της, όσον αφορά τη διάταξη που μελετάται, είναι αργή στη μονάδα του χρόνου, τουλάχιστον για τις ανάγκες του πειράματος. Γενικά, οι εξισώσεις της υδροδυναμικής έχουν εφαρμοστεί σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα προβλημάτων στην επιστήμη και τη μηχανική και ισχύουν για διαταραχές αυθαίρετου μεγέθους, υπό την προϋπόθεση, ότι μπορούν να αγνοηθούν όροι που έχουν ορμή και παράγωγοι ενεργειακής πυκνότητας υψηλότερες από τη δεύτερη τάξη. Αυτός ο περιορισμός σημαίνει ότι κάποιος περιορίζεται στις διακυμάνσεις του χώρου και του χρόνου που είναι αργές στην κλίμακα των μοριακών διεργασιών, όσον αφορά τη μέση ελεύθερη διαδρομή σύγκρουσης και την αντίστροφη συχνότητα σύγκρουσης [5].

#### Πίεση

Μια βασική έννοια, τόσο για την υδροδυναμική όσο και για την υδροστατική, είναι η πίεση που ασκούν τα ρευστά στις επιφάνειες με τις οποίες βρίσκονται σε επαφή. Είναι ένα βαθμωτό μέγεθος που ορίζεται με το γράμμα  $P$  και έχει μονάδες δύναμης ανά επιφάνεια ( $Pa = N/m^2$ ). Για την υδροστατική, η πίεση των ρευστών μεταδίδεται με ίση ένταση προς όλες τις διευθύνσεις και ασκείται κάθετα σε κάθε επίπεδη επιφάνεια. Στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο οι εντάσεις της πίεσης σ' ένα υγρό είναι ίσες. Αυτού του είδους η πίεση αναφέρεται με τον όρο στατική πίεση για να διαχωριστεί από τη δυναμική πίεση, η οποία προκύπτει κατά τη μελέτη των ρευστών σε κίνηση και είναι η κινητική

ενέργεια ανά μονάδα όγκου του ρευστού. Η στατική πίεση μπορεί να μετρηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του υγρού, ανεξάρτητα από το αν το ρευστό βρίσκεται σε κίνηση ή όχι. Αντιθέτως, η δυναμική πίεση δεν μπορεί να μετρηθεί σημειακά, παρά μόνο διαφορικά, μέσω της εξίσωσης του Bernoulli. Στη συνέχεια, αν δεν υπάρχει άλλος προσδιορισμός, με τον όρο πίεση εννοείται η στατική πίεση.

Ένα υγρό σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση έχει καθορισμένο όγκο και όλα τα γνωστά υγρά είναι σε κάποιο βαθμό συμπίεσιμα. Για τους περισσότερους σκοπούς, ωστόσο, είναι αρκετό να θεωρούνται τα υγρά ως ασυμπίεστα ( $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \nabla \rho = 0$ ) [6].

### **Ιξώδες**

Τα πραγματικά υγρά παρουσιάζουν ιξώδες που προκύπτει από τη τριβή μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων στο εσωτερικό της ροής τους, που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους. Σε γενικές γραμμές, το ιξώδες εξαρτάται από την κατάσταση ενός υγρού, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και ο ρυθμός παραμόρφωσης.

Το (δυναμικό) ιξώδες παριστάνεται από το γράμμα  $\eta$  και έχει μονάδες Pa·s.

Για την υδροδυναμική, ένα χρήσιμο μέγεθος είναι το κινηματικό ιξώδες, το οποίο ορίζεται ως:  $\nu = \eta/\rho$  (σε m<sup>2</sup>/s), με  $\rho$  τη πυκνότητα του ρευστού

### **Νευτώνεια και μη-Νευτώνεια ρευστά**

Ένα πραγματικό ρευστό ονομάζεται Νευτώνειο, αν υπάρχει γραμμική σχέση που συνδέει τις πιέσεις στο εσωτερικό του λόγω ιξώδους, με τις μεταβολές του ρυθμού παραμόρφωσης που υφίσταται. Τα νευτώνεια υγρά είναι η πιο απλή μαθηματικά αναπαράσταση των υγρών με ιξώδες. Για ένα μη-Νευτώνειο ρευστό η σχέση μεταξύ των πιέσεων λόγω ιξώδους και του ρυθμού παραμόρφωσης είναι πιο πολύπλοκη και μπορεί να εξαρτάται και από τη χρονική εξέλιξη της ροής. Η μη-Νευτώνεια συμπεριφορά προκύπτει συχνά από την παρουσία μικροσκοπικών αντικειμένων εντός του ρευστού, που είναι μεγάλα σε σχέση με την ατομική κλίμακα, ενώ παραμένουν μικρά σε σχέση με τις διαστάσεις της ροής [7].

Για τα ασυμπίεστα και ιστροπικά νευτώνεια ρευστά το ιξώδες είναι μια σταθερή ποσότητα.

### **Γραμμή ροής και σωλήνας ροής**

Δεδομένου ότι το ρευστό που εξετάζεται είναι συνεχές, μπορεί να οριστεί ένα σωματίδιο του ρευστού, ως εκείνο το κομμάτι του ρευστού που περιέχεται σε έναν απειροελάχιστο όγκο, δηλαδή, έναν όγκο του οποίου το μέγεθος μπορεί να θεωρηθεί τόσο μικρό που για τον συγκεκριμένο σκοπό οι γραμμικές του διαστάσεις είναι αμελητέες. Αν η συνάρτηση που δίνει τη ταχύτητα αυτού του υποθετικού σωματιδίου είναι γνωστή για κάθε σημείο του χώρου, τότε είναι γνωστή και η κίνηση του ρευστού. Επιπλέον, αν ακολουθηθεί, νοητά, η τροχιά του σωματιδίου, για ένα σύντομο χρονικό διάστημα και διαπιστωθεί ότι η ταχύτητα του κατά μήκος της τροχιάς διατηρεί μια ομοιομορφία, τότε, για τη περιγραφή της κίνησης του σωματιδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια της γραμμής ροής και η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή. Η γραμμή ροής, δηλαδή, είναι μια ιδεατή καμπύλη σχεδιασμένη στο εσωτερικό του ρευστού, η οποία δείχνει την κατεύθυνση της κίνησης στα διάφορα τμήματα ροής του ρευστού.

Στη περίπτωση που η τροχιά του σωματιδίου είναι ακανόνιστη και τέμνει τις νοητές τροχιές άλλων σωματιδίων, τότε η κίνηση της ροής του ρευστού δεν μπορεί να παρασταθεί με τη βοήθεια των γραμμών ροής και η ροή αποκαλείται τυρβώδης [6].

Επιπλέον, ορίζεται ο σωλήνας ροής, ως ένα στοιχειώδες τμήμα του ρέοντος ρευστού που περιέχεται μέσα σε ένα σύνολο γραμμών ροής που περικλείει η ροή.

Γενικά, η ροή των ρευστών διακρίνεται σε μόνιμη ή μη μόνιμη, ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη, στρωτή ή τυρβώδης, μονοδιάστατη, δισδιάστατη ή τρισδιάστατη και στρόβιλη ή αστρόβιλη. Στη τυρβώδη ροή θα γίνει αναφορά εκτενέστερα στη συνέχεια της εργασίας, μιας και αποτελεί κρίσιμο στοιχείο του φαινομένου που μελετάται.

### **Αριθμός Reynolds**

Για την μελέτη των πραγματικών ρευστών δηλαδή των ρευστών με ιξώδες, είναι χρήσιμο ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο δίνει μια εκτίμηση για τις εσωτερικές τάσεις του ρευστού που καθορίζουν αν η ροή είναι στρωτή ή τυρβώδης.

Ο αριθμός Reynolds είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ιξώδεις δυνάμεις μέσα σε ένα υγρό, που υποβάλλεται σε σχετική εσωτερική κίνηση λόγω



διαφορετικών ταχυτήτων εντός του ρευστού. Μια περιοχή όπου αυτές οι δυνάμεις αλλάζουν συμπεριφορά είναι γνωστή ως οριακό στρώμα, όπως η επιφάνεια οριοθέτησης στο εσωτερικό ενός σωλήνα.

Από τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το ίδιο το υγρό, μόνο το κινηματικό ιξώδες εμφανίζεται στις εξισώσεις της υδροδυναμικής (εξισώσεις Navier-Stokes). Οι άγνωστες συναρτήσεις που πρέπει να προσδιοριστούν με την επίλυση των εξισώσεων είναι η ταχύτητα  $u$  και ο λόγος  $P/\rho$ . Επιπλέον, η ροή εξαρτάται, μέσω των οριακών συνθηκών, από το σχήμα και τις διαστάσεις του αγωγού μέσα στον οποίο κινείται το υγρό και από την ταχύτητά του υγρού. Δεδομένου ότι το σχήμα του αγωγού υποτίθεται ότι δίνεται, οι γεωμετρικές του ιδιότητες καθορίζονται από μια γραμμική διάσταση, η οποία παριστάνεται με  $L$ . Η ταχύτητα του κύριου ρεύματος έστω ότι είναι  $u$ . Οποιαδήποτε ροή καθορίζεται από αυτές τις τρεις παραμέτρους,  $\nu$ ,  $u$  και  $L$ .

Η αδιάστατη ποσότητα που μπορεί να προκύψει ως συνδυασμός των τριών παραπάνω μεγεθών αποκαλείται αριθμός Reynolds, συμβολίζεται με το  $R$  και ορίζεται ως  $R = uL/\nu$ . Ο αριθμός Reynolds σχετίζεται με το νόμο της ομοιότητας για τη κίνηση των ρευστών, ο οποίος λέει ότι δύο ροές με την ίδια γεωμετρία και τον ίδιο αριθμό Reynolds είναι όμοιες [8].

Για τη ροή στο εσωτερικό ενός κυλινδρικού σωλήνα μεγάλου μήκους, η χαρακτηριστική διάσταση είναι η εσωτερική διάμετρος και ο αριθμός Reynolds βρίσκεται ως:

$$R = \frac{uD}{\nu} = \frac{QD}{Av} = \frac{4}{\pi} \frac{Q}{\nu D} \quad (3-1)$$

όπου  $Q$  η παροχή ( $m^3/s$ ),  $D$  η εσωτερική διάμετρος (m) και  $A$  η εσωτερική διατομή ( $\pi D^2/4$  σε  $m^2$ )

### 3.2. Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφράζουν μαθηματικά τη διατήρηση της ορμής και τη διατήρηση της μάζας για τα νευτώνεια υγρά. Οι εξισώσεις Navier-Stokes υποθέτουν ότι το υγρό που μελετάται είναι ένα συνεχές (είναι απείρως διαιρεμένο και δεν αποτελείται από σωματίδια όπως άτομα ή μόρια) και δεν κινείται με σχετικιστικές ταχύτητες.

Η εξίσωση ορμής των Navier-Stokes [8] είναι:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{\rho} \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \frac{\mathbf{f}}{\rho} \quad (3-2)$$

όπου  $\zeta$  είναι το διασταλτικό ιξώδες (δευτερεύων συντελεστής ιξώδους) και  $\mathbf{f}$  η χωρική πυκνότητα των εξωτερικών δυνάμεων .

Οι ροές των πραγματικών ρευστών, για χαμηλές ταχύτητες, περιγράφονται αρκετά καλά από τη παρακάτω απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης Navier-Stokes, με τη προσθήκη της συνθήκης της ασυμπίεστης ροής ( $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ ).

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mathbf{f}}{\rho} \quad (3-3)$$

ή σε όρους φυσικών μεγεθών:

$$\text{μεταβολή} + \text{συναγωγή} = \text{εσωτερική ενέργεια} + \text{διάχυση} + \text{εξωτερική πηγή ενέργειας}$$

Στην εξίσωση Navier-Stokes περιέχεται η εξίσωση συνέχειας για την αρχή διατήρησης της μάζας, η οποία είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \cdot \mathbf{u} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (3-4)$$

Με τη συνθήκη για τα ομοιογενή και ασυμπίεστα υγρά, η εξίσωση συνέχειας καταλήγει στη συνθήκη της ασυμπίεστης ροής:  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$

Η αριθμητική λύση των εξισώσεων Navier-Stokes για την τυρβώδη ροή είναι εξαιρετικά δύσκολη. Κάνοντας την προσέγγιση του οριακού στρώματος, η ροή χωρίζεται σε ένα τμήμα χωρίς ιξώδες (το οποίο είναι εύκολο να επιλυθεί με αρκετές μεθόδους) και το οριακό στρώμα, το οποίο διέπεται από ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων με απλούστερη επίλυση. Η προσέγγιση αναφέρει ότι, για έναν αρκετά υψηλό αριθμό Reynolds η ροή πάνω από μια επιφάνεια μπορεί να χωριστεί σε μια εξωτερική περιοχή της άτριβης ροής που δεν επηρεάζεται από το ιξώδες (το μεγαλύτερο μέρος της ροής), και μια περιοχή κοντά στην επιφάνεια όπου το ιξώδες είναι σημαντικό (το οριακό στρώμα).

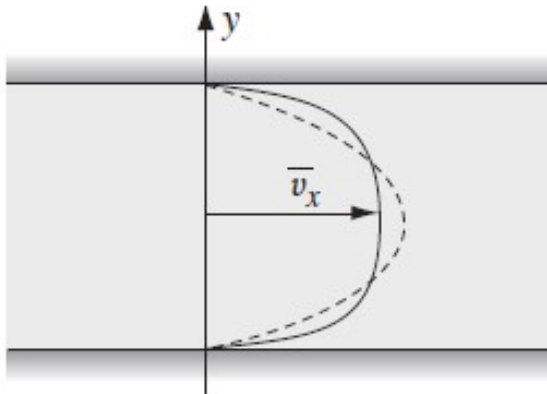
### 3.3. Τυρβώδης ροή

Κατά την τυρβώδη ροή, οι μεταβολές στη ροή του ρευστού (ταχύτητα, πίεση) συμβαίνουν κατά τρόπο χαοτικό, τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Η τυρβώδης ροή

εμφανίζεται για μεγάλους αριθμούς Reynolds, όπου η ροή γίνεται ασταθής και η κίνηση του ρευστού χαοτική. Για την ανάλυση της τυρβώδους ροής δεν χρησιμεύει η έννοια της γραμμής ροής και μέχρι στιγμής δεν υπάρχει αυστηρή μαθηματική περιγραφή, βάσει της οποίας να ορίζεται η τυρβώδης ροή.

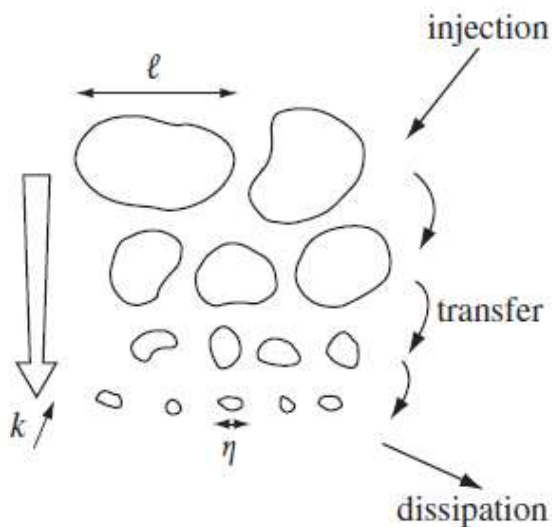
Ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία περιγράφουν τις τυρβώδεις ροές είναι η μη κανονικότητα (irregularity), η διαχυτικότητα (diffusivity), η στροβιλότητα (rotationality) και ο διασκορπισμός (dissipation).

Οι τυρβώδεις ροές είναι πάντα εξαιρετικά ακανόνιστες και για το λόγο αυτό, τα προβλήματα μοντελοποίησής τους αντιμετωπίζονται συνήθως στατιστικά και όχι ντετερμινιστικά.



Σχήμα 3-1

Προφίλ μέσης ταχύτητας για στρωτή (διακεκομμένη γραμμή) και τυρβώδη (στερεά γραμμή) ροή εντός αγωγού. Η οριζόντια κλίμακα ταχύτητας έχει και στις δυο περιπτώσεις διαιρεθεί με τη μέσης ταχύτητα, για λόγους σύγκρισης



Σχήμα 3-2

Αρχή του Κολμογκόροφ για τον τρόπο μεταφοράς ενέργειας από τις μεγαλύτερες δίνες προς τις μικρότερες. Η κάθετη κλίμακα αναπαριστά τις εικονικές διαστάσεις των δινών και όχι την κατανομή τους στον πραγματικό χώρο

### **Πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδης ροή [8]**

Η τυρβώδης ροή σε αρκετά μεγάλους αριθμούς Reynolds χαρακτηρίζεται από την παρουσία μιας εξαιρετικά ακανόνιστης διαταραγμένης διακύμανσης της ταχύτητας με το χρόνο και σε κάθε σημείο. Αυτή ονομάζεται πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδης ροή. Η ταχύτητα συνεχώς κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή κατά τρόπο ακανόνιστο. Παρόμοια ακανόνιστη διακύμανση της ταχύτητας υπάρχει και μεταξύ των σημείων της ροής σε μια δεδομένη στιγμή.

Υπάρχει η ανάγκη να εισαχθεί η έννοια της μέσης ταχύτητας, που είναι η μέση τιμή της πραγματικής ταχύτητας, σε κάθε σημείο, μετρημένη σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια η μέση ταχύτητα θα συμβολίζεται με το  $\bar{u}$ . Η διαφορά  $u' = u - \bar{u}$  μεταξύ της πραγματικής ταχύτητας και της μέσης ταχύτητας ποικίλλει ακανόνιστα με τρόπο χαρακτηριστικό για την τυρβώδη ροή και θα ονομαστεί κυμαινόμενο μέρος της ταχύτητας.

Σε μια λεπτομερέστερη εξέταση της φύσης αυτής της ακανόνιστης κίνησης που υπερτίθεται στη μέση ροή, μπορεί να θεωρηθεί ότι ποιοτικά αυτή η κίνηση είναι αποτέλεσμα της υπέρθεσης πολλών δινών (eddies) διαφορετικών μεγεθών. Με το μέγεθος μιας δίνης (eddy) εννοείται η τάξη μεγέθους των αποστάσεων πάνω από τις οποίες η ταχύτητα ποικίλλει αισθητά. Καθώς ο αριθμός Reynolds αυξάνεται, εμφανίζονται πρώτα μεγάλες δίνες με τις μικρότερες δίνες να εμφανίζονται αργότερα. Για πολύ μεγάλους αριθμούς Reynolds, υπάρχουν δίνες κάθε μεγέθους από τη μεγαλύτερη έως τη μικρότερη .

Σημαντικό ρόλο σε κάθε τυρβώδης ροή διαδραματίζουν οι μεγαλύτερες δίνες, των οποίων το μέγεθος (η θεμελιώδης ή εξωτερική κλίμακα της τύρβης) είναι της τάξης των διαστάσεων της περιοχής στην οποία πραγματοποιείται η ροή. Αυτή η σειρά μεγέθους συμβολίζεται με  $L$  για κάθε δεδομένη τυρβώδη ροή. Οι μεγάλες δίνες έχουν τα μεγαλύτερα πλάτη και η ταχύτητα σε αυτές είναι συγκρίσιμη με την διακύμανση της μέσης ταχύτητας κατά την απόσταση  $L$ . Με  $\Delta \bar{u}$  θα συμβολίζεται η τάξη μεγέθους της μεταβολής της μέσης ταχύτητας. Οι συχνότητες που αντιστοιχούν σε αυτές τις δίνες είναι της τάξης  $\bar{u}/L$ , ο λόγος της μέσης ταχύτητας προς την διάσταση  $L$ . Εδώ, η συχνότητα καθορίζει την περίοδο με την οποία η μορφή της ροής επαναλαμβάνεται όταν παρατηρείται από κάποιο σταθερό πλαίσιο αναφοράς. Σε σχέση με ένα τέτοιο

πλαίσιο, ωστόσο, ολόκληρες οι σχηματιζόμενες μορφές κινούνται μαζί με το υγρό με ταχύτητες της τάξης του  $\bar{u}$ .

Οι μικρές δίνες, από την άλλη πλευρά, που αντιστοιχούν σε μεγάλες συχνότητες, συμμετέχουν στην τυρβώδη ροή με πολύ μικρότερα πλάτη. Μπορούν να θεωρηθούν σαν λεπτομερείς δομές που υπερτίθενται στις θεμελιώδης μεγάλες τυρβώδεις δίνες. Μόνο ένα συγκριτικά μικρό μέρος της συνολικής κινητικής ενέργειας του υγρού είναι αποθηκευμένο στις μικρές δίνες.

