



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**«Ανάπτυξη & σχεδίαση τρισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής  
τομογραφίας»**

Κυρίκος Ευθύμιος

*Επιβλέπων Καθηγητής: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π*

ΑΘΗΝΑ 2016



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου Εργασίας για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου, αναθέτοντάς μου την επιμέλεια της συλλογής των στοιχείων και της συγγραφής της παρούσας εργασίας με θέμα «Ανάπτυξη & σχεδίαση τρισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας», καθώς και για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Ρίζο Ευάγγελο και κ. Αγγελόπουλο Σπυρίδωνα για την συνεισφορά τους στη διεκπεραίωση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, κ. Ν. Θεοδώρου (Καθηγητή Ηλ. Μηχανολόγων & Μηχανικών Η/Υ) και κ. Π. Τσαραμπάρη (Λέκτορας Ηλ. Μηχανολόγων & Μηχανικών Η/Υ) για τη συμβολή τους στη διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια δίδασκω και επιστήθια φίλη μου Δις Μαρία Ελισσάβετ Κούλη για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά της, η οποία ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.



# Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια εκπόνησης του ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού». Η εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη και κατασκευή ενός συστήματος ηλεκτρικής τομογραφίας για τη μέτρηση της πολυφασικής ροής κατά την εξόρυξη αργού πετρελαίου.

Η διαχείριση ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων βασίζεται στις μετρήσεις κατά τη διάρκεια της εξόρυξης. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται εισάγονται ως είσοδοι σε μοντέλα πρόβλεψης ώστε να είναι διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή η κατάσταση του κοιτάσματος και να λειτουργεί η διαδικασία εξόρυξης με το βέλτιστο τρόπο. Γι' αυτό το λόγο η επιτυχής διαχείριση εξαρτάται από την ποιότητα και το είδος των μετρήσεων. Η σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας μεθόδου πρακτικής, γρήγορης και με ακριβή αποτελέσματα.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι κατάλληλη, όπως παρουσιάζεται, για όλα τα παραπάνω. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι σύγχρονες μέθοδοι τομογραφίας για τη μέτρηση μιας πολυφασικής ροής. Στο κεφάλαιο γίνεται αντιληπτό πως οι συμβατικές μέθοδοι είναι μερικώς εφαρμόσιμες καθώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλες τις πιθανές γεωμετρίες. Αντίθετα, στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας τα ηλεκτρόδια μπορούν να κατανεμηθούν σε πολλές τοπολογίες με διαφορετικά σχήματα και μεγέθη που μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε οποιαδήποτε επιφάνεια καθιστώντας το σχήμα του αισθητήρα κατάλληλο για τη κάθε εφαρμογή. Στην εργασία έγινε εκτενής αναφορά στη διαδικασία σχεδιασμού της γεωμετρίας καθώς και μελέτη του τρόπου επηρεασμού του πεδίου που παράγεται.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάστηκαν ορισμένα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ρευστών. Η διαδικασία της ηλεκτρικής τομογραφίας περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου που αλληλεπιδρά με τα υλικά εντός του χώρου παρακολούθησης. Ο σκοπός του κεφαλαίου ήταν η αναφορά ορισμένων φυσικών φαινομένων που δείχνουν τον τρόπο επηρεασμού του ηλεκτρικού πεδίου με την ύλη. Στη συνέχεια μελετήθηκε μια μέθοδος γραμμικοποίησης του μοντέλου του αισθητήρα και της κατασκευής του πίνακα ευαισθησίας. Η μέθοδος που εξετάζεται είναι γενικευμένη ώστε να υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της και σε διαφορετικές γεωμετρίες. Για τον υπολογισμό του πίνακα ευαισθησίας μελετήθηκε και η αναλυτική συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται εντός του αισθητήρα καθώς και ο τρόπος που επηρεάζει την ανάλυση της ανακατασκευασμένης εικόνας. Επιπλέον, αναπτύχθηκε μια μέθοδος μέτρησης των χωρητικότητων, μέσω της κατασκευής ενός *lock-in* ενισχυτή. Εξετάστηκαν τα επιμέρους κυκλώματα που απαρτίζουν το σύστημα, έγινε υπολογισμός καθενός στοιχείου και κατασκευή του συστήματος. Το σύστημα κατασκευάστηκε και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με πολύμετρο μέτρησης εμπέδησης του εργαστηρίου. Εξετάστηκε η μέθοδος λήψης, καταγραφής και αποθήκευσης των μετρήσεων καθώς και η διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων και αλγορίθμων.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις βάσει του συνολικού συστήματος που κατασκευάστηκε και έγινε εκτενής σύγκριση με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις μέσω λογισμικού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάζονται όλες οι εκτιμώμενες και οι μετρούμενες τιμές των χωρητικότητων και στο τέλος εμφανίζεται και η απεικόνιση της κάθε σειράς μετρήσεων όπως κατασκευάστηκε στο *Matlab*. Οι μετρήσεις και οι απεικόνιση έγιναν κάτω από εργαστηριακές συνθήκες με στατικές τοπολογίες καθώς η εργασία είχε στόχο τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη γενικότερη σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρικής τομογραφίας.



# Abstract

The research documented in this Thesis was performed at the Metallurgy Lab of National Technical University of Athens. The object of this Thesis is the study and development of an electrical capacitance tomography system for the purpose of multiphase flow measurement.

The management of a hydrocarbon reservoir is based on measurements made in the well during the extraction process. The available information taken from the measurements is used as input into forecast models of the reservoir, so as to operate the well in the most optimal way. The objective of this work is to develop a method for providing high quality measurements from the inside of oil wells.

It is shown that electrical capacitance tomography is a suitable method for this purpose. In the first chapter the conventional tomography methods for the measurement of multiphase flow are presented. The conventional methods are partially applicable due to the high variance of geometries. In contrary, at the electrical capacitance tomography the sensors use electrodes at different topologies, shapes and sizes on any possible surface making the sensor shape suitable for a specific application. The design process and all the parameters who affect the behavior of the sensor are considered in the fourth chapter.

In the second chapter the electrical characteristics of fluids are considered. Electrical capacitance tomography method uses electric fields inside the medium which interacts with the materials. The purpose of this chapter is the study of the physical phenomena which affect the behavior of a specific material with electricity. Subsequently, a linearization method for the sensor was developed for the creation of sensitivity matrix. The developed method was as general as possible to match all possible geometries. In addition, the study of electric field inside the sensor and how it affects the resolution of measurements was presented.

For the successful image reconstruction, a reliable measuring method is needed. In the fifth chapter an AC-based method for capacitance measurement is developed using a lock-in amplifier. In this chapter all the sub circuits of lock-in amplifier are designed and simulated to match the desirable behavior. Moreover, there is a reference in measuring sequence protocols as well as the storage and recovering processes of data. Finally, some of the image reconstruction techniques are considered and compared.

In the final chapter the measurements of the final system are presented and compared with simulations for different multiphase topologies. There are some charts showing the quality of the system with reference to simulations. Finally, the reconstructed images for each of those topologies are presented. The reconstructed images are created using Matlab software. The measurements and reconstruction were held under laboratory conditions using offline measurements.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	iii
Abstract .....	vii
Κατάλογος Σχημάτων .....	xiii
Κατάλογος Πινάκων .....	xvii
<b>1 Βασικές αρχές μέτρησης πολυφασικών ροών .....</b>	<b>19</b>
1.1 Εισαγωγή .....	19
1.2 Πολυφασική ροή .....	21
1.2.1 Πρότυπα ροής .....	22
1.2.2 Μοντελοποίηση πολυφασικής ροής .....	24
1.3 Σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης πολυφασικής ροής .....	26
1.3.1 Καθορισμός φάσης .....	26
1.3.2 Τομογραφική απεικόνιση ροής .....	32
1.3.3 Αισθητήρες πλέγματος .....	36
<b>2 Ηλεκτρικές ιδιότητες των ρευστών .....</b>	<b>39</b>
2.1 Εμπέδηση και σύνθετη επιτρεπτότητα .....	39
2.2 Χαρακτηρισμός αντίστασης υλικών .....	41
2.3 Διηλεκτρική χαλάρωση .....	41
<b>3 Ηλεκτρική Τομογραφία .....</b>	<b>45</b>
3.1 Εισαγωγή .....	45
3.2 Εξέλιξη της μεθόδου .....	45
3.3 Τομογραφία .....	46
3.4 Ηλεκτρική τομογραφία .....	47
3.5 Πίνακας ευαισθησίας .....	49
3.6 Αναλυτική έκφραση ευαισθησίας .....	53
3.7 Διακριτοποίηση πίνακα .....	54
<b>4 Σχεδιασμός αισθητήρα .....</b>	<b>57</b>
4.1 Εισαγωγή .....	57