Για τις μεγάλες δίνες, που αποτελούν τη βάση οποιασδήποτε τυρβώδους ροής, το ιξώδες είναι ασήμαντο. Από αυτό προκύπτει ότι δεν υπάρχει αισθητή διάχυση ενέργειας στις μεγάλες δίνες. Το ιξώδες του υγρού γίνεται σημαντικό μόνο για τα μικρότερες δίνες, των οποίων ο αριθμός Reynolds είναι συγκρίσιμος με την μονάδα. Το μέγεθος αυτών των δινών συμβολίζεται με  $\lambda_0$  και θα οριστεί αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο. Σε αυτές τις μικρές δίνες, οι οποίες είναι ασήμαντες όσον αφορά στη συμβολή τους στη γενική μορφή μιας τυρβώδους ροής, συμβαίνει η διάχυση της ενέργειας.

Έτσι συνάγεται η ακόλουθη θεώρηση της ενεργειακής διάχυσης στην τυρβώδη ροή. Η ενέργεια περνά από τις μεγάλες δίνες στις μικρότερες, χωρίς πρακτικά να συμβαίνει καμία διάχυση σε αυτή τη διαδικασία. Μπορεί να λεχθεί ότι υπάρχει συνεχής ροή ενέργειας από μεγάλες σε μικρές δίνες, δηλαδή από τις μικρές στις μεγάλες συχνότητες. Αυτή η ροή ενέργειας διαχέεται στις μικρότερες δίνες, όπου η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Για να διατηρηθεί μια σταθερή κατάσταση, είναι φυσικά απαραίτητο να υπάρχουν εξωτερικές πηγές ενέργειας που να παρέχουν συνεχώς ενέργεια στις μεγάλες δίνες.

Δεδομένου ότι το ιξώδες του υγρού είναι σημαντικό μόνο για τις μικρότερες δίνες, μπορεί να ειπωθεί ότι καμία από τις ποσότητες που αφορούν τις δίνες μεγέθους  $\lambda > \lambda_0$  δεν μπορεί να εξαρτηθεί από το ιξώδες  $\nu$ .

Έστω ότι  $\epsilon$  είναι η μέση διάχυση της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα μάζας υγρού. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από τις μεγάλες δίνες, από τις οποίες μεταφέρεται σταδιακά σε μικρότερες δίνες μέχρι να διαχυθεί σε δίνες μεγέθους  $\sim \lambda_0$ . Ως εκ τούτου, αν και η διάχυση οφείλεται τελικά στο ιξώδες, η τάξη μεγέθους του  $\epsilon$  μπορεί να καθοριστεί μόνο από εκείνες τις ποσότητες που χαρακτηρίζουν τις μεγάλες

δίνες. Αυτά οι ποσότητες είναι η πυκνότητα υγρών  $\rho$ , η διάσταση  $L$  και η διακύμανση της μέσης ταχύτητας  $\Delta\bar{u}$ . Για το  $\varepsilon$ , ισχύει ότι:

$$\varepsilon \sim (\Delta\bar{u})^3/L$$

και αυτό καθορίζει τη τάξη μεγέθους της ενεργειακής διάχυσης στη τυρβώδη ροή.

Όπως ορίστηκε παραπάνω,  $\varepsilon$  είναι η ροή ενέργειας που περνά συνεχώς από μεγαλύτερες σε μικρότερες δίνες. Ως εκ τούτου, αν και η ενεργειακή διάχυση οφείλεται τελικά στο ιξώδες του υγρού που εμφανίζεται στις μικρότερες δίνες, η ποσότητα  $\varepsilon$  καθορίζει τις ιδιότητες των μεγαλύτερων δινών. Είναι φυσικό να υποθεθεί ότι (για δεδομένο  $\rho$  και  $\varepsilon$ ) οι τοπικές ιδιότητες της τύρβης είναι ανεξάρτητες από τη διάσταση  $L$  και την ταχύτητα  $\Delta\bar{u}$ , της ροής στο σύνολό της. Το ιξώδες του ρευστού δεν μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε καμία από τις ποσότητες που μελετώνται αυτή τη στιγμή, καθώς είναι σημαντικό μόνο για τις αποστάσεις  $\lambda > \lambda_0$ ).

Έστω ότι παριστάνεται με  $\Delta u_\lambda$  η τάξη μεγέθους της τυρβώδους διακύμανσης της ταχύτητας για αποστάσεις της τάξης του  $\lambda$ . Πρέπει να καθορίζεται μόνο από την  $\varepsilon$  και, φυσικά, από την ίδια την απόσταση. Από αυτές τις δύο ποσότητες μπορεί να σχηματιστεί μόνο ένα μέγεθος που έχει διαστάσεις ταχύτητας. Ως εκ τούτου, πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\Delta u_\lambda \propto \sqrt[3]{\varepsilon\lambda}$$

η οποία με τη χρήση της παραπάνω σχέσης για τη διάχυση της ενέργειας στη τυρβώδη ροή, γίνεται:

$$\Delta u_\lambda \propto \Delta\bar{u} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{L}}, \quad (\text{για } \lambda > \lambda_0) \quad (3-5)$$

Μετά τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί σε ποιες αποστάσεις το ιξώδες του υγρού αρχίζει να είναι σημαντικό. Αυτές οι αποστάσεις  $\lambda_0$  καθορίζουν επίσης τη τάξη μεγέθους των μικρότερων δινών στην τυρβώδη ροή (που ονομάζεται "εσωτερική κλίμακα" της τύρβης, σε αντίθεση με την "εξωτερική κλίμακα"  $L$ ).

$$\lambda_0 \sim \frac{L}{R^{\frac{3}{4}}} \quad (3-6)$$

Κατά συνέπεια η εσωτερική κλίμακα της τύρβης μειώνεται ραγδαία με την αύξηση του  $R$ . Για την αντίστοιχη ταχύτητα ισχύει:

$$\Delta u_{\lambda_0} \sim \Delta u'_{\lambda_0} \sim \frac{\Delta \bar{u}}{\sqrt[4]{R}}$$

Αυτή μειώνεται επίσης όταν αυξάνεται το R.

Το εύρος των κλιμάκων όπου  $\lambda \sim L$ , καλείται ενεργειακό εύρος και είναι αυτό στο οποίο συγκεντρώνεται η πλειοψηφία της κινητικής ενέργειας του υγρού. Οι τιμές  $\lambda \lesssim \lambda_0$  σχηματίζουν το εύρος διάχυσης, εκεί όπου η κινητική ενέργεια διαχέεται. Για πολύ μεγάλες τιμές του R, αυτά τα δυο εύρη απέχουν αρκετά, και μεταξύ τους βρίσκεται το αδρανειακό εύρος, στο οποίο  $\lambda_0 \ll \lambda \ll L$ . Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω ισχύουν σε αυτό το αδρανειακό εύρος.

Τέλος, μπορούν να εξεταστούν οι ιδιότητες της ροής σε περιοχές των οποίων η διάσταση  $\lambda$  είναι μικρή σε σύγκριση με το  $\lambda_0$ . Σε αυτές τις περιοχές η ροή είναι στρωτή, η ταχύτητά της ποικίλλει ομαλά και το  $\Delta u_\lambda$  μπορεί να αναλυθεί σε μια δυναμοσειρά του  $\lambda$ , από την οποία παίρνοντας μόνο τον πρώτο όρο, συνάγεται ότι

$\Delta u_\lambda = \text{σταθερά} \cdot \lambda$ . Η τάξη μεγέθους της σταθεράς είναι  $\frac{\Delta u_{\lambda_0}}{\lambda_0}$ , καθώς για  $\lambda \sim \lambda_0$  πρέπει

να ισχύει  $\Delta u_\lambda \sim \Delta u_{\lambda_0}$ . Επομένως,

$$\Delta u_\lambda \sim \Delta u_{\lambda_0} \frac{\lambda}{\lambda_0} \sim \Delta \bar{u} \frac{\lambda}{L} \sqrt{R}, \quad (\text{για } \lambda < \lambda_0) \quad (3-7)$$

## **Κεφάλαιο 4: Φαινόμενο**

### **4.1. Εισαγωγικές έννοιες**

Προτού εξεταστεί το φαινόμενο που μελετάται, δηλαδή η αλλαγή της κρυσταλλικής φάσης του ασβεστίτη υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου, θα γίνει εξέταση του απλούστερου φαινομένου της καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου στο εσωτερικό της ροής (ομοιογενής πυρηνογένεση) και στη διεπιφάνεια νερού-στερεού (ετερογενής πυρηνογένεση). Παράλληλα, θα γίνει αναφορά, εν συντομία, σε ορισμένες έννοιες της χημείας και της επιστήμης των υλικών, οι οποίες είναι χρήσιμες για την παρουσίαση του βασικού φαινομένου και της πειραματικής διαδικασίας στη συνέχεια. Η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου, είναι μια σύνθετη διαδικασία που εξαρτάται έντονα από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ιόντων στο νερό και γενικότερα από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τις θερμοδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στη διεπιφάνεια νερού-στερεού. Ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει τον αριθμό, το μέγεθος και το σχήμα των καταβυθιζόμενων σωματιδίων, είναι ο κορεσμός του ανθρακικού ασβεστίου στο νερό, ο βαθμός, δηλαδή, στον οποίο η συγκέντρωσή του υπερβαίνει τη διαλυτότητά του στο νερό, έστω και τοπικά.

#### **4.1.1 Ομοιογενής και ετερογενής πυρηνογένεση**

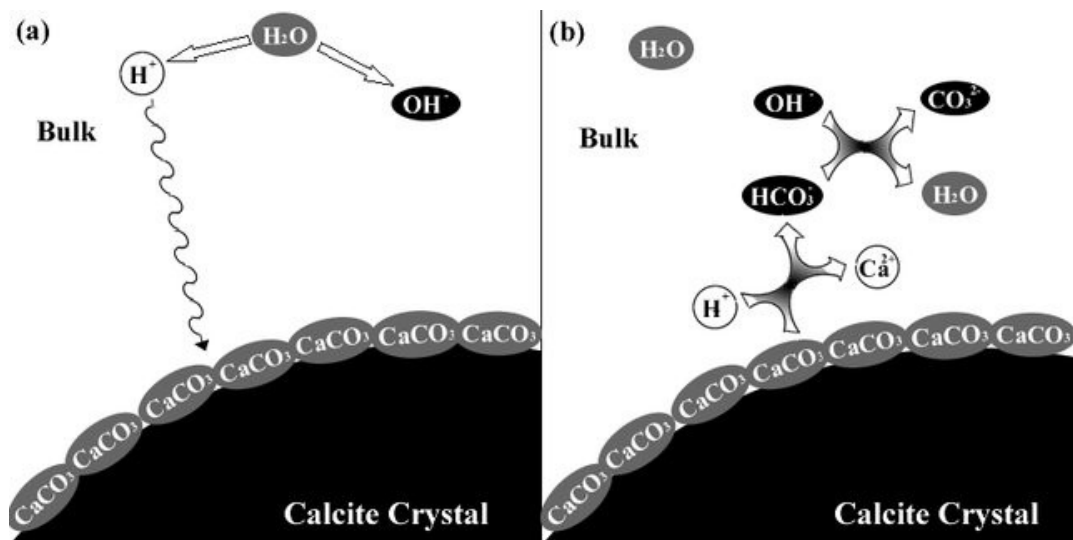
Το πρώτο στάδιο για τη δημιουργία μιας νέας φάσης ή δομής, όπως ο σχηματισμός των κρυστάλλων του ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια ενός σωλήνα ύδρευσης, είναι η πυρήνωση ή πυρηνογένεση. Πρόκειται για μια αυθόρμητη οργάνωση της ύλης, που συντελείται κατά τυχαίο τρόπο, όταν δημιουργηθούν τοπικά οι κατάλληλες θερμοδυναμικές συνθήκες. Ο σχηματισμός του πρώτου αυτού πυρήνα είναι σημαντικός, γιατί από τη στιγμή που το μέγεθός του ξεπεράσει ένα κρίσιμο μέγεθος, γίνεται ευσταθής και τείνει να μεγαλώσει ακόμη περισσότερο οπότε και αναπτύσσεται η κρυσταλλική δομή.

Αν η πυρηνογένεση συμβεί στο εσωτερικό της αρχικής φάσης (στη περίπτωση που εξετάζεται στην υγρή φάση), ονομάζεται ομοιογενής πυρηνογένεση. Αυτού του είδους η πυρηνογένεση είναι αρκετά σπάνια, γιατί απαιτείται η δημιουργία σχετικά μεγάλου κρίσιμου πυρήνα. Αντίθετα, η ετερογενής πυρηνογένεση λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια δύο φάσεων, όπως η διεπιφάνεια στερεού-υγρού και χρειάζεται πολύ



μικρότερη ενέργεια ενεργοποίησης ή αντίστοιχα μικρότερο κρίσιμο πυρήνα σύμφωνα με τη κλασική θεωρία πυρηνογένεσης. Έτσι, κατά κύριο λόγο, η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου παρατηρείται σε στερεές επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή με τη ροή του νερού με τη μορφή καθαλατώσεων. Η ετερογενής πυρηνογένεση είναι ο βασικός μηχανισμός καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου, καθώς ακόμη και μικροσκοπικά σωματίδια (σκουπίδια) εντός της ροής του νερού μπορούν να αποτελέσουν πυρήνες κρυστάλλωσης.

Ο ακριβής μηχανισμός, με τον οποίο λαμβάνει χώρα η ετερογενής πυρηνογένεση δεν είναι γνωστός, αλλά θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων των ιόντων του διαλύματος και του στερεού υποστρώματος στη διεπιφάνεια υποστρώματος/διαλύματος. Τα ιόντα από τα οποία προκύπτει το στερεό ίζημα, προσροφούνται αρχικά στην ξένη επιφάνεια και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η επιφανειακή πυρηνογένεση [9].



Σχήμα 4-1

Σχηματικές απεικονίσεις για αντίδραση διάλυσης ασβεστίτη. α) πρωτόνιο που διαχωρίζεται από μόριο νερού διαχέεται στην επιφάνεια του κρυστάλλου ασβεστίτη· β) Το πρωτόνιο αντιδρά με μόριο ασβεστίτη για την παραγωγή ιόντων ασβεστίου και ανθρακικού άλατος.

Η αντίδραση συμβαίνει και προς την αντίστροφη κατεύθυνση, οπότε και σχηματίζεται ασβεστίτης.

#### 4.1.2 Πολυμορφισμός του CaCO<sub>3</sub>

Ο κρυσταλλικός πολυμορφισμός ορίζεται ως η δυνατότητα μιας ουσίας, με σταθερή χημική σύσταση, να υφίσταται σε περισσότερες από μία κρυσταλλικές δομές. Δομικά, τα διαφορετικά πολύμορφα, διαφέρουν ως προς τη διάταξη των ατόμων ή των

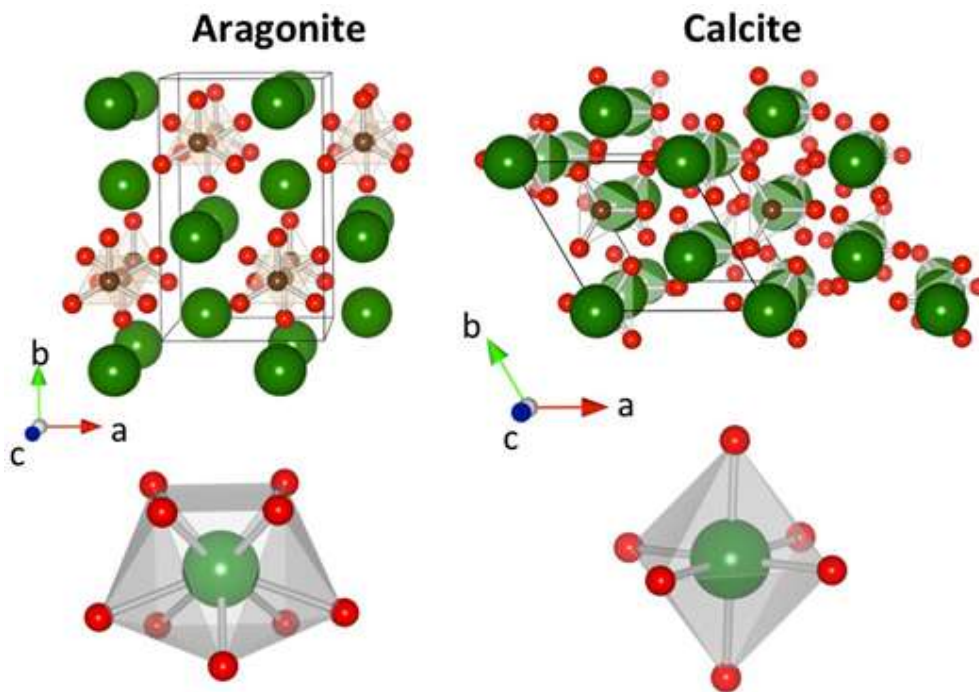
ατομικών τους ομάδων στο κρυσταλλικό τους πλέγμα. Ο λόγος για τον οποίο μια ουσία, με σταθερή χημική σύνθεση, εμφανίζεται με διαφορετικές δομικές διατάξεις είναι ότι ορισμένοι ατομικοί σχηματισμοί αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερες (ή μικρότερες) εσωτερικές δομικές ενέργειες από άλλους.

Η σχετική εσωτερική ενέργεια ενός συγκεκριμένου πολύμορφου εξαρτάται από τη πίεση και τη θερμοκρασία και γι' αυτό σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, από τις πολλές πιθανές φάσεις, μόνο εκείνη με τη χαμηλότερη ελεύθερη ενέργεια Gibbs είναι θερμοδυναμικά ευσταθής. Όλες οι άλλες φάσεις, για τις ίδιες συνθήκες, είναι ασταθείς (μετασταθείς) και τείνουν να μετατραπούν στην ευσταθή φάση. Ωστόσο, δεδομένων των συνθηκών, η μετάβαση από την ασταθή στην ευσταθή φάση μπορεί να είναι οσοδήποτε αργή και στη περίπτωση του αραγωνίτη, ο ρυθμός της μετατροπής του σε ασβεσίτη, είναι πρακτικά αμελητέος σε συνθήκες περιβάλλοντος [4, 10, 11].

Από θερμοδυναμική άποψη, η κινητήρια δύναμη για το σχηματισμό των διαφόρων πολυμορφικών φάσεων του ανθρακικού ασβεστίου είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs, για τη μετάβαση από το υπέρκορο διάλυμα στην κατάσταση ισορροπίας. Ο σχηματισμός μιας κρυσταλλικής φάσεως επηρεάζεται τόσο από τη θερμοδυναμική όσο και από την κινητική της καταβυθίσεως. Η ταυτοποίηση της αρχικά καταβυθιζόμενης φάσης και η μελέτη της κινητικής του σχηματισμού της είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση του μηχανισμού δημιουργίας των εναποθέσεων σε συνθήκες πρακτικού ενδιαφέροντος [9].

Το ανθρακικό ασβέστιο δημιουργείται όταν ιόντα ασβεστίου αντιδρούν με ανθρακικά ιόντα εντός ενός υδατικού διαλύματος και δημιουργούν κρυσταλλικές δομές οι οποίες λαμβάνουν τη μορφή τριών άνυδρων πολύμορφων. Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ο ασβεσίτης είναι το πιο ευσταθές πολύμορφο του  $\text{CaCO}_3$ , με ρομβοεδρική-εξαγωνική συμμετρία και αποτελεί το πιο συχνό τρόπο κρυστάλλωσης του  $\text{CaCO}_3$  στη φύση. Ο αραγωνίτης έχει ορθορομβική κρυσταλλική δομή με χαμηλότερη συμμετρία και δημιουργεί κρυστάλλους με χαρακτηριστικό βελονοειδές σχήμα. Σε ατμοσφαιρική πίεση και ανεξαρτήτως θερμοκρασίας, ο αραγωνίτης είναι μια μετασταθής μορφή που σταδιακά μετατρέπεται σε ασβεσίτη. Ωστόσο, σχηματισμοί

ανθρακικού ασβεστίου με τη μορφή του αραγωνίτη, απαντώνται αρκετά συχνά στη φύση, καθώς υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί όπως η ύπαρξη ιόντων μαγνησίου στο νερό ή η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, που καθιστούν αυτό το πολύμορφο μια πρώιμη μορφή κρυστάλλωσης. Έτσι αν και μετασταθής, με τις κατάλληλες θερμοδυναμικές συνθήκες, ο αραγωνίτης μπορεί να αποτελέσει τη κυρίαρχη μορφή κρυστάλλωσης με την οποία συντελείται η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου εντός της ροής του νερού και μάλιστα όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αλλαγή φάσης από αραγωνίτη σε ασβεστίτη συντελείται με αμελητέο ρυθμό για συνθήκες περιβάλλοντος [12, 13, 14]. Το κατώτερο ηλεκτρονιακό επίπεδο για τη κρυσταλλική δομή του αραγωνίτη βρίσκεται πιο ψηλά από το αντίστοιχο για το ασβεστίτη κατά 28eV περίπου. Όπως έχει παρατηρηθεί, ο αραγωνίτης δεν προσκολλάται στις επιφάνειες των σωληνώσεων με αρκετά ισχυρούς χημικούς δεσμούς όπως ο ασβεστίτης, με αποτέλεσμα να παρασύρεται από τη ροή του νερού [12].