4.1.1.	Δισδιάστατος αισθητήρας .....	57
4.1.2.	Τρισδιάστατος αισθητήρας .....	58
4.2	Τύπος αισθητήρα .....	59
4.3	Ανάλυση αισθητήρα .....	60
4.4	Επιλογή και υπολογισμός ηλεκτροδίων .....	65
4.5	Προσομοιώσεις.....	67
4.5.1	Δισδιάστατο μοντέλο .....	67
4.5.2	Τρισδιάστατο μοντέλο.....	72
4.5.3	Πειραματική διάταξη.....	74
<b>5</b>	<b>Σχεδίαση συστήματος μέτρησης .....</b>	<b>77</b>
5.1	Εισαγωγή.....	77
5.2	Πρότυπα μετρήσεων χωρητικότητας.....	77
5.3	Σχεδίαση μετρητικού συστήματος.....	79
5.3.1	Προενισχυτής.....	80
5.3.2	Γεννήτρια σήματος αναφοράς.....	81
5.3.3	Αναλογικός πολλαπλασιαστής.....	81
5.3.4	Βαθυπερατό φίλτρο.....	84
5.3.5	Ενισχυτής εξόδου.....	87
5.4	Προσομοιώσεις:.....	88
<b>6</b>	<b>Σύστημα επεξεργασίας των μετρήσεων.....</b>	<b>91</b>
6.1	Εισαγωγή.....	91
6.2	Διακοπτικό σύστημα ελέγχου ηλεκτροδίων.....	92
6.3	Διακριτοποίηση των μετρήσεων. ....	93
6.4	Βαθμονόμηση .....	94
6.5	Υπολογισμός επιτρεπτότητας.....	94
6.5.1	Γραμμική μέθοδος πίσω προβολής.....	95
6.5.2	Κανονικοποίηση Tikhonov .....	96
6.5.3	Ανάλυση σε ιδιάζουσες τιμές .....	97

6.5.4	Επαναληπτικές μέθοδοι ανακατασκευής εικόνας.....	97
<b>7</b>	<b>Προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....</b>	<b>101</b>
7.1	Σύγκριση <i>lock-in</i> ενισχυτή και μετρητή εμπέδησης .....	101
7.2	Αποτελέσματα – Προσομοιώσεις .....	103
7.2.1	Κατανομή πετρελαίου – αέρα .....	104
7.2.2	Κατανομή νερό – αέρας.....	106
7.2.3	Κατανομή νερό – πετρέλαιο .....	108
7.3	Ανακατασκευή εικόνας – ψηφιακή απεικόνιση.....	111
<b>8</b>	<b>Θέματα για περαιτέρω μελέτη.....</b>	<b>117</b>
8.1	Επίλυση ορθού προβλήματος με τη χρήση νευρωνικών δικτύων στο τρισδιάστατο χώρο 117	
8.2	Σχεδίαση τρισδιάστατου αισθητήρα .....	118
8.3	Ηλεκτρική τομογραφία με χρήση πολλαπλών μεθόδων.....	119
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>121</b>



# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αισθητήριο σύστημα που βυθίζεται εντός του πηγαδιού. Το σύστημα των τροχών είναι κομμάτι του ρομποτικού συστήματος. Το εμπρός μέρος του καλωδίου είναι το αισθητήριο σύστημα .....	20
Σχήμα 1.2: Πρότυπα ροής υγρού - αερίου για (α) κάθετη ροή, (β) οριζόντια ροή .....	22
Σχήμα 1.3: Χάρτης προτύπων ροής για κάθετη ροή νερού – αέρα. Οι γραμμές είναι το όριο μετάβασης από ένα πρότυπο ροής σε ένα άλλο. ....	24
Σχήμα 1.4: Σχεδίαση ακίδας αισθητήρα για μέτρηση αγωγιμότητας. (α) οριζόντια τομή (β) τυπική μορφή μετρούμενου σήματος τάσης για πρότυπο ροής με μορφή φυσαλίδων. ....	28
Σχήμα 1.5: Διαγράμματα για τη μέτρηση της εγκάρσιας τομής μέσω εξασθένησης ακτινοβολίας (α) τεχνική μιας λήψης (β) τεχνική πολλαπλών ακτινών .....	30
Σχήμα 1.6: Αισθητήρες μέτρησης αγωγιμότητας. (α) τοπολογία δύο δακτυλιοειδών ηλεκτροδίων (β) τοπολογία ημι-δακτυλίου .....	31
Σχήμα 1.7: Βασική διάγραμμα απεικόνισης αρχής λειτουργίας της ηλεκτρικής τομογραφίας .....	33
Σχήμα 1.8: (α) Σχεδιάγραμμα απεικόνισης ενός αισθητήρα πλέγματος (β) φωτογραφία αισθητήρα	37
Σχήμα 1.9: Ηλεκτρονικό σύστημα ενός 4 x 4 αισθητήρα πλέγματος .....	38
Σχήμα 2.1: Παράδειγμα μιας απλής κυψέλης μέτρησης .....	41
Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης των διαφορετικών διηλεκτρικών μηχανισμών .....	42
Σχήμα 3.1: Η εικόνα απεικονίζει το χώρο $\Omega$ με το όριο $\partial\Omega$ στο οποίο εκτελούνται οι μετρήσεις $m_i$ . Συνήθως μια διαταραχή παρουσιάζεται στο χώρο $\Omega$ και το φαινόμενο μετράται πάνω στο όριο. Κάθε μέτρηση $m_i$ είναι περισσότερο ευαίσθητη σε ένα κομμάτι του χώρου $\Omega$ και η πίνακας αυτός απεικονίζεται στο πίνακα $S_i$ .....	47
Σχήμα 3.2: Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη 12 ηλεκτροδίων γύρω από ένα δακτύλιο. Σε ένα ηλεκτρόδιο εφαρμόζεται σταθερό δυναμικό $\Phi_1$ ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν γειωμένα. Στη συνέχεια μετράται η χωρητικότητα μεταξύ κάθε γειωμένου ηλεκτροδίου με την πηγή. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται ένας δοκιμαστικός αισθητήρας με 6 ηλεκτρόδια. Η θέση κάθε ηλεκτροδίου παρουσιάζεται με τη διακεκομμένη γραμμή. ....	48
Σχήμα 3.3: Τυπική γεωμετρία αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων $e_i$ εξαρτάται από τη κατανομή της επιτρεπτότητας εντός του χώρου $\Omega$ .....	49
Σχήμα 3.4: Το αρχικό δυναμικό εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο $j$ . Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το περίγραμμα $\delta e_i$ πάνω στο οποίο υπολογίζεται το ολοκλήρωμα. Όσο το $\delta e_i$ πλησιάζει το ηλεκτρόδιο $i$ τόσο η τιμή $u_i$ πλησιάζει το 1, που σύμφωνα με τη σχέση (2.6) δεν αλλάζει τη τιμή του ολοκληρώματος. ....	51
Σχήμα 4.1: Μοντέλο 2D αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται γύρω από δακτύλιο στο όριο του χώρου μέτρησης $\Omega$ . Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS Maxwell. ....	58
Σχήμα 4.2: Τρεις διαφορετικοί σχηματισμοί ενός αισθητήρα τρισδιάστατης τομογραφίας ECVT. Αριστερά είναι ένας αισθητήρας ενός επιπέδου τριγωνικής τοπολογίας, ενώ οι υπόλοιποι είναι ορθογώνιοι τριών και δύο επιπέδων αντίστοιχα [55].....	59
Σχήμα 4.3: Ανάλυση αισθητήρα στο εσωτερικό. Με μαύρο χρώμα στο όριο απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια. Οι τιμές αναφέρονται στη μετατόπιση $1000 \times \delta x (m^3)$ .....	62
Σχήμα 4.4: Ανάλυση αισθητήρα στο εσωτερικό. Με μαύρο χρώμα στο όριο απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια. Οι τιμές αναφέρονται στη μετατόπιση $1000 \times \delta x (m^2)$ .....	63
Σχήμα 4.5: Εξάρτηση ανάλυσης (a), (b) και διαφορικής (c), (d) ανάλυσης σε σχέση με τον αριθμό των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός έγινε σε σύστημα αισθητήρα ακτίνας $R = 10cm$ με $n = 50\%$ . Τα	