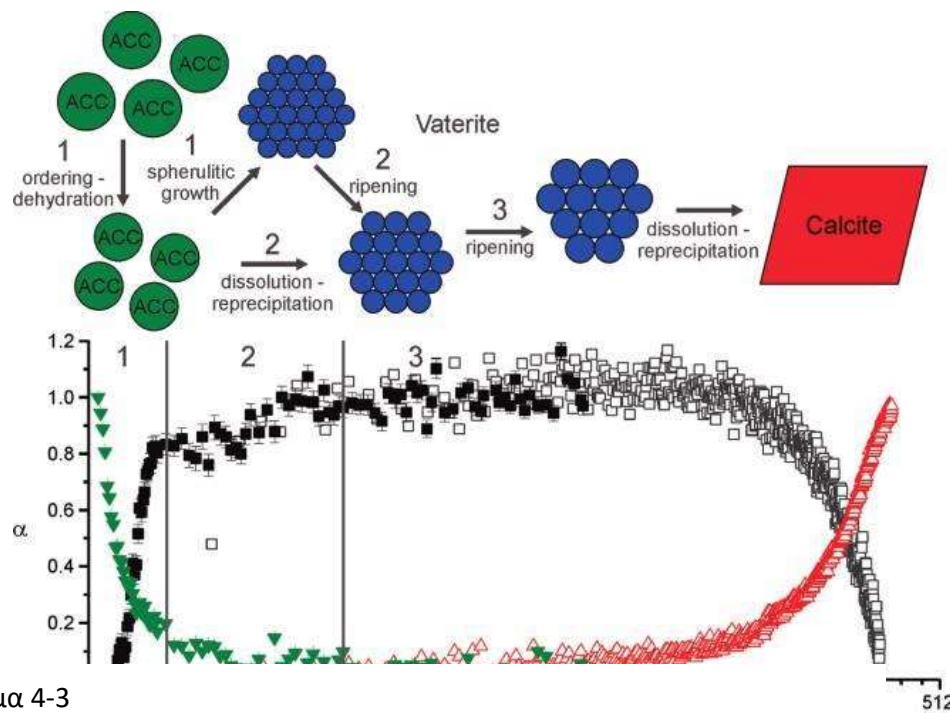


Σχήμα 4-2

Σύγκριση κρυσταλλικού πλέγματος ασβεστίτη-αραγωνίτη - Διακρίνονται τα διανύσματα βάσης για τις μοναδιαίες κυψελίδες του πλέγματος

Ο βατερίτης είναι, όπως και ο αραγωνίτης, μια μετασταθής μορφή του  $\text{CaCO}_3$  η οποία παρουσιάζει εξαγωνική συμμετρία (διαφορετική από αυτή του ασβεστίτη) και όταν βρεθεί σε επαφή με το νερό μετατρέπεται σταδιακά σε ασβεστίτη ή αραγωνίτη,

ανάλογα με τη θερμοκρασία. Είναι πιο ασταθής μορφή από τον αραγωνίτη και γι' αυτό διαθέτει μεγαλύτερη διαλυτότητα στο νερό σε σχέση με τα άλλα δύο πολύμορφα. Σε υψηλούς βαθμούς υπερκορεσμού, όπου γίνεται αυθόρμητη καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου, ο βατερίτης αποτελεί μια πρώιμη μορφή κρυστάλλωσης, ακόμη και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (25°C). Γενικότερα, σε περιπτώσεις όπως ο υπερκορεσμός, όπου η κρυστάλλωση με τη μορφή του ασβεστίτη ή του αραγωνίτη έχει σαν πρώτο στάδιο τη συσσωμάτωση άμορφων κόκκων CaCO<sub>3</sub>, παρατηρείται ότι σαν ενδιάμεσο στάδιο λειτουργεί ο σχηματισμός δομών βατερίτη [15, 16].

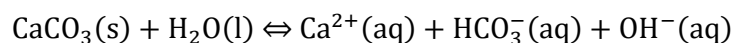


Σχήμα 4-3

Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας δομών ασβεστίτη από τη συσσωμάτωση άμορφων κόκκων CaCO<sub>3</sub> με ενδιάμεσο στάδιο το σχηματισμό βατερίτη.

#### 4.2. Καταβύθιση του CaCO<sub>3</sub> εντός της ροής του νερού, παρουσία του μαγνητικού πεδίου

Η κύρια αντίδραση που εμπλέκεται στην καταβύθιση του CaCO<sub>3</sub> διέπεται από την εξίσωση της ασβεστο-ανθρακικής ισορροπίας [17]:

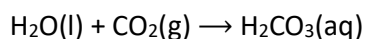


Το νερό που προέρχεται από φυσικές πηγές, ωστόσο, περιέχει ανθρακικό ασβέστιο με τη μορφή του όξινου ανθρακικού ασβεστίου  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Η αντίδραση της διάλυσης του ανθρακικού ασβεστίου στο νερό, παρουσία διοξειδίου του άνθρακα, είναι [18]:

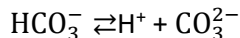
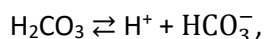


Ανάλογα με τη θερμοκρασία, τη συγκέντρωση ιόντων, το pH και το ρυθμό ροής του διαλύματος, η παραπάνω ισορροπία μπορεί να μετατοπιστεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Το φαινόμενο της καθαλάτωσης εντείνεται περισσότερο σε ζεστό νερό επειδή η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού και έχει σαν συνέπεια την καταβύθιση  $\text{CaCO}_3$ .

Η παραπάνω ισορροπία εξαρτάται από το pH. Ένα μικρό μέρος του διαλυμένου  $\text{CO}_2$  σχηματίζει ανθρακικό οξύ,



το οποίο διασπάται ασθενώς στα επόμενα δυο στάδια που καθορίζουν και την τιμή του pH:



Όταν διαλυμένα ιόντα υδρογόνου εξουδετερώνονται με την προσθήκη ενός ιόντος υδροξυλίου, το διάλυμα τείνει να επαναφέρει την ισορροπία με υψηλότερες συγκεντρώσεις ιόντων  $\text{HCO}_3^-$  και  $\text{CO}_3^{2-}$ . Επειδή η διαλυτότητα του  $\text{CaCO}_3$  εξαρτάται ευθέως από την συγκέντρωση του  $\text{CO}_3^{2-}$ , η αύξηση του pH προκαλεί την καταβύθισή του [18].

Η διαδικασία της καταβύθισης του  $\text{CaCO}_3$  τόσο στο εσωτερικό του νερού, όσο και στις επιφάνειες οι οποίες έρχονται σε επαφή με το νερό, είναι μια αρκετά σύνθετη διαδικασία που συντελείται σε αρκετά στάδια και εξαρτάται από παράγοντες, όπως οι συγκεντρώσεις των διαφόρων ιόντων, το δυναμικό των επιφανειών, ή και τα χαρακτηριστικά της ροής αν πρόκειται για τρεχούμενο νερό. Πιο συγκεκριμένα, ιόντα ασβεστίου ( $\text{Ca}^{2+}$ ) έρχονται σε επαφή με ανθρακικά ιόντα ( $\text{CO}_3^-$ ) και δημιουργούν χαλαρές δομές από ιοντικά ζεύγη, η πολυπλοκότητα των οποίων αυξάνεται με τον υπερκορεσμό. Η διαμόρφωση των ζευγών αυτών, οδηγεί στη σταδιακή απομάκρυνση των μορίων νερού που παρεμβάλλονται μεταξύ των ιόντων και επιτρέπει το

σηματισμό πιο συμπαγών μορφών, που είναι οι ένυδροι άμορφοι ή εξαγωνικοί κρύσταλλοι  $\text{CaCO}_3$ . Οι ασταθείς ένυδρες μορφές δίνουν τελικά τη θέση τους στα τρία συνήθη άνυδρα πολύμορφα του  $\text{CaCO}_3$  και ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή της καταβύθισης προκύπτει ασβεστίτης, αραγωνίτης ή βατερίτης που είναι το πιο ασταθές και σταδιακά μετατρέπεται σε μία από τις προηγούμενες μορφές [15, 16, 19].

Από τις έρευνες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, είναι γνωστό πως η επιβολή του μαγνητικού πεδίου στο νερό, επηρεάζει κατά κάποιο τρόπο τη διαδικασία της καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου. Ορισμένοι από τους μηχανισμούς που έχουν προταθεί και βάσει των οποίων μπορεί να ερμηνευθεί η θετική επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο πρόβλημα της συσσώρευσης των καθαλατώσεων  $\text{CaCO}_3$ , είναι οι εξής [20, 19]:

- Αλλαγές στη δομή του νερού λόγω του μαγνητικού πεδίου, όπως π.χ. το φαινόμενο μνήμης του νερού.
- Επίδραση των ρύπων που εισάγονται από μαγνητικά επαγόμενη διάβρωση σε συνδυασμό με φαινόμενα της διεπιφάνειας<sup>3</sup>.
- Αύξηση του ρυθμού της ομοιογενούς πυρηνογένεσης του  $\text{CaCO}_3$  στο νερό, εις βάρος της ετερογενούς πυρηνογένεσης στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού<sup>4</sup>.
- Υδροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της ροής<sup>5</sup>, σε συνδυασμό με φαινόμενα της διεπιφάνειας<sup>3</sup>.
- Ενισχυτικός μηχανισμός που επιτρέπει την απόδοση ενέργειας από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μέσω της τυρβώδους ροής, στις αυθόρμητα εμφανιζόμενες διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου εντός της ροής. Το ενισχυτικό αυτό φαινόμενο, λαμβάνει χώρα σε περιοχές κοντά στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού όπου

---

<sup>3</sup> Με τον όρο φαινόμενα της διεπιφάνειας εννοούνται τα φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με τη διπλή ηλεκτρική στοιβάδα που σχηματίζεται σε επιφάνειες οι οποίες εκτίθενται στο νερό. Η δομή της διπλής στοιβάδας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρικά δυναμικά που εμφανίζονται σε διεπιφάνειες στερεού-υγρού και συνεπώς τη κινητική της καταβύθισης του  $\text{CaCO}_3$ .

<sup>4</sup> Με βάση τις σύγχρονες θεωρίες κρυστάλλωσης, οποιαδήποτε επίδραση στην ετερογενή πυρήνωση θα είχε χρόνο χαλάρωσης της τάξης των νανοδευτερολέπτων και η ομοιογενής πυρήνωση θα ήταν απίθανη, ακόμη και μετά από έκθεση σε σχετικά ισχυρά (0.5 T) μαγνητικά πεδία [12].

<sup>5</sup> Τοπικά μπορούν να αναπτυχθούν ισχυρά μαγνητικά πεδία εντός της ροής, τα οποία μεταβάλλουν τη θερμοδυναμική ισορροπία του συστήματος και κατ' επέκταση την κρυσταλλική δομή των καταβυθιζόμενων σωματιδίων [40, 31]. Τη δημιουργία τοπικών ισχυρών μαγνητικών πεδίων εντός της ροής υποστηρίζει και η επόμενη θεώρηση [20, 12], μολονότι, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, η αυθόρμητη εμφάνιση αυτών των πεδίων δεν αρκεί για να δικαιολογήσει την υφιστάμενη αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, κάτω από τις συνθήκες που έχει παρατηρηθεί.

παρατηρείται έντονη κίνηση των ιόντων<sup>3</sup> και ευνοεί την επικράτηση του αραγωνίτη έναντι του ασβεστίτη στη μορφή των καταβυθιζόμενων σωματιδίων κοντά στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού. Παράλληλα, θεωρείται ότι μεταβάλλει τη φάση των υπάρχουσών επιφανειακών δομών ασβεστίτη οι οποίες σταδιακά μετατρέπονται σε αραγωνίτη με αποτέλεσμα να παρασύρονται από τη ροή του νερού<sup>6</sup>.

Σε αυτό το σημείο μπορούν να γίνουν ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με το φαινόμενο της καταβύθισης του  $\text{CaCO}_3$  υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, με τις οποίες φαίνεται να συμφωνεί (ή τουλάχιστον δε διαφωνεί) το σύνολο των ερευνών της βιβλιογραφίας.

Εν γένει:

- Το στατικό μαγνητικό πεδίο μειώνει τη ποσότητα των καθυλάσεων (ασβεστίτης) [18, 21, 22, 23]
- η επίδραση του μαγνητικού πεδίου γίνεται πιο εμφανής εάν η κατεύθυνσή του είναι περίπου ορθογώνια προς την κατεύθυνση της ροής [24]
- Διάταξη όπου διαδοχικά ζευγάρια μαγνητών τοποθετούνται με εναλλασσόμενη πολικότητα επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα, συγκριτικά με μια διάταξη όπου διαδοχικά ζευγάρια μαγνητών τοποθετούνται με τις ίδιες πολικότητες [25, 18, 26]. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει ότι οι απότομες μεταβάσεις στη φορά του μαγνητικού πεδίου διαταράσσουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διαδικασία καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου.
- Η καταβύθιση του  $\text{CaCO}_3$  στις επιφάνειες από τις οποίες διέρχεται η ροή συμβαίνει κατά κύριο λόγο με τη μορφή του αραγωνίτη, αντί για του ασβεστίτη, όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου υπερβαίνει ένα κατώφλι [12, 21, 27, 23]. Ακόμη και για μη τυρβώδη ροή, ο ρυθμός ανάπτυξης του ασβεστίτη καταστέλλεται σημαντικά με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου, όταν το νερό είναι χαμηλού pH και σε χαμηλά επίπεδα υπερκορεσμού σε  $\text{CaCO}_3$  [23]. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία

---

<sup>6</sup> Πόρισμα της βασικής έρευνας στην οποία στηρίχθηκε η παρούσα εργασία [20, 12]. Η κατώτερη ενεργειακή στάθμη του αραγωνίτη είναι έως και 28 eV πάνω από τη κατώτερη ενεργειακή στάθμη του ασβεστίτη και γι' αυτό το λόγο τα ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  και  $(\text{CO}_3)^{2-}$  θα πρέπει να έχουν υψηλότερη κινητική ενέργεια για να υπερνικήσουν τις απωστικές δυνάμεις του φράγματος δυναμικού. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη λόγω της επίδρασης του μαγνητικού πεδίου θα συζητηθούν στη συνέχεια της εργασίας.

διαλυμένων αλάτων NaCl και Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> στο νερό, παρεμποδίζει τη δράση του μαγνητικού πεδίου. Η παρουσία των ιόντων που παράγονται, επηρεάζει τη μορφολογία με την οποία καταβυθίζεται το CaCO<sub>3</sub> στη διεπιφάνεια στερεού-υγρού και ευνοεί την ανάπτυξη του βατερίτη έναντι του ασβεστίτη [28].

- Το όριο, πέρα από το οποίο, η καταβύθιση του CaCO<sub>3</sub> συμβαίνει κυρίως με τη μορφή του αραγωνίτη, είναι κοντά στα 400mT, για απιονισμένο νερό με τεχνητή προσθήκη ανθρακικού ασβεστίου [20, 12, 21].
- Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει, ότι ακόμη και για μαγνητικά πεδία αρκετά μικρότερης έντασης (300mT, 35.6mT, 15mT), η συσσώρευση του ασβεστίτη σε διεπιφάνειες στερεού-υγρού μπορεί να περιοριστεί σημαντικά. Το παραπάνω όριο, αναφέρεται στο γεγονός ότι υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο, πέρα από το οποίο ο αραγωνίτης είναι η κύρια μορφή κρυστάλλωσης του ανθρακικού ασβεστίου [20, 23].
- Ο αραγωνίτης δε προσκολλάται με ισχυρούς δεσμούς στο υπόστρωμα, με συνέπεια οι καθαλατώσεις ανθρακικού ασβεστίου να αποτελούνται ως επί το πλείστον από ασβεστίτη, καθώς ο αραγωνίτης παρασύρεται από τη ροή [12, 21].
- Το μαγνητικό πεδίο επηρεάζει τη δομή διπλής ηλεκτρικής στοιβάδας (stern potential, zeta potential [12, 21, 19, 25] (τροποποιημένη ενυδάτωση), οπότε και την κινητική της καταβύθισης του CaCO<sub>3</sub> [12, 29, 19, 28, 25].
- Πιο συγκεκριμένα, έχει δειχθεί πως η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου χαμηλώνει το δυναμικό ζ στην επιφάνεια των σχηματισμών του ανθρακικού ασβεστίου [12].

Σε σχέση με το χρόνο έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο:

- Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης της ροής του νερού στο μαγνητικό πεδίο και μάλιστα η αύξηση του χρόνου έκθεσης του νερού είναι θετικά συσχετισμένη με την επίδραση που έχει η εφαρμογή του πεδίου [12, 21, 27, 23, 19, 3].
- Υπάρχει ένα μέγιστο χρονικό όριο, πέρα από το οποίο, η έκθεση του νερού στο μαγνητικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει το φαινόμενο. Ο κορεσμός αυτός συμβαίνει γρηγορότερα, με την αύξηση της έντασης του πεδίου [27, 23, 3].
- Φαινόμενο μνήμης του νερού: Γίνεται λόγος για μαγνήτιση του νερού, καθώς η επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο νερό, εφόσον αυτό προέρχεται από κλειστό



υδραυλικό δίκτυο, διατηρείται ακόμη και για ώρες μετά τη παύση του πεδίου [20, 21, 23, 3].

Σε σχέση με τη ταχύτητα ροής και την ανάπτυξη (ή όχι) τύρβης:

- Η απόδοση της επεξεργασίας αυξάνεται με το ρυθμό ροής νερού στη σωλήνωση και με το χρόνο έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο [19].
- Υπάρχει η βέλτιστη ταχύτητα όπου η αποτελεσματικότητα του μαγνητικού πεδίου είναι μέγιστη. Ως εκ τούτου, όταν η ταχύτητα ροής αυξάνεται υπερβολικά, ο χρόνος παραμονής είναι πολύ σύντομος και η μαγνητική επεξεργασία καθίσταται αναποτελεσματική [22, 17].

Τέλος, σημαντικό ρόλο στη διαδικασία καταβύθισης του ανθρακικού ασβεστίου παίζουν η τραχύτητα και το υλικό του υποστρώματος από όπου διέρχεται η ροή του νερού. Παρόλο που οι περισσότεροι συγγραφείς συμφωνούν ότι το υλικό των επιφανειών επηρεάζει τη διαδικασία, δε φαίνεται να συμφωνούν όσον αφορά τους μηχανισμούς που εμπλέκονται, καθώς και στο είδος του υλικού που ενισχύει τη δράση του πεδίου [12, 26, 23].

#### **4.3. Το φαινόμενο της αλλαγής φάσης του $\text{CaCO}_3$ στα οριακά στρώματα της ροής λόγω της επιβολής μαγνητικού πεδίου**

Όπως έχει παρατηρηθεί, η επιβολή του μαγνητικού πεδίου, σε ένα τμήμα της ροής του νερού, ευνοεί τη καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου με τη μορφή του αραγωνίτη εις βάρος του ασβεστίτη. Το ποσοστό του αραγωνίτη, στο σύνολο των καταβυθίσεων (στις οποίες περιέχεται και βατερίτης), αυξάνεται σημαντικά όταν η ένταση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από 400mT περίπου, ενώ για ένταση 1.2T, ο αραγωνίτης είναι η κυρίαρχη μορφή κρυστάλλωσης του  $\text{CaCO}_3$  [20, 12].

Μια ερμηνεία που μπορεί να δοθεί από τη σκοπιά της κλασικής θεώρησης του ηλεκτρομαγνητισμού και της υδροδυναμικής για το φαινόμενο αυτό, είναι η εξής:

Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της ροής, που έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των τυχαίων διαταραχών του μαγνητικού πεδίου και την απόδοση ενέργειας στη κινητική της καταβυθίσεως, συντελείται μέσω του

συντονισμού του μαγνητικού πεδίου με τις συχνότητες των περιδινήσεων της τυρβώδους ροής [12].

Η αντίστοιχη ερμηνεία από τη σκοπιά της κβαντομηχανικής, είναι ότι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και ενός τρόπου ταλάντωσης του μαγνητικού πεδίου, συντελείται μέσω της στροφορμής των μορίων του νερού.

Πιο αναλυτικά:

Ένας τρόπος διακύμανσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο κενό, μπορεί να ενισχυθεί, για σύντομο χρονικό διάστημα, με την απορρόφηση της ενέργειας από έναν εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, υπό την προϋπόθεση ότι είναι σε σύζευξη με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα σε δυο ενεργειακές στάθμες περιστροφής ενός μοναδικού μοριακού στροφέα νερού.

Το θεωρητικό αυτό μοντέλο αναφέρεται στο μη συμφασικό τρόπο ενίσχυσης των αυθόρμητων μαγνητικών διακυμάνσεων και προβλέπει ότι το κέρδος είναι υψηλό όταν το μαγνητικό πεδίο βρίσκεται σε συντονισμό με τις περιστροφικές συχνότητες μορίων νερού ή αλυσίδων από μόρια νερού ή/και τις χαμηλές συχνότητες της τυρβώδους ροής [12].

Σημαντική υπόθεση των παραπάνω μοντέλων είναι ότι σε περιοχές κοντά στην αγωγίμη επιφάνεια του υποστρώματος, αναπτύσσονται ισχυρά ηλεκτροκινητικά φαινόμενα λόγω της ύπαρξης των ιόντων.

Ωστόσο, οι ερμηνείες αυτές δεν επαρκούν για να εξηγήσουν την αλλαγή φάσης από ασβεσίτη σε αραγωνίτη που συμβαίνει όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μικρότερη από το προβλεπόμενο όριο ενίσχυσης των τυχαίων διακυμάνσεων (~400mT). Συγκεκριμένα, ακόμη και για εντάσεις 36mT ή 15mT, το ποσοστό του αραγωνίτη εμφανίζεται αυξημένο, στο σύνολο των καταβυθιζόμενων σωματιδίων, σε σχέση με το ποσοστό χωρίς το πεδίο [20, 23].

Αυτό σημαίνει ότι όταν η ένταση του πεδίου είναι σχετικά μικρή, το φαινόμενο εμφανίζεται σποραδικά και έγκειται σε κάποια αυθόρμητη οργάνωση που συντελείται, σε μικροσκοπικό επίπεδο, στο εσωτερικό της ροής.

Η ερμηνεία αυτή απαιτεί μια διαφορετική προσέγγιση που δεν μπορεί να γίνει με τη χρήση του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού, μιας και οι εξισώσεις του Maxwell δε δίνουν

ικανοποιητικές απαντήσεις για τις αλληλεπιδράσεις που αφορούν πολύπλοκα συστήματα ατόμων ή μορίων.

Μια πιο συνεπής θεώρηση του φαινομένου, γίνεται μέσω της κβαντομηχανικής και δίνει μια ερμηνεία για την αλλαγή φάσης του  $\text{CaCO}_3$ , όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μικρή ( $\gg 400\text{mT}$ ), καθώς και για το φαινόμενο μνήμης του νερού.

Η αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη λόγω μαγνητικού πεδίου (Magnetic Crystal Phase Transition – MCPT) χαμηλής έντασης ερμηνεύεται με βάση τη σταθερότητα ενός ενισχυμένου τρόπου ταλάντωσης του μαγνητικού πεδίου, σε αλληλεπίδραση με ένα σύνολο μοριακών στροφών νερού. Ο ενισχυμένος τρόπος ταλάντωσης είναι παγιδευμένος στο επίπεδο της αντίστοιχης κατώτερης συνεκτικά αντισυμμετρικής κατάστασης (Coherent Antisymmetric State - CAS), επειδή στηρίζεται σε ένα σύνολο μεμονωμένων μοριακών στροφών νερού σε διεγερμένες ενεργειακές στάθμες περιστροφής. Ο ενισχυμένος τρόπος ταλάντωσης δεν εκπίπτει στην αντίστοιχη θεμελιώδη συνεκτική συμμετρική κατάσταση, επειδή η μετάβαση δεν επιτρέπεται. Το σύστημα οδηγείται σε θερμοδυναμική κατάσταση υψηλότερης ελεύθερης ενέργειας, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εντός της περιοχής συνοχής, η οποία είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος των επιμέρους μοριακών στροφών της τάξης λίγων  $\mu\text{m}$ . Η δημιουργία μιας CAS είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία και τις συγκρούσεις. Επιπλέον, τα αποτελέσματα μαγνητικής μνήμης του νερού, τα οποία διαρκούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα μετά τη διακοπή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, μπορούν να εξηγηθούν με βάση τον τρόπο δημιουργίας της CAS [20].

Η λεπτομερής ανάλυση του φαινομένου, όμως, σύμφωνα με τη σύγχρονη θεωρία, ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, η οποία ως βασικό στόχο έχει, τη παροχή ενδείξεων, ότι η επιβολή ενός μέτριας έντασης μαγνητικού πεδίου ( $\sim 300\text{mT}$ ) προκαλεί την απομάκρυνση των καθυστερήσεων του ασβεστίτη από τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή με τη ροή του νερού. Για το λόγο αυτό, από θεωρητικής πλευράς, είναι αρκετό σε μια ποιοτική προσέγγιση του φαινομένου, για την οποία αρκεί να δειχθεί ότι μέσω των μαγνητο-υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων στα οριακά στρώματα μιας τυρβώδους ροής, οι τυχαίες διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου

μπορούν να ενισχυθούν και να προκαλέσουν αλλαγές στη θερμοδυναμική ισορροπία του σχηματισμού του  $\text{CaCO}_3$ .

Από τη θεωρία είναι γνωστό, ότι η βασική ηλεκτρονιακή στάθμη του αραγωνίτη βρίσκεται ψηλότερα από εκείνη του ασβεστίτη κατά τουλάχιστον 28eV. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με τη πειραματική παρατήρηση ότι η δημιουργία του αραγωνίτη συμβαίνει σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, από τη σταδιακή πήξη τηγμένων πετρωμάτων. Η κατάσταση, όμως, είναι εντελώς διαφορετική όταν το ανθρακικό ασβέστιο βρίσκεται διαλυμένο στο νερό.

Η ενέργεια που απαιτείται για να καλύψει τη διαφορά ανάμεσα στα ηλεκτρονικά επίπεδα των δύο πολύμορφων του ανθρακικού ασβεστίου, μπορεί να δοθεί είτε από σταθερά μαγνητικά πεδία, είτε από χρονικά μεταβαλλόμενα. Σε αυτή τη περίπτωση, η πυκνότητα της ελεύθερης ενέργειας που βρίσκεται συγκεντρωμένη στη ροή ανά μονάδα όγκου, είναι μεγαλύτερη από την ελεύθερη ενέργεια απουσία του πεδίου [12].

Η ενεργειακή πυκνότητα στο χώρο ( $dE/dV$ ) για ένα τυπικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{dE}{dV} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\mu_0} B^2 + \epsilon_0 E^2 \right) \quad (4-1)$$

Όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,  $\mu_0$  και  $\epsilon_0$  είναι η μαγνητική επιτρεπτότητα και η ηλεκτρική διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου αντίστοιχα.

Παρουσία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, η ελεύθερη ενέργεια F ανά μονάδα όγκου, σε μοριακό επίπεδο, δίνεται από τη θερμοδυναμική εξίσωση:

$$F(T, P) = F_0(T, P) + \frac{dE}{dV} \quad (4-2)$$

όπου  $F_0(T, P)$  είναι η ελεύθερη ενέργεια χωρίς τη παρουσία ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων.

Ο σχηματισμός κρυστάλλων στη μία ή την άλλη μορφή εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες κρυστάλλωσης. Εάν για παράδειγμα μόνο ένα μόριο αραγωνίτη θα μπορούσε να σχηματιστεί κάπου στα όρια της ροής με μια στερεά επιφάνεια, η συσσώρευση ιόντων Ca και  $\text{CO}_3$  γύρω από τον αρχικό σπόρο κρυστάλλου θα ακολουθηθεί από κρυστάλλωση στην ίδια δομική μορφή. Επιπλέον, εάν η ενεργειακή πυκνότητα των 28

eV ανά μοριακό όγκο μπορούσε να παρασχεθεί στο μοριακό σύστημα, τότε η συσσώρευση πρόσθετων ιόντων Ca και CO<sub>3</sub> γύρω από τον αρχικό σπόρο, θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να δώσει δομικές μορφές κρυσταλλοποιημένες με εξαγωνική συμμετρία (αραγωνίτης).

Από τις παραπάνω εξισώσεις η απαιτούμενη ενέργεια για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ της κατώτερης ηλεκτρονικής στάθμης του ασβεστίτη και του αραγωνίτη μπορεί να παρασχεθεί από ένα στατικό μαγνητικό πεδίο ~45 Tesla μέσα σε μια τυπική διαπυρηνική απόσταση 0,5nm μεταξύ των ιόντων Ca και CO<sub>3</sub>. Αυτή η τιμή αντιστοιχεί σε ενεργειακή πυκνότητα ~10<sup>9</sup> Joule/m<sup>3</sup>. Τα προηγούμενα μακροχρόνια πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αραγωνίτης μπορεί να σχηματιστεί σε αγώγιμες επιφάνειες παρουσία στατικών ή χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων μικρότερων των 45 Tesla. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να σχηματιστεί αραγωνίτης λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά ενέργειας από το μαγνητικό πεδίο στο μοριακό σύστημα μέσω ενδιάμεσων ηλεκτρονικών καταστάσεων [30].

#### **4.3.1 Μαγνητο-υδροδυναμικές εξισώσεις για τη ροή του νερού σε στατικό μαγνητικό πεδίο**

Εάν ένα αγώγιμο υγρό κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, επάγονται ηλεκτρικά πεδία σε αυτό και παρατηρείται δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων. Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις σε αυτά τα ρεύματα και αντίστροφα, τα ίδια τα ρεύματα τροποποιούν το μαγνητικό πεδίο. Έτσι συμβαίνει μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των μαγνητικών και των υδροδυναμικών φαινομένων και η ροή πρέπει να εξεταστεί συνδυάζοντας τις εξισώσεις πεδίου με εκείνες της δυναμικής των υγρών.

Για να είναι αυστηρά εφαρμόσιμη η μαγνητοϋδροδυναμική, είναι φυσικά απαραίτητο οι χαρακτηριστικές αποστάσεις και τα χρονικά διαστήματα για την εν λόγω κίνηση να είναι πολύ μεγαλύτερες από τη μέση ελεύθερη διαδρομή και τον μέσο ελεύθερο χρόνο κίνησης των φορέων ρεύματος (ηλεκτρόνια ή ιόντα) [31].

Το νερό είναι διαμαγνητικό υλικό και η μαγνητική του επιτρεπτότητα είναι ελαφρώς μικρότερη της μονάδας. Για τους σκοπούς, ωστόσο, της ανάλυσης που ακολουθεί, θεωρείται η μαγνητική επιτρεπτότητα του νερού ίση με αυτή του κενού ( $\mu=\mu_0$ ). Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι το νερό είναι ένα ομοιογενές και ασυμπίεστο υγρό,

σταθερής αγωγιμότητας  $\sigma$  και σταθερής ηλεκτρικής διαπερατότητας  $\epsilon$ . Κατά συνέπεια από τις εξισώσεις (1-6), (1-7) και το νόμο του Ohm, προκύπτει:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} \quad \text{και} \quad \mathbf{M} = 0, \quad \mathbf{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\mathbf{E}$$

Αν στην εξίσωση (1-9) για τα αγώγιμα ρευστά με ιξώδες, αντικατασταθεί η ταχύτητα  $\mathbf{v}$  από την ταχύτητα  $\mathbf{u}$ , που παριστάνει την ταχύτητα του ρευστού σε ένα σωλήνα ροής, λαμβάνεται η μαγνητοϋδροδυναμική εξίσωση:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (4-3)$$

Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο αγώγιμο ρευστό, στη περίπτωση που εξετάζεται, πρόκειται ουσιαστικά για δυνάμεις Lorentz, οπότε από την (1-5) για ένα στοιχειώδες κομμάτι του ρευστού προκύπτει:

$$d\mathbf{F} = dq(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$$

Υποτίθεται συνεχής κατανομή φορτίων στον όγκο του ρευστού με πυκνότητα  $\varphi (=dq/dV)$  και από την παραπάνω εξίσωση με παραγωγή ως προς τον όγκο βρίσκεται η χωρική πυκνότητα των δυνάμεων Lorentz:

$$\mathbf{f} = \frac{d\mathbf{F}}{dV} = \varphi(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$$

Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που αντιστοιχεί στη κίνηση του ρευστού είναι

$$\mathbf{J} = \varphi\mathbf{u} \quad \text{και επομένως} \quad \mathbf{f} = \varphi\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

Αν διαχωριστούν τα “ελεύθερα” φορτία  $\rho_f$  από τα “δέσμια” φορτία  $\rho_b$ ,

$$\varphi = \rho_f + \rho_b = \rho_f - \nabla \cdot \mathbf{P}$$

Υποτίθεται ότι δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία ( $\rho_f=0$ ) και το νερό αντιμετωπίζεται ως μαγνητικό, ομογενές ιστροπικά και μη μαγνητικό υλικό, με σταθερή ηλεκτρική διαπερατότητα  $\epsilon$ . Έτσι,

$$\varphi = -\nabla \cdot \mathbf{P} = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon} - 1\right) \nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

από το νόμο του Gauss για τον ηλεκτρισμό και άρα

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

Τελικά, από το νόμο του Ampère,  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$  όπου  $\mathbf{J}$  το συνολικό ρεύμα (ελεύθερο + δέσμιο), η χωρική πυκνότητα των δυνάμεων Lorentz, εκφράζεται ως:

$$\mathbf{f} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$$

Η εξίσωση για την κίνηση του νερού υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου περιγράφεται από την εξίσωση Navier-Stokes (3-3) για ασυμπίεστη ροή και με δεδομένη την παραπάνω σχέση, γίνεται:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{\rho \mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (4-4)$$

Οι εξισώσεις (1-2), (4-3), (4-4) μαζί με τη συνθήκη της ασυμπίεστης ροής και την εξίσωση μεταφοράς θερμότητας αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύνολο εξισώσεων, το οποίο περιγράφει πλήρως την αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με τη ροή και την μεταφορά ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των αγώγιμων υγρών.

Σύμφωνα με τη θεωρία [20, 12, 30], στο εσωτερικό ενός αγώγιμου ρευστού υπάρχουν πάντα πολύ μικρές διαταραχές, ηλεκτρομαγνητικής φύσης, οι οποίες δε σχετίζονται με την ίδια τη ροή, αλλά με ηλεκτρομαγνητικές διακυμάνσεις κβαντικού τύπου που συμβαίνουν ακόμη και στο κενό χώρο. Το βασικό ερώτημα, που ενδιαφέρει, είναι εάν η παρουσία της τυρβώδους ροής μπορεί να λειτουργήσει ενισχυτικά πάνω στις τυχαίες διαταραχές ή αν με το πέρασμα του χρόνου τις καταστέλλει. Όπως θα φανεί από τις προτάσεις που ακολουθούν, η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα εξαρτάται από την ένταση του υφιστάμενου μαγνητικού πεδίου και από τις συνθήκες που επικρατούν στη ροή.

Όταν το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με τη ροή, η ενέργειά του διαχέεται μέσα στη ροή και τα ρεύματα τείνουν να μειώσουν το πεδίο. Από την άλλη, μπορεί να αποδειχθεί ότι όταν ένα υγρό βρίσκεται σε κίνηση, οι γραμμές των μαγνητικών δυνάμεων ακολουθούν τις γραμμές ροής και το μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογο με την πυκνότητα των γραμμών. Σε μια τυρβώδη ροή οποιαδήποτε δύο στοιχειώδη τμήματα ροής τείνουν να απομακρύνονται μεταξύ τους με την πάροδο του χρόνου, και ως εκ τούτου, καθώς οι γραμμές των μαγνητικών δυνάμεων αναδιπλώνονται, το μαγνητικό πεδίο ενισχύεται προϊόντος του χρόνου. Υπό ορισμένες συνθήκες, αυτές οι δύο αντίθετες τάσεις ισορροπούν η μία την άλλη και μπορεί να βρεθεί ένα κριτήριο που να διακρίνει τις δύο περιπτώσεις απόσβεσης ή ενίσχυσης των αυθόρμητων μαγνητικών πεδίων [30].

Το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την κίνηση της αγώγιμης ροής του νερού ασκεί αμελητέες δυνάμεις στη ροή, γεγονός που επιτρέπει να αγνοηθεί ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (4-4), που οφείλεται στις δυνάμεις Lorentz. Αυτό απλοποιεί περαιτέρω την μορφή της εξίσωσης:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{u}$$

Με τη χρήση της αλγεβρικής ταυτότητας  $\mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \frac{1}{2} \nabla(A^2) - (\mathbf{A} \cdot \nabla) \mathbf{A}$ , γίνεται

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(u^2) - \mathbf{u} \times (\nabla \times \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \cdot \nabla^2 \mathbf{u}$$

Η περιδίνηση της ταχύτητας ροής είναι  $\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{u}$  και εάν ληφθεί ο στροβιλισμός της παραπάνω σχέσης, γίνεται:

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \times \nabla(u^2) - \nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{\Omega}) &= -\frac{1}{\rho} \nabla \times \nabla P + \nu \cdot \nabla \times \nabla^2 \mathbf{u} \Rightarrow \\ \Rightarrow \nabla \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{\Omega}) &= \nu \cdot \nabla \times \nabla^2 \mathbf{u} \end{aligned}$$

Επειδή  $\nabla \times \nabla^2 \mathbf{u} = -\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{\Omega}) = -\nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{\Omega}) + \nabla^2 \boldsymbol{\Omega} = \nabla^2 \boldsymbol{\Omega}$ ,

$$(\nabla \cdot \boldsymbol{\Omega} = \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{u}) = 0)$$

και  $\nabla^2 \mathbf{u} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) = -\nabla \times \boldsymbol{\Omega}$ , επειδή στην ασυμπίεστη ροή  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ .

Τελικά καταλήγει στην:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\Omega}) + \nu \cdot \nabla^2 \boldsymbol{\Omega} \quad (4-5)$$

Αν  $\eta/\rho = 1/(\sigma\mu_0)$ , λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και της ροής (οπότε και της περιδίνησης  $\boldsymbol{\Omega}$ ), η ομοιότητα των εξισώσεων (4-3) και (4-5) υποδεικνύει πως  $\mathbf{B} = \text{σταθερά} \cdot \boldsymbol{\Omega}$ .

$\nu = \eta/\rho$  το κινηματικό ιξώδες και η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\nu \cdot \sigma \cdot \mu_0 = 1 \quad (4-6)$$

Η εξίσωση (4-6) περιγράφει τη κατάσταση ισορροπίας όπου οι απώλειες της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου, λόγω της διασποράς των επαγωγικών ρευμάτων εντός της ροής, αντισταθμίζονται από τη κατά τόπους ενίσχυση του πεδίου, λόγω της χαλάρωσης



των γραμμών ροής που συμβαίνει στους σχηματισμούς της τυρβώδους ροής. Στη κατάσταση ισορροπίας, η τιμή του μαγνητικού πεδίου θα πρέπει να είναι ανεξάρτητη της σταθεράς  $c$  στη σχέση αναλογίας μεταξύ  $\mathbf{B}$  και  $\mathbf{\Omega}$ , το οποίο συμβαίνει για μοναδική τιμή του  $B$ .

Η διάχυση της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου εντός της ροής, ελαττώνεται με την αύξηση της αγωγιμότητας  $\sigma$ . Αν η αγωγιμότητα του ρευστού υπερβεί τη τιμή του κατωφλίου, που βρίσκεται από τη σχέση (4-6), οι τυχαίες διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου μπορούν να ενισχυθούν και να επηρεάσουν τη θερμοδυναμική ισορροπία της καταβύθισης του  $\text{CaCO}_3$ , με την αύξηση της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Αυτό σημαίνει, ότι τα ιόντα που εμπλέκονται στο σχηματισμό του  $\text{CaCO}_3$  αποκτούν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και μπορούν να υπερβούν ευκολότερα το φράγμα δυναμικού για τη μετάβαση από τη δομή του ασβεστίτη σε αυτή του αραγωνίτη.