διαγράμματα (α), (c) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα προς το κέντρο του ηλεκτροδίου στο όριο ενώ τα (b), (d) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα ως το κέντρο του κενού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων. ....	64
Σχήμα 4.6: Εξάρτηση ανάλυσης (a), (b) και διαφορικής (c), (d) ανάλυσης σε σχέση με το λόγο του κενού $n$ . Ο υπολογισμός έγινε σε σύστημα αισθητήρα ακτίνας $R = 10cm$ με $n = 50\%$ . Τα διαγράμματα (α), (c) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα προς το κέντρο του ηλεκτροδίου στο όριο ενώ τα (b), (d) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα ως το κέντρο του κενού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων. ....	65
Σχήμα 4.7: Κάτοψη δισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Με σκούρο μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια στο εξωτερικό περίβλημα του αισθητήρα. ....	67
Σχήμα 4.8: Μοντέλο δισδιάστατου αισθητήρα (αριστερά) και διαμέριση εσωτερικού χώρου (δεξιά). Για τη κατασκευή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS MAXWELL. ....	68
Σχήμα 4.9: Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο του αισθητήρα με το ένα ηλεκτρόδιο σε δυναμικό $V = 5Volts$ με τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια γειωμένα. ....	68
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Η ένταση παρουσιάζει μέγιστες τιμές κοντά στα άκρα του ηλεκτροδίου Τα διανύσματα είναι εφαπτομενικά στις δυναμικές γραμμές. ....	69
Σχήμα 4.11: Κατανομή ευαισθησίας στο επίπεδο της τομής για τα διάφορα ζεύγη ηλεκτροδίων. ...	70
Σχήμα 4.12: Κατανομή δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο σε μη ομοιόμορφη κατανομή. Στις εικόνες (α) και (δ) παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού ενώ στην εικόνα (γ) η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. ....	71
Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατο μοντέλο αισθητήρα. Η κατασκευή έγινε με τη χρήση του ANSYS MAXWELL. ....	73
Σχήμα 4.14: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων διαφορετικών επιπέδων	73
Σχήμα 4.15: Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο χώρο που παράγεται από ένα ηλεκτρόδιο. ....	74
Σχήμα 4.16: κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων στο ίδιο επίπεδο. ....	74
Σχήμα 4.17: Διάταξη αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. ....	75
Σχήμα 4.18: Εσωτερικό διάταξης. ....	76
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση μεθόδου μέτρησης ηλεκτρικής τομογραφίας. Με $S$ χαρακτηρίζεται το ηλεκτρόδιο πηγής και με $D$ το ηλεκτρόδιο δέκτης το οποίο και μετράται. ....	78
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση των δύο μεθόδων διεξαγωγής των μετρήσεων. Με τις γραμμές στο εσωτερικό απεικονίζεται το ρεύμα μεταξύ των μετρούμενων ζευγών. ....	78
Σχήμα 5.3: Μπλοκ διάγραμμα <i>AC-based</i> συστήματος μέτρησης χωρητικότητας. ....	79
Σχήμα 5.4: Στάδιο προενισχυτή. ....	80
Σχήμα 5.5: Στάδιο προενίσχυσης. Με πράσινο απεικονίζεται το σήμα εισόδου ενώ με κόκκινο το σήμα εξόδου. Παρατηρείται μια διαφορά φάσης $180^\circ$ . ....	81
Σχήμα 5.6: Ολοπερατό φίλτρο 1ης τάξης. ....	82
Σχήμα 5.7: Απόκριση ολοπερατού φίλτρου. Το σήμα εξόδου (μπλε) και το σήμα εισόδου (πράσινο) έχουν διαφορά φάσης $180^\circ$ σύμφωνα με τη σχεδίαση. Το πλάτος του σήματος εξόδου είναι ελαφρώς αυξημένο κατά $200mV$ λόγω μη ιδανικών στοιχείων. ....	83
Σχήμα 5.8: Έξοδος αναλογικού πολλαπλασιαστή. Με κόκκινο και μπλε χρώμα είναι οι εισοδοί από το προενισχυτή και το ολοπερατό φίλτρο ενώ με κίτρινο είναι η έξοδος του πολλαπλασιαστή. ....	84
Σχήμα 5.9: Τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου ενός σταδίου πολλαπλής τοπολογίας. ....	85
Σχήμα 5.10: Έξοδος βαθυπερατού φίλτρου Παρατηρείται πως ο χρόνος απόκρισης φτάνει τα $0,5ms$ . Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος ο χρόνος απόκρισης πρέπει να είναι μικρός ώστε το μετρητικό σύστημα να μπορεί να λαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο. ....	86
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα bode βαθυπερατού φίλτρου. ....	87
Σχήμα 5.12: Τελικό στάδιο ενισχυτή. ....	88