Αυτό συμβαίνει όταν,

$$\nu \cdot \sigma \cdot \mu_0 > 1$$

που είναι η συνθήκη κατωφλίου για το ρευστό

Ωστόσο, αν ληφθούν μερικές τυπικές τιμές για το ιξώδες και την αγωγιμότητα του νερού και ακολουθηθούν οι παραπάνω εκτιμήσεις για το φαινόμενο, συνάγεται το συμπέρασμα ότι σε κανονικές συνθήκες, μια αυθόρμητη ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου είναι μάλλον απίθανη. Πιο αναλυτικά,  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\sigma = 0.08 \text{ S/m}$ , για  $T = 20^\circ\text{C}$  οπότε ισχύει:

$$\nu \cdot \sigma \cdot \mu_0 \approx 10^{-13} \ll 1$$

Ωστόσο, κατά τη παραπάνω θεώρηση του φαινομένου δε λήφθηκαν καθόλου υπόψη τα ισχυρά ηλεκτροκινητικά φαινόμενα που εμφανίζονται κοντά σε αγώγιμες διεπιφάνειες στερεού-υγρού και επιπλέον παραβλέφθηκε ο ρόλος της τυρβώδους ροής, που μέσω των ειδικών σχηματισμών που δημιουργούνται στο εσωτερικό της, δρα ως ενισχυτικός παράγοντας για το μαγνητικό πεδίο.

#### **4.3.2 Ενεργειακή θεώρηση του φαινομένου και εκτιμήσεις**

Κοντά στην επιφάνεια ενός αγώγιμου σωλήνα και γύρω από οξείες ακμές, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να φτάσει μέχρι την υψηλή τιμή των  $10^6 \text{ V/m}$  [31]. Τέτοια υψηλά πεδία

τροποποιούν την ηλεκτρονική δομή των μορίων και συνήθως μειώνουν την ενεργειακή θέση των διεγερμένων ηλεκτρονικών καταστάσεων σε σχέση με την θεμελιώδη του κατάσταση. Ως εκ τούτου, αναμένεται ότι κοντά στις αγωγίμες επιφάνειες το απαιτούμενο ενεργειακό χάσμα μεταξύ των θεμελιωδών ηλεκτρονικών καταστάσεων μειώνεται περαιτέρω, και αυτό ίσως εξηγεί γιατί ο αραγωνίτης σχηματίζεται ακόμη και παρουσία μαγνητικών πεδίων χαμηλής έντασης. Το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο θα μπορούσε να ενισχυθεί περαιτέρω παρουσία μετάλλων [32].

Από τη θεωρία του Kolmogorov για την πλήρως ανεπτυγμένη τυρβώδη ροή, είναι γνωστό ότι υπάρχει συσχέτιση που συνδέει τις περιστροφικές ταχύτητες  $\Omega_1, \Omega_2$  για δύο σημεία του ρευστού, όταν τα δύο αυτά σημεία απέχουν απόσταση  $\lambda$ , που είναι μικρότερη από τη κλίμακα  $\lambda_0$ . Για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $\lambda_0$ , η συνάρτηση της συσχέτισης μεταξύ των  $\Omega_1, \Omega_2$  φθίνει με γρήγορους ρυθμούς, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \langle \Omega_1 \Omega_2 \rangle &\sim \lambda^{-4/3}, & \text{για } \lambda > \lambda_0 \\ \langle \Omega_1 \Omega_2 \rangle &\sim \text{σταθερή}, & \text{για } \lambda < \lambda_0 \end{aligned}$$

Από την ανάλυση στη προηγούμενη ενότητα, προκύπτει ότι τα μαγνητικά πεδία που εμφανίζονται από την ενίσχυση των αυθόρμητων ηλεκτρομαγνητικών διακυμάνσεων, εμφανίζουν αντίστοιχης μορφής συσχέτιση και για αποστάσεις μεγαλύτερες από  $\lambda_0$ , η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματά τους είναι πρακτικά τυχαία. Από αυτό προκύπτει, ότι ο τελευταίος όρος (της δύναμης Lorentz) από την εξίσωση Navier-Stokes, είναι της τάξης:  $\frac{1}{\rho\mu_0} \frac{B^2}{\lambda_0}$

Για περιοχές της ροής μεγέθους  $\lambda$ , ο όρος  $(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$  της εξίσωσης Navier-Stokes, που εκφράζει τη διάχυση, έχει τάξη μεγέθους  $\sim \frac{\Delta u_\lambda^2}{\lambda}$

Σύμφωνα με την θεωρία για την τυρβώδη ροή ισχύουν οι σχέσεις (3-5) και (3-7), οπότε:

- Καθώς η κλίμακα  $\lambda$  μεγαλώνει στο εύρος της περιοχής διάχυσης ( $\lambda < \lambda_0$ ), το  $\frac{\Delta u_\lambda^2}{\lambda}$  αυξάνεται με ρυθμό αναλογίας  $\lambda$

- Καθώς η κλίμακα  $\lambda$  μειώνεται στο εύρος της αδρανειακής περιοχής ( $\lambda > \lambda_0$ ), το  $\frac{\Delta u_\lambda^2}{\lambda}$  αυξάνεται με ρυθμό αναλογίας  $\frac{1}{\sqrt[3]{\lambda}}$  και η μεγαλύτερη τιμή επιτυγχάνεται για  $\lambda \sim \lambda_0$ .

Όταν ο όρος  $(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$  είναι συγκρίσιμος με τον όρο για τη δύναμη Lorentz, ισχύει:

$$B^2 \sim \Delta u_\lambda^2 \cdot \rho \cdot \mu_0$$

Από αυτή την εξίσωση συνάγεται ότι η ενεργειακή πυκνότητα των αυθόρμητων μαγνητικών πεδίων σε μια τυρβώδη ροή, καθώς αναπτύσσονται μέσα στον όγκο  $\sim \lambda_0^3$ , είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την κινητική ενέργεια της ροής μέσα στον ίδιο όγκο. Λαμβάνοντας υπόψη τώρα τη ροή ενός αγώγιμου υγρού στα όρια μιας επιφάνειας με ασυνέχειες τυπικών διαστάσεων της τάξης του  $\sim 1\mu\text{m}$ , και μια αλλαγή της ταχύτητας τυρβώδους ροής σε μια απόσταση  $\lambda_0$  της τάξης  $10\text{m/s}$ , η ενεργειακή πυκνότητα των αυθόρμητων μαγνητικών πεδίων προκύπτει ότι είναι περίπου  $10^5 \text{ J/m}^3$ . Ομοίως, ο αριθμός  $R$  του Reynolds εκτιμάται ότι είναι  $R=10$ , και συνεπώς  $\lambda_0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ . Είναι προφανές επομένως ότι για να είναι η ενεργειακή πυκνότητα του αυθόρμητου μαγνητικού πεδίου της τάξης  $\sim 10^9 \text{ J/m}^3$ , που απαιτείται για να γεφυρώσει τη διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο μορφών  $\text{CaCO}_3$ , η τυρβώδης ροή θα πρέπει να παράγει τιμές μεταβολής ταχυτήτων της τάξης  $10^3 \text{ m/s}$ . Τέτοιες τιμές των αλλαγών ταχύτητας θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο στα όρια μιας αγώγιμης επιφάνειας από την επιτάχυνση ιόντων από τα κατοπτρικά τους φορτία στην αγώγιμη επιφάνεια.

# Πειραματικό Μέρος

## Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός του πειράματος

Κύρια επιδίωξη του πειράματος είναι η παραγωγή ενδείξεων ότι η επιβολή του μαγνητικού πεδίου στη ροή του νερού, μεταβάλλει τη θερμοδυναμική ισορροπία σε διεπιφάνεια στερεού-υγρού, με αποτέλεσμα την αλλαγή φάσης από ασβεσίτη σε αραγωνίτη για τις ήδη υπάρχουσες δομές ανθρακικού ασβεστίου και κατά συνέπεια τη σταδιακή τους αποδόμηση.

### 5.1. Σχεδιασμός της διάταξης

#### 5.1.1 Δοκίμια

Γενικά όταν γίνεται αναφορά στον όρο διεπιφάνεια στερεού-υγρού, όσον αφορά το φαινόμενο που μελετάται, εννοείται η περιοχή κοντά στην επιφάνεια των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Ιδανικά θα ήταν επιθυμητό, η μελέτη του φαινομένου να αναφέρεται στην αλλαγή φάσης ασβεσίτη-αραγωνίτη που συμβαίνει στην επιφάνεια ενός αγωγού. Ωστόσο, η ενσωμάτωση τμήματος αγωγού με επικαθίσεις ανθρακικού ασβεστίου στη διάταξη δεν ήταν πρακτική για δύο κυρίως λόγους:

Αφενός, η εύρεση σωλήνα στο κατάλληλο μέγεθος και από το κατάλληλο υλικό (ώστε να δημιουργείται στο εσωτερικό του τυρβώδης ροή και η ένταση του υφιστάμενου μαγνητικού πεδίου να είναι υψηλή) ήταν δύσκολη και αφετέρου μετρήσεις ακριβείας όπως απαιτεί το ευαίσθητο αυτό φαινόμενο, δε μπορούν πρακτικά να γίνουν για τη ποσότητα των εναποθέσεων στο εσωτερικό του αγωγού.

Έτσι, για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη δοκιμίων τα οποία τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό του αγωγού και αναμενόταν η συμπεριφορά του φαινομένου στην επιφάνειά τους να είναι αντίστοιχη με αυτό που συντελείται στην επιφάνεια ενός αγωγού.

Το ένα είδος πρόκειται για αυτούσιες δομές ασβεσίτη, για τις οποίες αναμενόταν, μέσω της αλλαγής φάσης που συντελείται στην επιφάνειά τους, να διαβρωθούν.

Το δεύτερο είδος είναι μεταλλικά δοκίμια τα οποία προηγουμένως έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, ούτως ώστε να καλύπτονται από μια λεπτή στρώση  $\text{CaCO}_3$  με τη μορφή του ασβεστίτη. Και για τα δύο αυτά είδη δοκιμίων, ήταν εύκολο να εκτιμηθούν οι αλλαγές που συμβαίνουν στην επιφάνειά τους, μέσω της μέτρησης του βάρους.

### 5.1.2 Προδιαγραφές

Η κατασκευή της διάταξης στηρίχθηκε στις εξής απαιτήσεις:

- Αντλία ικανής ισχύος και παροχής, ώστε να επιτυγχάνεται η δημιουργία τυρβώδους ροής.
- Σωλήνας από μη μαγνητικό υλικό (διαμαγνητικό-παραμαγνητικό με μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα) ούτως ώστε οι μαγνητικές γραμμές να διέρχονται από το εσωτερικό του. Όσο το δυνατόν μικρότερη διατομή, ώστε να είναι δυνατή η ανάπτυξη τύρβης (μικρότερη διατομή --> μεγαλύτερος αριθμός Reynolds) καθώς και μαγνητικού πεδίου υψηλής έντασης στο εσωτερικό της ροής. Ωστόσο, η διατομή του σωλήνα δε μπορεί να είναι πολύ μικρή γιατί κάτι τέτοιο θα εμπόδιζε τη διαδικασία της τοποθέτησης των δοκιμίων στο εσωτερικό του σωλήνα.
- Ευκολία στην εφαρμογή της μαγνητικής συσκευής και στη τοποθέτηση των δοκιμίων.
- Μαγνήτες μεγάλης παραμένουσας μαγνήτισης  $B_r$  και ικανού πλάτους, ώστε να δημιουργείται ένα σχετικά ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο με δυναμικές γραμμές κάθετα στη κατεύθυνση της ροής. Επίσης, εκτός από το πλάτος, σημαντικό ρόλο παίζει και το μήκος των μαγνητών (διάσταση παράλληλη στη διεύθυνση της ροής), καθώς επηρεάζει το χρόνο που το μαγνητικό πεδίο αλληλοεπιδρά με τη διερχόμενη ροή [22, 29].

### Χρόνος έκθεσης

Ο μέσος χρόνος έκθεσης του νερού στο μαγνητικό πεδίο, για ένα κλειστό υδραυλικό δίκτυο είναι:  $t_{m,avg} = \frac{Q}{V} \cdot t_{test} \cdot \frac{\ell}{\bar{u}} = \frac{A \cdot \ell}{V} \cdot t_{test}$ , όπου Q: η παροχή, A: η διατομή,  $\bar{u}$ : η μέση ταχύτητα της ροής,  $\ell$ : το μήκος της μαγνητικής συσκευής, V: ο συνολικός όγκος του νερού,  $t_{test}$ : ο χρόνος του πειράματος.

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται δεδομένου του ότι ο όγκος του νερού που περιέχεται στο δίκτυο δεν είναι πολύ μεγάλος ώστε κάθε στοιχειώδες τμήμα της ροής

να διέρχεται αρκετές φορές από τη μαγνητική συσκευή. Επιπλέον θεωρείται ότι το φαινόμενο της μνήμης του νερού έχει διάρκεια ωρών.

Το νερό, αν και διαμαγνητικό, επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο [3, 33, 34] και παρουσιάζει αλλαγές στις ιδιότητές του, γεγονός που οφείλεται στη πολικότητα των μορίων του [3]. Ο χρόνος έκθεσης ή μαγνήτισης του νερού είναι μια σημαντική παράμετρος του πειράματος και όπως δείχνουν τα αποτελέσματα των περισσότερων ερευνών, το φαινόμενο της μαγνήτισης του νερού αναφέρεται σε αλλαγές που συμβαίνουν σε διάρκεια λεπτών και οι οποίες μπορούν να διαρκέσουν για αρκετές ώρες μετά τη παύση του πεδίου. Έτσι, λόγω των φαινομένων μνήμης του νερού (ενότητα 2.3) [3, 35, 36], ενδέχεται το φαινόμενο της αλλαγής φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, να παρουσιάζεται ενισχυμένο σε ένα κλειστό υδραυλικό δίκτυο, όπου ο όγκος του νερού που κυκλοφορεί και μπορεί να μαγνητιστεί είναι πεπερασμένος.

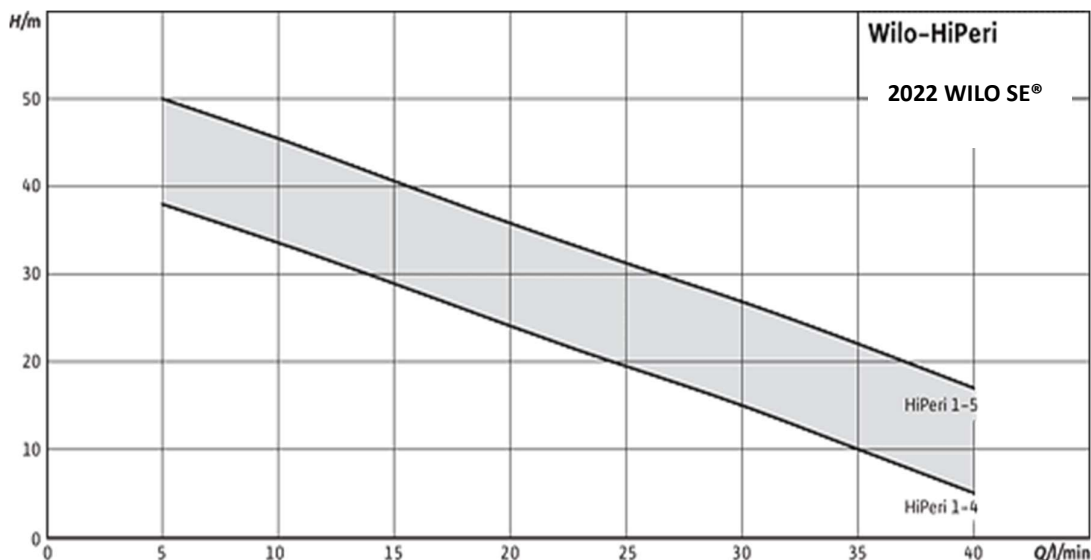
Ο μέσος χρόνος έκθεσης για το πείραμα, παρόλο που αναφέρεται σε κλειστό δίκτυο, είναι σχετικά μικρός (της τάξης των δευτερολέπτων), οπότε σύμφωνα με τη θεωρία, μια αύξηση σε αυτή τη παράμετρο θα επιφέρει καλύτερα και μετρήσιμα αποτελέσματα [29].

## 5.2. Πειραματική διάταξη

### 5.2.1 Εξαρτήματα

Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές επιλέχθηκαν τα εξής:

- αντλία μέγιστου μανομετρικού 50m, ισχύος 0,55 kW στην περιοχή λειτουργίας HiPeri1-5, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (5-1)



Σχήμα 5-1

Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της αντλίας

- μαγνήτες νεοδυμίου ( $Nd_2Fe_{14}B$ )

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μαγνητών, διαφορετικής παραμένουσας μαγνήτισης αλλά ίδιων διαστάσεων (50\*15\*15mm). Η πρώτη μαγνητική συσκευή κατασκευάστηκε με μαγνήτες βαθμού N45, ενώ η δεύτερη συσκευή με μαγνήτες βαθμού N48.

Παρακάτω δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε τύπο μαγνήτη:

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικά μαγνητών

	Μαγνήτης N45	Μαγνήτης N48
Μήκος (mm)	50	50
$B_r$ (mT)	1320-1380	1380-1420
$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	342-366	366-390

$B_r$  η παραμένουσα μαγνήτιση,  $BH_{max}$  μέγιστο γινόμενο ενέργειας.

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας πάνω από την οποία απομαγνητίζονται (θερμοκρασία Curie) είναι  $80^{\circ}\text{C}$ .

Οι μαγνήτες νεοδυμίου είναι από τους ισχυρότερους μόνιμους μαγνήτες που είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Κατασκευάζονται από κράμα νεοδυμίου (αντισιδηρομαγνητικό), σιδήρου (σιδηρομαγνητικό) και βορίου (διαμαγνητικό) σε τετραγωνική κρυσταλλική δομή και χημικό τύπο  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Το υλικό αυτό παρουσιάζει πολύ μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης και ακολούθως πολύ μεγάλο μέγιστο γινόμενο μαγνητικής ενέργειας. Ωστόσο, παρά τις καλές μαγνητικές τους ιδιότητες, οι μαγνήτες νεοδυμίου σκουριάζουν εύκολα και γι' αυτό κατασκευάζονται με μια λεπτή επικάλυψη για προστασία από την έκθεση στον αέρα και στην υγρασία. Η επικάλυψη στη περίπτωση των μαγνητών που χρησιμοποιούνται, αποτελείται από στρώσεις νικελίου και χαλκού (Ni-Cu-Ni).

### 5.2.2 Μαγνητική συσκευή

Ο ρόλος αυτής της κατασκευής είναι να συγκρατεί μαγνήτες αντίθετης πολικότητας, σε αντικριστές θέσεις στο εξωτερικό ενός κοίλου σωλήνα, προκειμένου να δημιουργείται στο εσωτερικό του ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο με διεύθυνση κάθετη στη φορά της ροής. Η μαγνητική συσκευή αποτελείται ουσιαστικά από δύο όμοια κομμάτια ξύλο σε σχήμα Π τα οποία διαθέτουν αυλάκι εσωτερικά μέσα στο οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Οι μαγνήτες καλύπτονται με σιλικόνη η οποία εκτός από στήριξη παρέχει και στεγανοποίηση για καλύτερη προστασία των μαγνητών από την υγρασία. Με τη σιλικόνη οι μαγνήτες παγιώνονται στις θέσεις τους, γεγονός που βοηθάει ιδιαίτερα στη χρήση της συσκευής, μιας και μεταξύ των συγκεκριμένων μαγνητών μπορούν να αναπτυχθούν πολύ ισχυρές ελκτικές δυνάμεις αν έρθουν σε κοντινές αποστάσεις.

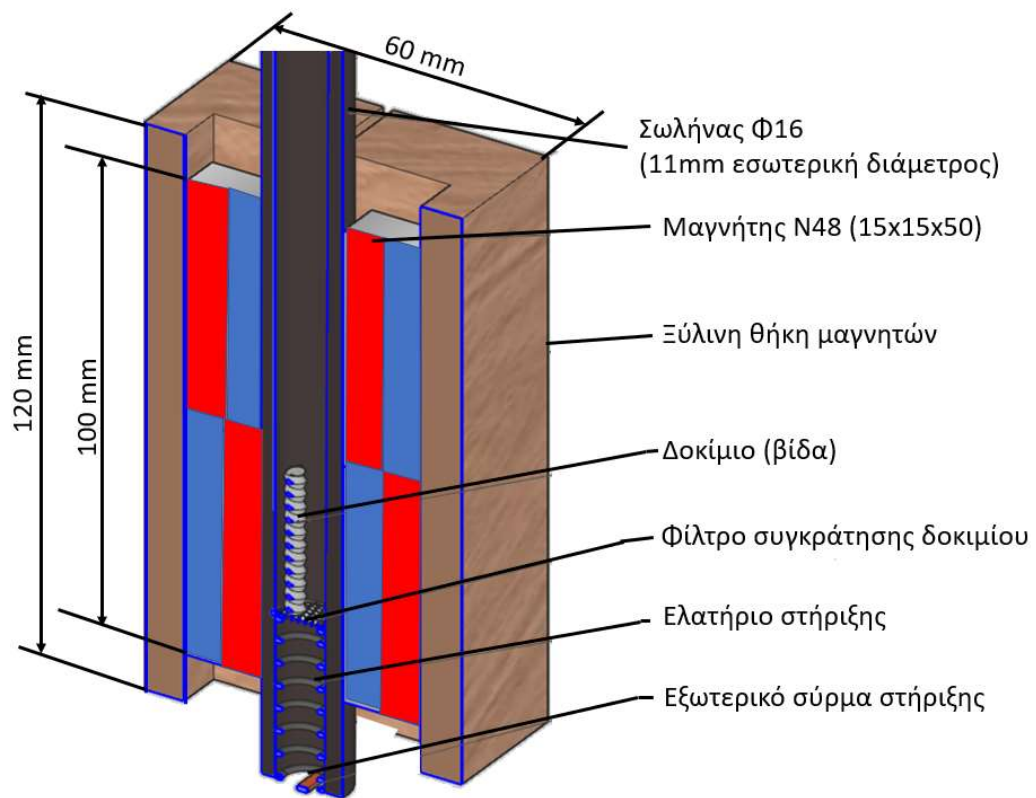
Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο όμοιες συσκευές τις οποίες, για τη συνέχεια, ονομάζονται συσκευή 1 και συσκευή 2. Η συσκευή 1 είναι μικρότερη σε μέγεθος και συγκρατεί δύο μαγνήτες τον ένα απέναντι από τον άλλο, ενώ η συσκευή 2, που χρησιμοποιήθηκε για τις τελευταίες δοκιμές, έχει 2 ζευγάρια μαγνητών με αντίθετες πολικότητες ώστε το πεδίο που παράγεται να αλλάζει απότομα φορά στο μέσο της



συσκευής. Μαγνητικό πεδίο εναλλασσόμενης φοράς χρησιμοποιήθηκε και σε άλλες μελέτες και έδειξε να υπερτερεί του απλού ομοιόμορφου πεδίου, τόσο στη παρεμπόδιση της ανάπτυξης των κρυστάλλων  $\text{CaCO}_3$ , όσο και στην απομάκρυνση τους από την επιφάνεια του δοκίμιου [25, 18, 19].

Και για τις δύο συσκευές το μέγεθος του διακένου ανάμεσα στους μαγνήτες είναι 22mm.

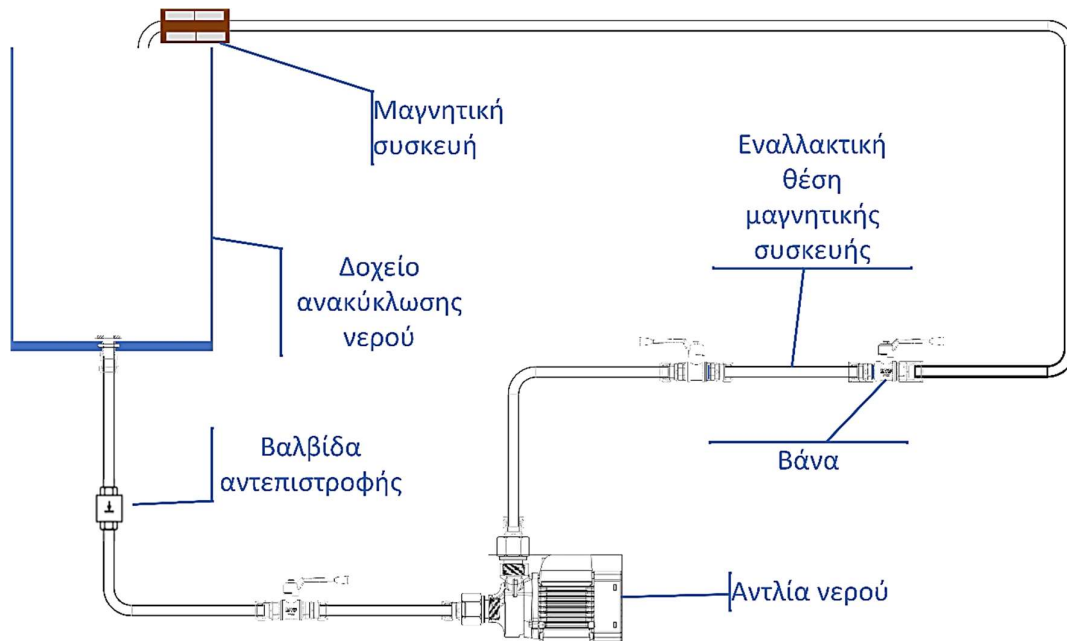
Παρακάτω φαίνεται η σχηματική περιγραφή μόνο για τη δεύτερη μαγνητική συσκευή, αλλά με παρόμοιο τρόπο κατασκευάστηκε και η πρώτη.



Σχήμα 5-2

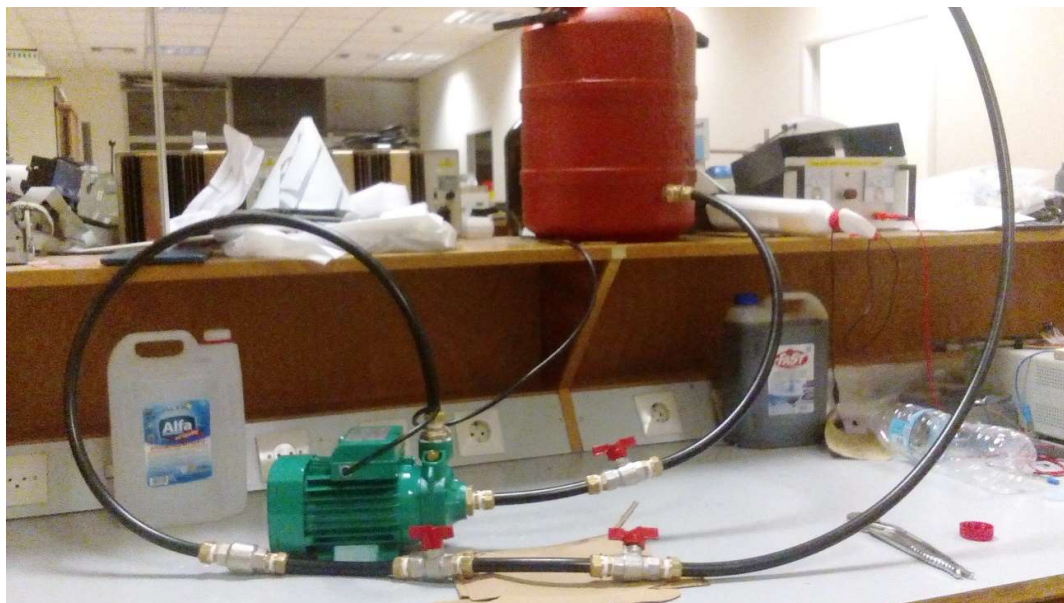
Τομή της μαγνητικής συσκευής 2

Το υδραυλικό δίκτυο που προέκυψε φαίνεται στο παρακάτω **σχήμα**:



Σχήμα 5-3

Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του πειράματος



Σχήμα 5-4

Εργαστηριακή εγκατάσταση του πειράματος

### **5.2.3 Τοποθέτηση των δοκιμίων**

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα (5-2) της μαγνητικής συσκευής, τα δοκίμια τοποθετούνται στην άκρη του σωλήνα από όπου το νερό επιστρέφει στο βαρέλι. Συγκρατούνται στο εσωτερικό του σωλήνα με τη βοήθεια ενός πλαστικού φίλτρου το οποίο με τη σειρά του υποστηρίζεται από ένα χάλκινο ελατήριο. Το ελατήριο συγκρατείται εξωτερικά από ένα χάλκινο σύρμα το οποίο δένεται σε σταθερό σημείο εκτός του σωλήνα. Με αυτό το τρόπο, το δοκίμιο συγκρατείται σε σταθερή απόσταση από το άκρο του αγωγού, παρά τη πίεση του νερού και βρίσκεται διαρκώς εντός του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τη μαγνητική συσκευή. Ιδανικά θα ήταν επιθυμητό η τοποθέτηση των δοκιμίων να γίνεται στο μέσο της διάταξης, όπου η ροή είναι πιο προβλέψιμη, αλλά αυτό θα απαιτούσε ειδικό τρόπο σύνδεσης μεταξύ των αγωγών που θα αύξανε αρκετά το κόστος της διάταξης.

### **5.3. Παράμετροι του πειράματος**

Είναι βέβαιο, πως η ασφαλής μέθοδος για την επιτυχία ενός πειράματος, είναι η όσο γίνεται πιο πιστή αναπαραγωγή του φαινομένου, σε περιβάλλον με ελεγχόμενες και σαφώς ορισμένες συνθήκες, προκειμένου να μπορεί να γίνει μετρήσιμη και ποσοτική ανάλυση. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι αυστηρά καθορισμένες συνθήκες επιβάλλουν περιορισμούς στη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων, ειδικά όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη πρακτική εφαρμογή, όπου συνήθως εμπλέκονται αστάθμητοι παράγοντες.

Για παράδειγμα, όταν αντιμετωπίζεται ένα σύνθετο φαινόμενο για το οποίο τόσο η επιμέρους συνεισφορά των μεταβλητών που εμπλέκονται, όσο και η μεταξύ τους αλληλεξάρτηση είναι σχετικά άγνωστες, είναι αρκετά δύσκολο να προβλεφθεί εξαρχής ποιοι παράγοντες ευθύνονται για τις μετρήσεις που λαμβάνονται. Σε αυτή τη περίπτωση, η έρευνα βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες, από τυχόν προηγούμενες μελέτες, με σκοπό να αναπαραχθεί το επιθυμητό φαινόμενο, χωρίς να έχει ιδιαίτερη σημασία, σε πρώτη φάση, η συστηματοποίηση της διαδικασίας η οποία μπορεί να επιτευχθεί αφού αποδειχθεί η γνησιότητα του φαινομένου.

Στη συνέχεια και εφόσον έχουν παρατηρηθεί τα επιθυμητά αποτελέσματα, επαναλαμβάνεται το πείραμα με διαφορετικές αρχικές συνθήκες και γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν οι κυρίαρχοι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο, καθώς και τις οριακές συνθήκες που επιτρέπουν την εμφάνισή του.

Όσον αφορά την αφαίρεση των καθυατώσεων  $\text{CaCO}_3$  με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου, παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει στο παρελθόν, δεν έχει ακόμη καθοριστεί, με σαφήνεια, υπό ποιες συνθήκες επιτυγχάνεται η αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, που σύμφωνα με τη θεωρία [20, 12], αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχία της εφαρμογής.

Έτσι κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η εστίαση της προσοχή στράφηκε στην ακρίβεια των μετρήσεων για το βάρος των εναποθέσεων του ανθρακικού ασβεστίου στα δοκίμια, το οποίο οδηγεί σε άμεσα συμπεράσματα για την επιτυχία του πειράματος. Δεν έγινε προσπάθεια να ελεγχθούν μεταβλητές όπως η θερμοκρασία και η συγκέντρωση ιόντων στο νερό, οι οποίες εξάλλου ποικίλουν από εφαρμογή σε εφαρμογή.

Ο σκοπός, δηλαδή, από πειραματικής σκοπιάς, δεν είναι η ποσοτικοποίηση του φαινομένου, αλλά η παροχή όσο το δυνατόν περισσότερων ενδείξεων, ότι η διάσπαση των επιφανειακών δομών του  $\text{CaCO}_3$  επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας απλής μαγνητικής συσκευής σε ένα κλειστό υδραυλικό δίκτυο, χωρίς ειδικά επιλεγμένες συνθήκες. Επιπλέον, έγινε η υπόθεση ότι στην επιφάνεια των δοκιμίων επικρατούν παρόμοιες συνθήκες (υδροδυναμικές, ηλεκτροδυναμικές) με την επιφάνεια ενός αγωγού από το ίδιο υλικό.

Η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου για το καθαρισμό του νερού, εξαρτάται από πολλές παραμέτρους εξαιτίας της σύνθετης φύσης των φαινομένων που εμπλέκονται. Συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία αναφέρονται οι εξής: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, ο τρόπος εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου (πχ. διάταξη εναλλασσόμενης πολικότητας), η ταχύτητα της ροής, ο αριθμός Reynolds, ο χρόνος έκθεσης της ροής του νερού στο μαγνητικό πεδίο, η σκληρότητα του νερού, η οξύτητα του νερού (pH), η θερμοκρασία, η συγκέντρωση των διαφόρων ιόντων, το είδος της επιφάνειας του αγωγού (στη περίπτωση του πειράματος, του δοκιμίου).

Η εκτίμηση για το στατικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται εντός του αγωγού, έγινε με το ANSYS, με εισόδους τα δεδομένα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μαγνητών. Η απόσταση μεταξύ των αντίθετων πόλων των μαγνητών είναι 22mm.

Προκύπτει μαγνητικό πεδίο έντασης ~250mT και ~300mT στο μέσο του αγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία [12], για να επιτευχθεί έντονη ενίσχυση του πεδίου η οποία επιτρέπει την αλλαγή φάσης από ασβεσίτη σε αραγωνίτη, απαιτούνται 400mT. Παρόλα αυτά και για μικρότερης έντασης πεδίο παρατηρείται η αλλαγή φάσης του CaCO<sub>3</sub>, λόγω τυχαίων διακυμάνσεων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εντός σχηματισμών της τυρβώδους ροής [20].

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε πρόκειται για νερό βρύσης μεγάλης σκληρότητας, αγωγιμότητας 750-800 μS/cm και βασικό pH > 7.5

Μέσα σε διάστημα περίπου 2 ωρών από την εκκίνηση της αντλίας καταγράφηκε σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας του νερού, από τους 20°C στους 50°C, λόγω των θερμικών απωλειών της αντλίας. Έπειτα από τις 2 ώρες συνεχόμενης λειτουργίας της αντλίας, η θερμοκρασία παρουσίαζε μικρή άνοδο μέχρι τους 55°C οπότε και σταματούσε να αυξάνεται.

Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα  $D = 11\text{mm}$

Το κινηματικό ιξώδες του νερού  $\nu = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  στους 20°C και  $\nu = 5.54 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  στους 50°C.

Για τον αριθμό Reynolds της ροής ίσχυε:

$$R = \frac{4 Q}{\pi \nu D} \approx 115700 \cdot Q \text{ για } T = 20^\circ\text{C} \text{ και } R \approx 208900 \cdot Q \text{ για } T = 50^\circ\text{C}$$

όπου Q η παροχή νερού σε l/s

Για  $Q = 0.124 \text{ l/s} \rightarrow R \approx 14353$

Εξυπηρετεί καλύτερα η μέτρηση της μέσης ταχύτητας ροής, γιατί πολλές από τις έρευνες της βιβλιογραφίας χρησιμοποιούν αυτό το μέγεθος για τη περιγραφή της ροής.

Ο τύπος που δίνει τη μέση ταχύτητα της ροής σε σχέση με τη παροχή:

$$\bar{u} \text{ (m/s)} = Q \text{ (l/s)} \cdot 10.5 \text{ (m}^{-2}\text{)}$$

Ο αριθμός Reynolds συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ροής είναι:

$$R \sim 11000 \cdot \bar{u} \quad \text{για } T=20^\circ\text{C}$$

Για να υπάρχει βεβαιότητα ότι επιτυγχάνεται συνεχής τυρβώδης ροή σε όλη τη διατομή του αγωγού, επιδιώκεται μια μέση ταχύτητα  $\bar{u} > 0.37 \text{ m/s}$ , ώστε να γίνει ο  $R > 4000$  που είναι το όριο για τη ανάπτυξη ομοιογενούς τυρβώδους ροής σε κυλινδρικό σωλήνα.

Μέσος χρόνος έκθεσης για τη ροή του νερού στο μαγνητικό πεδίο,

$$t_{m,avg} = \frac{A \cdot \ell}{V} \cdot t_{test}$$

$A = 0.95 \text{ cm}^2$  η διατομή του αγωγού,  $\ell = 5 \text{ cm}/10 \text{ cm}$  (συσκευή 1/συσκευή 2) το μήκος της διάταξης των μαγνητών,  $V = 20 \text{ l}$  ο συνολικός όγκος του νερού που κυκλοφορεί στο δίκτυο,  $t_{test} = 3 \text{ h}$  ο χρόνος του πειράματος.

Υπολογίζεται,  $t_{m,avg} = 2.57 \text{ s}$ ,  $t_{m,avg} = 5.13 \text{ s}$  για τη συσκευή 1 και τη συσκευή 2.

Σχετικά μικρός χρόνος μαγνήτισης, καθώς για τις περισσότερες έρευνες ο χρόνος αυτός είναι της τάξης των λεπτών ή και των ωρών.

Ακόμη αν θεωρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται για ένα πέρασμα από τη μαγνητική συσκευή, για αυτόν ισχύει:

$$t_{m,short} = \ell / \bar{u}$$

Οπότε για ταχύτητες λίγων  $\text{m/s}$ ,  $t_{m,short} \sim 10^{-2} \text{ s}$

Ο μέσος χρόνος μαγνήτισης  $t_{m,avg}$  βασίζεται στο φαινόμενο μνήμης του νερού, ενώ ο χρόνος μαγνήτισης  $t_{m,short}$ , προκύπτει ως ο χρόνος που χρειάζεται ένα στοιχειώδες σωματίδιο νερού, αν κινείται με τη μέση ταχύτητα της ροής, για να διέλθει διαμέσου του τμήματος του αγωγού που βρίσκεται εντός του μαγνητικού πεδίου. Γίνεται η υπόθεση ότι αυτοί οι χρόνοι είναι αρκετοί για την εμφάνιση περιοχών (της τάξης των  $\mu\text{m}$ ) στη ροή του νερού, εντός των οποίων, μόρια νερού τα οποία οργανώνονται σε μια από κοινού αντισυμμετρική κβαντική κατάσταση, μπορούν να προκαλέσουν τοπικά ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου και αλλαγή φάσης στο κρυσταλλικό πλέγμα του ασβεστίτη [20].

Τέλος, οι μετρήσεις για το βάρος των δοκιμών έγινε σε ζυγαριά με ακρίβεια  $\pm 0.1 \text{ mg}$ .