Σχήμα 5.13: Απόκριση συστήματος. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται το σήμα στην είσοδο του τελικού ενισχυτή ενώ με πορτοκαλί το σήμα εξόδου. Λόγω της ανάστροφης συνδεσμολογίας αλλάζει η πολικότητα της τάσης. ....	88
Σχήμα 5.14: Κύκλωμα <i>lock-in</i> ενισχυτή. Η κατασκευή και προσομοίωση εκτελέστηκε στο πρόγραμμα <i>orcad pspice</i> . ....	88
Σχήμα 5.15: Τάση εξόδου <i>lock-in</i> ενισχυτή για διαφορετικές τιμές χωρητικότητας. ....	89
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα τάσης εξόδου - χωρητικότητας κυκλώματος. ....	90
Σχήμα 6.1: Σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας. Σε μπλε διάγραμμα παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που αποτελούν κομμάτι του υλικού ( <i>hardware</i> ) ενώ σε κίτρινο πλαίσιο είναι τα υποσυστήματα που αποτελούν το λογισμικό ( <i>software</i> ) της διάταξης.....	91
Σχήμα 6.2: Συγκριτικό διάγραμμα των μεθόδων ανακατασκευής εικόνας για συγκεκριμένες τοπολογίες .....	100
Σχήμα 7.1: Σύγκριση μετρήσεων <i>lock-in</i> ενισχυτή και LCR meter. Υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας..	102
Σχήμα 7.2: Σύγκριση μετρήσεων <i>lock-in</i> ενισχυτή και LCR meter. Υλικό υψηλής επιτρεπτότητας ...	103
Σχήμα 7.3: Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή πετρελαίου - αέρα .....	104
Σχήμα 7.4: Χωρητικότητες αισθητήρα για μέτρηση πετρελαίου – αέρα.....	105
Σχήμα 7.5: Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα ( <i>raw capacitances</i> ). Μέτρηση πετρέλαιο - αέρας .....	106
Σχήμα 7.6: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση πετρέλαιο - αέρας..	106
Σχήμα 7.7: Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή νερού - αέρα .....	107
Σχήμα 7.8: Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα ( <i>raw capacitances</i> ). Μέτρηση νερό - αέρας...	107
Σχήμα 7.9: Κανονικοποιημένες χωρητικότητες νερό - αέρα.....	108
Σχήμα 7.10: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση νερό – αέρας.....	108
Σχήμα 7.11: Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή πετρελαίου - νερού.....	109
Σχήμα 7.12: Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα ( <i>raw capacitances</i> ). Μέτρηση νερό – πετρέλαιο .....	109
Σχήμα 7.13: Κανονικοποιημένες χωρητικότητες πετρέλαιο - νερό .....	110
Σχήμα 7.14: Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση πετρέλαιο - νερό ..	110
Σχήμα 7.15: Απεικόνιση τομής Μέτρηση πετρέλαιο – αέρας.....	111
Σχήμα 7.16: Απεικόνιση τομής. Μέτρηση νερό – αέρας.....	112
Σχήμα 7.17: Απεικόνιση τομής. Μέτρηση νερό – πετρέλαιο .....	113
Σχήμα 7.18: Κανονικοποιημένες τιμές χωρητικότητας. Μέτρηση με μικρό αντικείμενο υψηλής επιτρεπτότητας σε περιοχή με υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας. ....	114
Σχήμα 7.19: Απεικόνιση τομής. Μέτρηση κομμάτι πάγου μέσα σε φάση πετρελαίου .....	115
Σχήμα 8.1: Σχέδιο προσαρμοστικού αισθητήρα .....	118



# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Διηλεκτρική χαλάρωση για συγκεκριμένα υγρά στους $25^{\circ}\text{C}$ . Οι τιμές των υλικών βασίστηκαν στα [39], [40].....	43
Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας κυλινδρικής τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των επιπέδων του αισθητήρα.....	60
Πίνακας 3: Καθορισμός ζευγών ηλεκτροδίων για τη μέτρηση των χωρητικότητων.....	93



# 1 Βασικές αρχές μέτρησης πολυφασικών ροών

## 1.1 Εισαγωγή

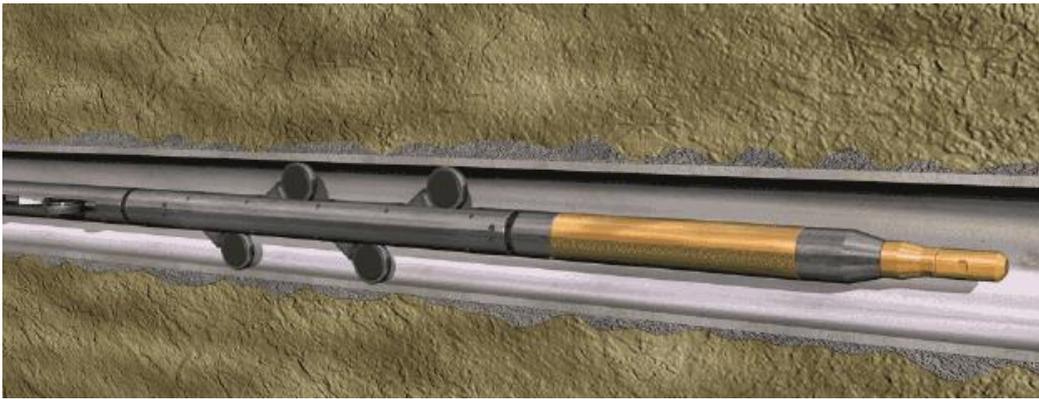
Η εξόρυξη αργού πετρελαίου είναι διαδικασία πολύπλοκη, επικίνδυνη και επίπονη. Το εσωτερικό του κοιτάσματος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ζωής του καθώς εξάγονται οι ωφέλιμοι υδρογονάνθρακες και αντικαθίστανται από άλλα υλικά όπως χώμα, πέτρες και θαλασσινό νερό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή μεταβολή των χαρακτηριστικών πυκνότητας, θερμοκρασίας και πίεσης στο εσωτερικό του πηγαδιού. Για όλα τα παραπάνω φαινόμενα, για λόγους ασφαλείας και για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της εξόρυξης είναι απαραίτητη η μέτρηση και καταγραφή των παραμέτρων του κοιτάσματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του [1].