#### 5.4. Αναμενόμενα αποτελέσματα

Οι διαλυτότητες των πολυμορφικών φάσεων του ανθρακικού ασβεστίου ελαττώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όπως διαπιστώθηκε από τις πρώτες δοκιμές, το νερό στο δίκτυο σταδιακά ζεσταίνεται λόγω των απωλειών της αντλίας. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός της εναπόθεσης του ανθρακικού ασβεστίου λόγω του υπερκορεσμού αυξάνεται. Οπότε είναι αναμενόμενο, χωρίς τη παρουσία του μαγνητικού πεδίου το βάρος των εναποθέσεων να αυξηθεί ελαφρώς, δεδομένης της μεγάλης σκληρότητας του νερού. Από την άλλη μεριά, εκτιμάται ότι με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, θα περιοριστεί η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου σε ετερογενείς επιφάνειες, λόγω της δράσης του μαγνητικού πεδίου στο δυναμικό των ιόντων και των επιφανειών που βρίσκονται εντός της ροής [29]. Άλλες παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι το μαγνητικό μειώνει τη διαλυτότητα του  $\text{CaCO}_3$  στο νερό, παρόλα αυτά ευνοεί την ομοιογενή καταβύθιση [26]. Επιπλέον, για τις τιμές έντασης του μαγνητικού πεδίου που υπολογίστηκαν (250-300mT) η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου γίνεται σε μεγάλο βαθμό με τη μορφή του αραγωνίτη, οι κρύσταλλοι του οποίου δε δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς με τις μεταλλικές επιφάνειες, στη περίπτωση που συμβαίνει ετερογενής πυρήνωση [20]. Γι' αυτούς τους λόγους, θεωρείται ότι η τοποθέτηση της μαγνητικής συσκευής στο δίκτυο και ιδιαίτερα της συσκευής 2, η οποία δημιουργεί πεδίο εναλλασσόμενης πολικότητας, πρόκειται να εμποδίσει τη συσσώρευση επικαθίσεων ασβεστίτη στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Όσον αφορά το φαινόμενο της διάσπασης του ασβεστίτη με τη βοήθεια του μαγνητικού πεδίου, εκτιμάται ότι το πεδίο δεν είναι αρκετά ισχυρό ώστε να συμβεί μια εξολοκλήρου αφαίρεση των δομών του ασβεστίτη, αν γίνει δεκτό ότι κάτι τέτοιο είναι γενικά εφικτό. Η θεωρία λέει ότι οι συνθήκες για την αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη είναι πιο ευνοϊκές όταν η ένταση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από 400mT. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι η λόγω της στοχαστικότητας που εισάγει η τυρβώδης ροή, το φαινόμενο της τοπικής ενίσχυσης του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται και για πεδία χαμηλότερης έντασης [20]. Γι' αυτό το λόγο, κι επειδή το πεδίο που δημιουργείται στο εσωτερικό του σωλήνα είναι σχετικά κοντά στο όριο που θέτει η θεωρία, αναμένεται μια αισθητή μείωση στο βάρος των επικαθίσεων, λόγω της αλλαγής φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη και την επακόλουθη διάσπαση των πιο αδύναμων επιφανειακών δομών του  $\text{CaCO}_3$ .

## Κεφάλαιο 6: Πείραμα

### 6.1. Αρχικές προσπάθειες

#### 6.1.1 Πρωτότυπο πείραμα

Κατά τις πρώτες δοκιμές του πειράματος ως δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι από κέλυφος αυγού το οποίο αποτελείται από σχεδόν καθαρό ανθρακικό ασβέστιο (96.5%) με τη μορφή του ασβεστίτη. Ωστόσο, μετά από σχετική έρευνα, διαπιστώθηκε στη συνέχεια ότι οι μικροκρύσταλλοι του ανθρακικού ασβεστίου που απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος του κελύφους, υποστηρίζονται από ένα πλέγμα πρωτεϊνών οι οποίες προσδίδουν σταθερότητα στις μικροδομές του ασβεστίτη [37, 38]. Έτσι, το κέλυφος του αυγού απορρίφθηκε ως δοκίμιο καθώς υπήρχε το ενδεχόμενο, η πολύπλοκη δομή του, να επηρεάζει το φαινόμενο της αλλαγής φάσης, αν και τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν ήταν ολότελα αρνητικά.

Συγκεκριμένα, για το πρώτο πείραμα, τυλίχθηκε το κέλυφος του αυγού σε ένα λεπτό πλαστικό πλέγμα και τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του σωλήνα. Το δοκίμιο έμεινε για 3 ώρες σε σταθερή ροή με μέση ταχύτητα 1.3m/s ( $Q=1.8l/14.5s$ ), χωρίς μαγνητικό πεδίο. Αφού καθαρίστηκε με νερό για τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να είχαν κολλήσει από τη ροή, το βάρος του βρέθηκε ότι είχε αυξηθεί από 87.0mg σε 87.4mg το οποίο καταγράφηκε σαν κατά βάρος αύξηση 0.5% για ευκολότερη σύγκριση με επόμενα δοκίμια από κελύφη διαφορετικού μεγέθους. Καθώς το κέλυφος είναι πορώδες και απαρτίζεται ως επί το πλείστον από μικροκρύσταλλους ασβεστίτη, γίνεται η υπόθεση ότι προσφέρει ιδανικές επιφάνειες για την καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου που βρίσκεται στο νερό.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε η μαγνητική συσκευή (συσκευή 1) στο κύκλωμα, η οποία δημιουργεί μαγνητικό πεδίο έντασης περίπου 250mT στο εσωτερικό του σωλήνα. Επαναλήφθηκε η προηγούμενη διαδικασία για το ίδιο δοκίμιο χωρίς να παρατηρηθεί αλλαγή βάρους στο κέλυφος. Έτσι υπήρξε μια ένδειξη, ότι το μαγνητικό πεδίο προκαλεί αλλαγές στη καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου.

Σαν κριτική στο παραπάνω συμπέρασμα, μπορεί να ειπωθεί ότι το ίδιο αποτέλεσμα θα πρόκυπτε αν, κατά το δεύτερο πείραμα, υπήρχε παράγοντας που περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την εναπόθεση του ασβεστίτη. Μια υπόθεση θα μπορούσε να είναι, ότι κατά τη πρώτη φάση (χωρίς το μαγνητικό πεδίο), η καταβύθιση του  $CaCO_3$  έγινε σε ευνοϊκές



ενεργειακά θέσεις της διεπιφάνειας, όπως για παράδειγμα οι μικροσκοπικοί πόροι πάνω στο κέλυφος, ενώ κατά τη δεύτερη φάση (με το μαγνητικό πεδίο), οι πόροι αυτοί είχαν κορεστεί. Επιπλέον, η αύξηση του βάρους θα μπορούσε να οφείλεται και σε τυχαίο παράγοντα, όπως η θέση του κελύφους ως προς τη ροή, που κατά τη δεύτερη φάση δεν ευνοούσε τη καταβύθιση του  $\text{CaCO}_3$ .

### **6.1.2 Δεύτερη προσπάθεια**

Μια άλλη δοκιμή, με σκοπό τη διάσπαση του ασβεστίτη λόγω της αλλαγής φάσης, έγινε με ένα κομμάτι βάρους περίπου 0.5g από ισλανδική κρύσταλλο, η οποία αποτελεί ποικιλία καθαρού ασβεστίτη. Το πείραμα έγινε με την ίδια μαγνητική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε και προηγουμένως, αλλά χωρίς πρώτη φάση (δηλαδή μόνο με την επιβολή του πεδίου). Δε παρατηρήθηκε αλλαγή στο βάρος του κρυστάλλου, γεγονός που ίσως να οφείλεται στη χαμηλή ενέργεια του κρυσταλλικού πλέγματος, λόγω του υψηλού βαθμού οργάνωσης της κρυσταλλικής δομής, το οποίο καθιστά δύσκολη την αλλαγή φάσης στην επιφάνεια του υλικού.

## **6.2. Πιο συστηματική πειραματική διαδικασία**

Για τα πειράματα που ακολούθησαν, επιλέχθηκε μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση, η οποία ανταποκρίνεται καλύτερα στο φαινόμενο της απομάκρυνσης των καθαλατώσεων, όπως αυτό συμβαίνει στις επιφάνειες των σωληνώσεων. Το βασικό φαινόμενο που εξετάζεται είναι η αλλαγή φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη σε διεπιφάνεια στερεού υγρού, όμως αυτό που ουσιαστικά επιδιώκεται είναι η αποκόλληση του ασβεστίτη από ετερογενείς επιφάνειες όπως αυτή ενός σωλήνα. Στα επόμενα πειράματα, έγινε προσπάθεια να δημιουργηθούν τεχνητές καθαλατώσεις ανθρακικού ασβεστίου πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες και εκεί να εξεταστεί το φαινόμενο της αλλαγής φάσης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία περιγράφονται σε αυτή την ενότητα είναι κομμάτια από μέταλλο σε σχήμα κοχλία, αν και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε σχήμα, αρκεί το δοκίμιο να έχει τραχιά επιφάνεια που ευνοεί το σχηματισμό καθαλατώσεων (ετερογενής πυρήνωση), χωρίς κοιλότητες ώστε οι δομές του ασβεστίτη να εκτίθενται στη τυρβώδη ροή.

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία γίνεται η προετοιμασία των δοκιμίων προτού τοποθετηθούν στο εσωτερικό του σωλήνα.

### 6.2.1 Προετοιμασία των δοκιμίων

Αφού μετρηθεί το καθαρό βάρος των δοκιμίων, τοποθετούνται σε δοχείο με νερό και προστίθεται σκόνη ανθρακικού ασβεστίου ώστε το διάλυμα να γίνει αρκετά υπέρκορο και θολό (25gr  $\text{CaCO}_3$  σε 250ml νερό). Η διαλυτότητα του ανθρακικού ασβεστίου στο νερό είναι μικρή και για να παραμείνει το διάλυμα ομοιογενές χρειάζεται διαρκής ανάδευση. Τοποθετείται το δοχείο σε θερμαντική εστία με δυνατότητα μαγνητικής ανάδευσης και θερμαίνεται το διάλυμα στους  $50^\circ\text{C}$  για δύο ώρες. Για όση ώρα το νερό θερμαίνεται, με τη βοήθεια ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, στη περίπτωση που το δοκίμιο είναι μη μαγνητικό (πχ. βίδα αλουμινίου), διατηρείται το δοκίμιο σε διαρκή κίνηση. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια της βίδας, με τη μορφή του ασβεστίτη<sup>7</sup> (ετερογενής πυρηνογένεση), σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Αφού κλειστεί η εστία, αφήνονται τα δοκίμια εντός του υπέρκορου διαλύματος για τουλάχιστον άλλες 3 ώρες<sup>8</sup> (και καθόμαστε και τα κοιτάμε :)). Τέλος, ξεπλένονται τα δοκίμια με νερό ώστε να φύγουν οι επιφανειακές δομές που δεν έχουν κολλήσει καλά με το υπόστρωμα.

---

<sup>7</sup> Μελέτες έχουν δείξει [15, 16] ότι για θερμοκρασίες κάτω των 60 βαθμών Κελσίου, η καταβύθιση του  $\text{CaCO}_3$  σε υπέρκορα διαλύματα, συμβαίνει κατά προσέγγιση ως εξής: Κόκκοι άμορφου ανθρακικού ασβεστίου προσκολλώνται στις διεπιφάνειες στερεού-υγρού που βρίσκονται εντός του διαλύματος και αρχίζουν σιγά σιγά (~2 ώρες) να μετασχηματίζονται σε βατερίτη, σαν ένα πρώιμο στάδιο κρυστάλλωσης\*. Επειδή ο βατερίτης είναι μετασταθής μορφή σιγά σιγά μετατρέπεται στη πιο σταθερή μορφή του ασβεστίτη (συνολικά διάστημα ~6 ωρών), αν η θερμοκρασία εντός του διαλύματος είναι μικρότερη των  $30^\circ\text{C}$  περίπου. Για θερμοκρασία διαλύματος μεγαλύτερη των  $60^\circ\text{C}$  ενδέχεται να σχηματιστεί αραγωνίτης [15].

<sup>8</sup> Ο βατερίτης αποτελεί τη πιο ασταθή μορφή  $\text{CaCO}_3$  σε σχέση με τον ασβεστίτη ή τον αραγωνίτη και επομένως προκύπτει σαν μεταβατική δομή καθώς τα συσσωματώματα του άμορφου  $\text{CaCO}_3$  μεγαλώνουν σε μέγεθος και ευνοείται η ανάπτυξη δομών σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν είναι γνωστή με σιγουριά η δομή των καθαλατώσεων, αν δηλαδή πρόκειται αποκλειστικά για σχηματισμούς ασβεστίτη και κατά πόσο οι δομές που έχουν δημιουργηθεί πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες είναι σταθερές ή όχι.

### **6.2.2 Στάδια του πειράματος**

Κάθε πείραμα χωρίζεται σε πέντε στάδια:

- 1) Καταγραφή του καθαρού βάρους - προετοιμασία του δοκιμίου, καθαρισμός και γέμισμα της βαρέλας (νερό στους 20°C), (5 ώρες)
- 2) Πρώτη μέτρηση - τοποθέτηση του δοκιμίου και εκκίνηση της αντλίας (χωρίς μαγνήτες στη διάταξη) (1 ώρα)
- 3) Διακοπή λειτουργίας, δεύτερη μέτρηση και επανεκκίνηση του πειράματος (χωρίς μαγνήτες) (1 ώρα)
- 4) Διακοπή λειτουργίας και τρίτη μέτρηση - τοποθέτηση του δοκιμίου και εφαρμογή της μαγνητικής συσκευής στη διάταξη (3 ώρες)
- 5) διακοπή του πειράματος και τελική μέτρηση

Όλες οι μετρήσεις έγιναν αφού είχε αφαιρεθεί η υγρασία από τα δοκίμια.

### **6.2.3 Περιγραφή των πειραμάτων και μετρήσεις**

Για το στάδιο 1, μετριέται το καθαρό βάρος της χαλύβδινης βίδας και στη συνέχεια τοποθετείται εντός υπέρκορου διαλύματος ανθρακικού ασβεστίου, το οποίο θερμαίνεται σε σταθερή θερμοκρασία 50°C. Αφήνεται η βίδα εντός του διαλύματος για 4 ώρες, οπότε και αναπτύσσεται στρώμα ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνειά της. Αδειάζεται το νερό του βαρελιού που έχει μείνει από το προηγούμενο πείραμα και αφού καθαριστούν τα τοιχώματα από τυχόν επικαθίσεις  $\text{CaCO}_3$ , ξαναγεμίζεται το βαρέλι με 20l νερού βρύσης.

Για το στάδιο 2, ξαναμετριέται το βάρος της βίδας και στη συνέχεια τοποθετείται εντός του υδραυλικού δικτύου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 και μένει στη ροή για 1 ώρα. Σε αυτό το στάδιο βρίσκεται το βάρος των επικαθίσεων του  $\text{CaCO}_3$  που συσσωρεύονται αρχικά στο δοκίμιο.

Για το στάδιο 3, διακόπτεται η λειτουργία του δικτύου και αφού θερμανθεί η βίδα ώστε να φύγει η υγρασία, μετριέται το βάρος της. Αναμένεται μείωση του βάρους των επικαθίσεων, λόγω της πίεσης της ροής η οποία συμπαρασύρει τις δομές  $\text{CaCO}_3$  που δεν έχουν δημιουργήσει ισχυρούς δεσμούς με το υπόστρωμα. Στη συνέχεια, τοποθετείται η βίδα εντός του σωλήνα, επανεκκινείται η αντλία και συνεχίζεται η ροή για άλλη 1 ώρα.

Για το στάδιο 4, παύεται η λειτουργία της αντλίας και μετριέται, όπως και προηγουμένως το βάρος της βίδας. Σε αυτό το στάδιο αναμένεται, ιδανικά, το βάρος των επικαθίσεων να παραμείνει σταθερό, το οποίο σημαίνει ότι οι δομές  $\text{CaCO}_3$  που έχουν σχηματιστεί στην επιφάνεια της βίδας είναι αρκετά σταθερές, ώστε η ροή του νερού να αδυνατεί να τις παρασύρει. Σε διαφορετική περίπτωση, επαναλαμβάνεται το προηγούμενο στάδιο μέχρι να μη παρατηρείται μείωση στο βάρος των επικαθίσεων. Αντιθέτως, αν δε παρατηρηθεί αλλαγή στο βάρος, μπορεί με κάποια βεβαιότητα να συναχθεί το συμπέρασμα πως στην επιφάνεια του δοκιμίου έχουν απομείνει οι πιο σταθερές δομές  $\text{CaCO}_3$ , οπότε και επαναλαμβάνεται η διαδικασία με την εφαρμογή της μαγνητικής συσκευής. Για τη δοκιμή με το μαγνητικό πεδίο, μένει η αντλία σε λειτουργία για 3 ώρες.

Για το στάδιο 5, διακόπτεται το πείραμα, μένει τη βίδα να στεγνώσει και κατόπιν μετριέται το βάρος της. Αυτό είναι το στάδιο που κρίνει την αποτελεσματικότητα της μαγνητικής συσκευής και αξιολογεί το πείραμα. Αν το βάρος των καθαλατώσεων μειωθεί σε σχέση με τη μέτρηση χωρίς το μαγνητικό πεδίο, μπορεί να θεωρηθεί ότι συντελείται το φαινόμενο της αλλαγής φάσης από ασβεστίτη σε αραγωνίτη, που έχει ως αποτέλεσμα το θρυμματισμό των δομών  $\text{CaCO}_3$ .

Παρακάτω παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες από τη διεξαγωγή των πειραμάτων για τα δύο μεταλλικά δοκίμια (βίδες) από χάλυβα αρχικά και από αλουμίνιο στη συνέχεια.

Μιας και η βασική έρευνα που χρησιμοποιήθηκε ως καθοδήγηση [12, 20] αναφέρεται σε σωλήνα κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, ως πρώτο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε μια χαλύβδινη βίδα για καλύτερη συμβατότητα με τη βασική έρευνα. Για τη χαλύβδινη βίδα η ταχύτητα της ροής ήταν  $\bar{u} \approx 4 \text{ m/s}$  και ο αριθμός Reynolds  $R \approx 44000$  για  $T = 20^\circ \text{C}$

Παρακάτω αναφέρονται οι λεπτομέρειες από την εκτέλεση του πειράματος:

Στο στάδιο 3, παρατηρήθηκε μείωση του βάρους, η οποία οφείλεται στην αποκόλληση των επιφανειακών στρώσεων του  $\text{CaCO}_3$  λόγω της πίεσης της ροής

Στο στάδιο 4, βρέθηκε ότι το βάρος δεν είχε μειωθεί, (ή είχε μειωθεί λιγότερο από την ακρίβεια της ζυγαριάς) το οποίο σημαίνει ότι οι εναποθέσεις  $\text{CaCO}_3$  που είχαν παραμείνει πάνω στην επιφάνεια της βίδας ήταν αρκετά σταθερές, ώστε η σταθερή ροή του νερού να αδυνατεί να τις παρασύρει. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε εξωτερικά του σωλήνα η μαγνητική συσκευή 1 ώστε να δημιουργείται μαγνητικό πεδίο (~250mT) το οποίο διέρχεται κάθετα στη ροή του νερού και διαμέσου της βίδας μιας και είναι σιδηρομαγνητικό υλικό.

Για τη χαλύβδινη βίδα, βρέθηκε ότι το βάρος των εναποθέσεων, μετά την εφαρμογή της μαγνητικής συσκευής, είχε περιέργως αυξηθεί, σε σημείο που να αντισταθμίζεται η δράση της ροής του νερού κατά τη φάση του πειράματος δίχως το μαγνητικό πεδίο.

Παρόμοια διαδικασία με παραπάνω, ακολουθήθηκε και για τη βίδα από αλουμίνιο, αλλά σε αυτή τη περίπτωση αυξήθηκε η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθώς και ο χρόνος έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο, ενώ ελαττώθηκε η ταχύτητα της ροής.

Χρησιμοποιήθηκε η συσκευή 2 που δημιουργεί ελαφρώς ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο, έντασης περίπου 300mT και διαθέτει 2 μαγνήτες αντίστροφης πολικότητας σε κάθε πλευρά, αντί για έναν. Επίσης, η παροχή του νερού ήταν μικρότερη από το προηγούμενο πείραμα και υπολογίστηκε μέση ταχύτητα  $\bar{u} \approx 3\text{m/s}$  και αριθμός Reynolds  $R \approx 33000$  για  $T=20^\circ$ .

Η δοκιμή αυτή, εξελίχθηκε σε μεγάλο βαθμό σύμφωνα με τις αρχικές εκτιμήσεις. Για τη πρώτη ώρα (στάδιο 2) παρατηρήθηκε αφαίρεση των επιφανειακών στρώσεων του ασβεστίτη που δεν είχαν προσκολληθεί με ισχυρούς δεσμούς στο υπόστρωμα. Στο δεύτερο πέρασμα (στάδιο 3), χωρίς το μαγνητικό πεδίο, δεν διαπιστώθηκε μείωση στο βάρος του δοκιμίου. Με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, το βάρος μειώθηκε κατά 0.6 mg, το οποίο αντιστοιχεί σε αφαίρεση των εναποθέσεων ανθρακικού ασβεστίου σε ποσοστό 19%.

### 6.3. Συμπεράσματα

Πίνακας 6-1

#### Πειραματικά αποτελέσματα

Μετρήσεις για την χαλύβδινη βίδα καθαρού βάρους 5863.2 mg							
Καθαρό βάρος επικαθίσεων (mg)	2.9	1 <sup>η</sup> φάση χωρίς μαγνητικό πεδίο	1.3	2 <sup>η</sup> φάση χωρίς μαγνητικό πεδίο	1.3	Φάση με μαγνητικό πεδίο	3.0
Μεταβολή του βάρους (mg)		-1.6		-0.0		+1.7	

Μετρήσεις για την βίδα αλουμινίου καθαρού βάρους 4559.2 mg							
Καθαρό βάρος επικαθίσεων (mg)	22.4	1 <sup>η</sup> φάση χωρίς μαγνητικό πεδίο	3.2	2 <sup>η</sup> φάση χωρίς μαγνητικό πεδίο	3.2	Φάση με μαγνητικό πεδίο	2.6
Μεταβολή του βάρους (mg)		-19.2		-0.0		-0.6	

Η ακρίβεια όλων των μετρήσεων είναι  $\pm 0.1\text{mg}$

Σε αυτό το σημείο, εκτιμήθηκε ότι υπάρχει δυνατότητα να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων με έμφαση στις δύο τελευταίες προσπάθειες, μιας και ήταν οι πιο συστηματικές και μπορούν να δώσουν μια καλύτερη εικόνα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου για το καθαρισμό των καθαλατώσεων του  $\text{CaCO}_3$  σε τυρβώδεις ροές.

Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι με τη συσκευή 1 ( $B \approx 250\text{mT}$ ) και για υλικό επιφάνειας τον χάλυβα, οι δομές του ασβεστίτη δε διασπώνται, αντιθέτως, προστίθεται υλικό και μάλιστα σε σημείο που το βάρος των εναποθέσεων επιστρέφει στη τιμή που είχε αρχικά.

Παρατηρήθηκε, δηλαδή, ότι επιφανειακές δομές του ασβεστίτη, οι οποίες δεν έχουν δημιουργήσει ισχυρούς δεσμούς με το υπόστρωμα, παρασύρονται από τη ροή, ενώ με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου αναπτύσσονται εκ νέου. Το γεγονός ότι υπάρχει εναπόθεση  $\text{CaCO}_3$ , αυτής της κλίμακας, δεν είναι παράξενο, αφού αντίστοιχο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στη πρώτη προσπάθεια με το κέλυφος του αυγού, μολονότι σε εκείνη τη περίπτωση η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου φάνηκε να εμποδίζει τη περαιτέρω ανάπτυξη του ασβεστίτη. Η μεγάλη σκληρότητα του νερού, σε συνδυασμό με τη σταδιακή άνοδο της θερμοκρασίας ( $20^\circ\text{C} \rightarrow 55^\circ\text{C}$ ) που μειώνει τη

διαλυτότητα του νερού στο  $\text{CaCO}_3$ , είναι ικανές συνθήκες για τη δημιουργία καθαλατώσεων ακόμη και σε διάστημα μερικών ωρών.

Εν τέλει, ο λόγος που αναζητήθηκε μη μαγνητικό υλικό ως δοκίμιο για το πείραμα, είναι ότι για τη χαλύβδινη βίδα, το πείραμα με το μαγνητικό πεδίο δεν είναι συμμετρικό με εκείνο χωρίς το πεδίο. Κι αυτό γιατί, η βίδα έλκεται από τους μαγνήτες και τείνει να προσκολλάται στα τοιχώματα του σωλήνα. Έτσι, η ροή που δημιουργείται γύρω από τη βίδα όταν εφαρμόζεται η μαγνητική συσκευή, δεν είναι όμοια με εκείνη που δημιουργείται αν η βίδα μπορεί να κινείται ελεύθερα ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα. Όταν η βίδα βρίσκεται προσκολλημένη στο σωλήνα, υπάρχει μια κοιλότητα στη περιοχή που εφάπτεται με τα τοιχώματα, η οποία όπως φαίνεται αποτελεί ιδανική τοποθεσία για την εναπόθεση του  $\text{CaCO}_3$ , πράγμα που αντισταθμίζει την όποια δράση του πεδίου. Εξάλλου, σύμφωνα με τη θεωρία [20], το πεδίο λειτουργεί συνεργατικά με τη τυρβώδη ροή, το οποίο σημαίνει ότι για αυτή τη κοιλότητα όπου η ροή είναι σχετικά στρωτή, δε μπορεί να δημιουργηθεί το φαινόμενο της αλλαγής φάσης. Οι παραπάνω ισχυρισμοί επιβεβαιώνονται από το γεγονός ότι στο τέλος του πειράματος, στα σημεία όπου η βίδα εφάπτονταν με το σωλήνα, ήταν εμφανείς δύο έντονες γραμμές από περίσσεια εναποθέσεων  $\text{CaCO}_3$ .

Έτσι, τελικά, πραγματοποιήθηκε το τελευταίο πείραμα, το οποίο εξετάζει τις επιπτώσεις του μαγνητικού πεδίου σε δομές ασβεστίτη που βρίσκονται σε επιφάνεια αλουμινίου. Ο λόγος για τον οποίο μειώθηκε η ταχύτητα της ροής σε αυτή τη προσπάθεια, είναι αφενός γιατί βοηθάει στη συγκράτηση του δοκιμίου και αφετέρου γιατί έτσι αυξάνεται ο χρόνος έκθεσης της ροής του νερού για μία διέλευση μπροστά από τη μαγνητική συσκευή ( $t_{m\_short}$ ), ενώ η ροή συνεχίζει να είναι τυρβώδης. Αν υποθεθεί ότι η ροή κοντά στο δοκίμιο ήταν όμοια για τα στάδια 3 και 4, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επιβολή του μαγνητικού πεδίου ευθύνεται για την απομάκρυνση ορισμένων στοιβάδων  $\text{CaCO}_3$  από την επιφάνεια του δοκιμίου. Η μείωση του βάρους ήταν αρκετή ώστε να θεωρείται εκτός των ορίων σφάλματος της ζυγαριάς και της διαδικασίας μέτρησης.

Κλείνοντας, πρέπει να τονιστεί, πως τα συμπεράσματα των πειραμάτων που εκπονήθηκαν στη διάρκεια της παρούσας εργασίας, δεν είναι σε καμία περίπτωση καταληκτικά ως προς την εμφάνιση του φαινομένου της διάσπασης του ασβεστίτη, παρουσία του μαγνητικού πεδίου. Για πιο χειροπιαστά αποτελέσματα, απαιτούνται

περισσότερες προσπάθειες και συγκεκριμένα στη κατεύθυνση του τελευταίου πειράματος, ούτως ώστε να διαμορφωθεί ένα σύνολο μετρήσεων που θα επιτρέψει να κριθεί με μεγαλύτερη ασφάλεια η συνεισφορά του μαγνητικού πεδίου.

#### **6.4. Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες**

Κατά τη προετοιμασία της πειραματικής διάταξης, έγιναν ορισμένοι συμβιβασμοί ως προς τις μεθόδους και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, σε αντιστοιχία με τους πόρους και το χρόνο που υπήρχαν διαθέσιμα.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η προσπάθεια εστιάσθηκε στην επιτυχή εμφάνιση του φαινομένου, ενώ δεν υπήρξε ιδιαίτερη εστίαση στην παραμετροποίησή του, κάτι που θα απαιτούσε πολύ μεγαλύτερες δαπάνες. Συνοπτικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι περιορισμοί του πειράματος αφορούσαν κυρίως τη δυνατότητα για έλεγχο των διαφόρων μεταβλητών, όπως η παροχή του νερού ή η θερμοκρασία, γιατί όσον αφορά τη διαδικασία των μετρήσεων, υπήρχε αρκετά καλή εγκυρότητα και ακρίβεια.

Παρακάτω, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις οι οποίες βασίζονται στις δυσκολίες που συναντήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμες κατά τη διεξαγωγή μιας μετέπειτα έρευνας πάνω στο φαινόμενο που εξετάζεται.

Η υδραυλική διάταξη θα ήταν καλύτερα αν διέθετε τα εξής επιπρόσθετα χαρακτηριστικά, σε σχέση με αυτή που χρησιμοποιήθηκε:

- Δυνατότητα παρακολούθησης της παροχής του νερού
- Δυνατότητα ψύξης του νερού στο βαρέλι για καλύτερη ρύθμιση της θερμοκρασίας.
- Αποσπώμενα μέρη στις σωληνώσεις ούτως ώστε να είναι εφικτή η τοποθέτηση των δοκιμών στο μέσο του δικτύου κι όχι στο άκρο του σωλήνα όπως συνέβαινε στο πείραμα.

Οι παραπάνω βελτιώσεις και ειδικά η τελευταία, βοηθούν αρκετά στη συστηματοποίηση του πειράματος και στην εξοικονόμηση χρόνου, καθώς ένα δύσκολο



και αρκετά χρονοβόρο κομμάτι της ερευνητικής διαδικασίας, ήταν η τοποθέτηση των δοκιμίων και της μαγνητικής συσκευής, με τρόπο ώστε να συγκρατούνται στις θέσεις τους παρά τη πίεση της ροής.

Επιπλέον, για τη προετοιμασία των δοκιμίων, θα ήταν προτιμότερη μια πιο ελεγχόμενη χημική διεργασία, η οποία εγγυάται πιο σίγουρα αποτελέσματα. Στο πείραμα, η δημιουργία του τεχνητού στρώματος των καθαλατώσεων στην επιφάνεια των δοκιμίων, έγινε με τη καταβύθιση τους σε υπέρκορο διάλυμα ανθρακικού ασβεστίου. Μια καλύτερη μέθοδος είναι με τη χρήση διαλυμάτων χλωριούχου ασβεστίου ( $\text{CaCl}_2$ ) και ανθρακικού νατρίου ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), τα οποία καλό είναι να παρασκευαστούν με απιονισμένο νερό για να αποφεύγεται η δράση ανεπιθύμητων ιόντων. Με αυτό το τρόπο, μπορεί να δειχτεί με μεγαλύτερη βεβαιότητα, ότι αν η θερμοκρασία είναι μικρότερη των  $60^\circ\text{C}$ , από τη στιγμή που αναμειγνύονται τα διαλύματα, αρχίζουν να δημιουργούνται κρύσταλλοι ασβεστίτη στις επιφάνειες των δοκιμίων, μέσω της ετερογενούς πυρηνογένεσης [21, 23].

Μια αρκετά διαφορετική προσέγγιση στο πείραμα είναι η ενσωμάτωση τμήματος σωλήνα με καθαλατώσεις στο υδραυλικό δίκτυο, αντί για τη χρήση δοκιμίων με επικάλυψη  $\text{CaCO}_3$  όπου οι εναποθέσεις δεν είναι αρκετά στέρες, ενώ ενδεχομένως αλλάζουν και τη γεωμετρία της ροής<sup>9</sup>. Τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από αυτή τη παραπάνω προσέγγιση είναι η δυσκολία στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς δε μπορούν να γίνουν εύκολα μετρήσεις στο εσωτερικό του σωλήνα. Μια καλή αξιοποίηση της παραπάνω μεθόδου είναι η δημιουργία δύο παράλληλων πειραμάτων επάνω στην ίδια διάταξη με τη χρήση ενός διαχωριστή ροής. Και στις δύο διαδρομές της ροής υπάρχει ένα κομμάτι του σωλήνα με επικαθίσεις ασβεστίτη ενώ στο ένα από τα δύο τμήματα εφαρμόζεται εξωτερικά η μαγνητική συσκευή. Μετά το πέρας εύλογου χρονικού διαστήματος μπορούν να διαπιστωθούν οι επιπτώσεις που είχε η εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου στους σχηματισμούς του ασβεστίτη. Το υδραυλικό δίκτυο μπορεί να είναι είτε ανοικτό είτε κλειστό όπως στη περίπτωση των παραπάνω πειραμάτων.

---

<sup>9</sup> Τα βασικά κίνητρα για τη μελέτη του μαγνητικού καθαρισμού του νερού, είναι η επίλυση των προβλημάτων που προκαλούν οι καθαλατώσεις του  $\text{CaCO}_3$  σε αγωγούς βιομηχανικών εφαρμογών. Τα οριακά στρώματα της ροής του νερού σχηματίζονται πιθανόν με διαφορετικό τρόπο γύρω από ένα μικρό αντικείμενο που βρίσκεται παγιδευμένο εντός του αγωγού και διαφορετικά για τα τοιχώματα του αγωγού.

Σε μια μελλοντική έρευνα που έχει ως στόχο την αναλυτική διερεύνηση του φαινομένου, θα πρέπει να περιλαμβάνεται στις μετρούμενες μεταβλητές, το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν το φαινόμενο, όπως η ένταση του πεδίου, η θερμοκρασία, η σκληρότητα του νερού, η περιεκτικότητά του σε ιόντα και ο αριθμός Reynolds. Λόγω της σύνθετης φύσης του φαινομένου, αν ο στόχος είναι να εντοπιστούν οι ακριβείς συνθήκες που ευνοούν την εμφάνισή του, θα πρέπει, επίσης, να μελετηθούν οι συσχετισμοί μεταξύ των παραπάνω παραγόντων, κάτι που αποτέλεσε πρόκληση για πολλές παλαιότερες έρευνες. Απαιτείται, λοιπόν, η καθιέρωση ενός συστήματος κανόνων όσον αφορά τη πειραματική διαδικασία, προκειμένου να αποφευχθεί η σύγχυση μεταξύ των ερευνών [3].

## Πηγές

- [1] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, Inc, 1999.
- [2] Ι. Λ. Τσαλαμέγκας και Ι. Α. Ρουμελιώτης, *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία - Τόμος Β'*, τόμ. 2, Αθήνα: Τζιόλα, 2010, p. 868.
- [3] X. F. Pang και W. Scientific, *Water: Molecular Structure and Properties*, World Scientific, 2014.
- [4] C. Klein, *Manual of mineral science*, Wiley, 2001.
- [5] J. P. Boon και S. Yip, *Molecular hydrodynamics*, Courier Corporation, 1991.
- [6] L. M. Milne-Thomson, *Theoretical Hydrodynamics*, 1968.
- [7] E. Guyon, J.-P. Hulin, L. Petit και C. D. Matescu, *Physical hydrodynamics*, London, UK: Oxford University Press, 2015.
- [8] L. D. Landau και E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon Books Ltd., 1987.
- [9] Ε. Κ. Γιαννημαράς, *Η καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου σε υδατικά διαλύματα*, Πάτρα, 2002.
- [10] J. Anwar και D. Zahn, «Polymorphic phase transitions: Macroscopic theory and molecular simulation,» *Advanced Drug Delivery Reviews*, τόμ. 117, pp. 47-70, 2017.
- [11] H. Blatt, G. Middleton και R. Murray, *Origin of sedimentary rocks*, Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [12] A. C. Cefalas, S. Kobe, G. Dražic, E. Sarantopoulou, Z. Kollia, J. Stražičar και A. Meden, «Nanocrystallization of CaCO<sub>3</sub> at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach,» τόμ. 254, pp. 6715-6724, 2008.
- [13] W. S. Fyfe, «Calcite Aragonite Problem,» *AAPG Bulletin*, τόμ. 48, αρ. 4, pp. 526-526, 1964.
- [14] Y. Kitano, K. Park και D. W. Hood, «Pure aragonite synthesis,» *Journal of Geophysical Research*, τόμ. 67, αρ. 12, pp. 4873-4874, 1962.
- [15] P. Bots, L. G. Benning, J.-D. Rodriguez-Blanco, T. Roncal-Herrero και S. Shaw, «Mechanistic Insights into the Crystallization of Amorphous Calcium Carbonate (ACC),» τόμ. 12, pp. 3806-3814, 2012.
- [16] J. D. Rodriguez-Blanco, S. Shaw και L. G. Benning, «The kinetics and mechanisms of amorphous calcium carbonate (ACC) crystallization to calcite, viavaterite.,» τόμ. 3, pp. 265-271.
- [17] C. Gabrielli, R. Jaouhari, G. Maurin και M. Keddad, «Magnetic water treatment for scale prevention,» *Water Research*, τόμ. 35, pp. 3249-3259, 2001.
- [18] L. C. Lipus και D. Dobersek, «Influence of magnetic field on the aragonite precipitation,» τόμ. 62, pp. 2089-2095, 2007.
- [19] F. Alimi, M. Tlili, C. Gabrielli, M. Georges και M. Ben Amor, «Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate,» τόμ. 40, pp. 1941-1950, 2006.
- [20] A. C. Cefalas, E. Sarantopoulou, Z. Kollia, C. Riziotis, G. Dražic, S. Kobe, J. Stražičar και A. Meden, «Magnetic Field Trapping in Coherent Antisymmetric States of Liquid Water Molecular Rotors,» τόμ. 7, pp. 1800-1805, 2010.

- [21] C. Sronsri, K. U-yen και W. Sittipol, «Quantitative analysis of calcium carbonate formation in magnetized water,» τόμ. 245, p. 122735, 2020.
- [22] L. Jiang, J. Zhang και D. Li, «Effects of permanent magnetic field on calcium carbonate scaling of circulating water,» *Desalination and Water Treatment*, pp. 1275-1285, 2015.
- [23] C. Y. Tai, C.-K. Wu και M.-C. Chang, «Effects of magnetic field on the crystallization of CaCO<sub>3</sub> using permanent magnets,» τόμ. 63, pp. 5606-5612, 2008.
- [24] J. S. Baker και S. J. Judd, «Magnetic Amelioration Of Scale Formation,» *Water Research*, τόμ. 30, αρ. 2, pp. 247-260, 1996.
- [25] J. Sohaili, H. S. Shi, Lavania-Baloo, N. H. Zardari, N. Ahmad και S. K. Muniyandi, «Removal of scale deposition on pipe walls by using magnetic field treatment and the effects of magnetic strength,» τόμ. 139, pp. 1393-1399, 2016.
- [26] F. Alimi, M. M. Tlili, M. B. Amor, G. Maurin και C. Gabrielli, «Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material,» τόμ. 48, pp. 1327-1332, 2009.
- [27] N. Saksono, M. Gozan, S. Bismo, E. Krisanti, R. Widaningrum και S. K. Song, «Effects of magnetic field on calcium carbonate precipitation: Ionic and particle mechanisms,» τόμ. 25, pp. 1145-1150, 2008.
- [28] F. Alimi, M. Tlili, M. B. Amor, G. Maurin και C. Gabrielli, «Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation in the presence of foreign ions,» τόμ. 45, pp. 56-62, 2009.
- [29] L. C. Lipus, J. Krope και L. Crepinsek, «Dispersion Destabilization in Magnetic Water Treatment,» τόμ. 236, pp. 60-66, 2001.
- [30] S. Kobe, A. C. Cefalas, G. Drazic, E. Sarantopoulou, P. J. McGuinness, J. Strazisar και A. Meden, «A practical and theoretical study of the formation of CaCO<sub>3</sub> in the presence of a magnetic field,» *Intermag*, 2003.
- [31] L. D. Landau, J. S. Bell, M. J. Kearsley, L. P. Pitaevskii, E. M. Lifshitz και J. B. Sykes, *Electrodynamics of Continuous Media*, Elsevier Science, 2013.
- [32] S. Kobe, G. Dražić, A. C. Cefalas, E. Sarantopoulou και J. Stražičar, «Nucleation and crystallization of CaCO<sub>3</sub> in applied magnetic fields,» τόμ. 5, pp. 243-253, 2002.
- [33] C. Sronsri, K. U-yen και W. Sittipol, «Analyses of vibrational spectroscopy, thermal property and salt solubility of magnetized water,» τόμ. 323, p. 114613, 2021.
- [34] E. J. L. Toledo, T. C. Ramalho και Z. M. Magriotis, «Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models,» τόμ. 888, pp. 409-415, 2008.
- [35] M. Colic και D. Morse, «The elusive mechanism of the magnetic ‘memory’ of water,» τόμ. 154, pp. 167-174, 1999.
- [36] A. Kotb, «Magnetized Water and Memory Meter,» τόμ. 05, pp. 422-426, 2013.
- [37] P. Hunton, «Research on eggshell structure and quality: An historical overview,» *Brazilian Journal of Poultry Science*, τόμ. 7, αρ. 2, pp. 67-71, 2005.
- [38] Y. Nys, J. Gautron, J. M. Garcia-Ruiz και M. T. Hincke, «Avian eggshell mineralization: biochemical and functional characterization of matrix proteins,» *Comptes Rendus Palevol*, τόμ. 3, αρ. 6, pp. 549-562, 2004.

- [39] M. Y. E. Hafidi, «Existing Scale Deposits Removal by Magnetic Water Treatment: Theoretical Study and Experiment,» *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, τόμ. 3, 2017.
- [40] H. E. Lundager Madsen, «Crystallization of calcium carbonate in magnetic field in ordinary and heavy water,» *Journal of Crystal Growth*, τόμ. 267, αρ. 1, pp. 251-255, 2004.