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου το οποίο βοηθά τη διαδικασία προσφέροντας πληροφορίες που αφορούν την παρακολούθηση της ροής εξόρυξης. Για τη μελέτη και την κατασκευή του παραπάνω εργαλείου πρέπει να εξεταστούν όλες οι παράμετροι που εμπλέκονται στη διαδικασία συνυπολογίζοντας τα υπάρχοντα ηλεκτρικά και μηχανικά μέρη ώστε να υπάρχει ευκολία στην εγκατάσταση και συντήρηση των συστημάτων. Γι' αυτό και είναι απαραίτητη σε πρώτη φάση η μελέτη των συνθηκών που υπάρχουν εντός του χώρου εξόρυξης.

Στην τοποθεσία εξόρυξης, εντός των μηχανημάτων, υπάρχει ένα δίκτυο καλωδιώσεων και εργαλείων καταγραφής ικανό να αντέξει και να λειτουργήσει σε συνθήκες πιέσεων έως και 300 bars και θερμοκρασίες ως και 120°C [1]. Τα παραπάνω εργαλεία συνήθως περιλαμβάνουν ένα δίκτυο συρματόσκοινων για την κατάδυση στο χώρο εξόρυξης έναντι σπειροειδών διατάξεων ή τουρμπινών καθώς είναι συστήματα μικρότερα σε μέγεθος, εύκολα στη μεταφορά και έχουν πολύ μικρότερο αντίκτυπο στη λειτουργία των υπολοίπων μηχανημάτων. Η προτίμηση σε διατάξεις μικρές είναι περισσότερο επιθυμητή καθώς το μέγεθος δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά του συστήματος και η μεταφορά μπορεί να γίνει ευκολότερα και γρηγορότερα.

Για την εκτέλεση των διαδικασιών μέτρησης και καταγραφής, τα αισθητήρια συστήματα βυθίζονται στο χώρο εξόρυξης με τη χρήση συρματόσκοινων. Η βύθιση στα κάθετα σημεία του δικτύου των σωληνώσεων γίνεται μηχανικά, ωστόσο στα οριζόντια γίνεται χρήση ρομποτικών συστημάτων που οδηγούν τον εξοπλισμό στο τελικό σημείο δράσης. Το παραπάνω σύστημα, καθότι διαπερνά τις δεξαμενές και το δίκτυο σωληνώσεων μέσα από το οποίο οδηγείται και το προϊόν της εξόρυξης χρειάζεται να έχει τα κατάλληλα μηχανικά

χαρακτηριστικά για να αντέχει τις συνθήκες που επικρατούν εντός των συστημάτων. Αυτός είναι και ο λόγος που ανακύπτουν και ορισμένα τεχνικά προβλήματα που ορίζουν κάποιους περιορισμούς στη λειτουργία του. Τα αισθητήρια συστήματα επικοινωνούν και τροφοδοτούνται από ρεύμα μέσω του κεντρικού συρματόσκοινου, το οποίο λόγω κατασκευής και μήκους έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Έτσι, πολλά δεδομένα είναι ανέφικτο να μεταφερθούν σε πραγματικό χρόνο πίσω στο κέντρο ελέγχου με επακόλουθο να αποθηκεύονται στο σύστημα και να ανακτώνται σε δεύτερο χρόνο, πρόβλημα το οποίο αυξάνει την πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών του αισθητήρα.



Σχήμα 1.1 Αισθητήριο σύστημα που βυθίζεται εντός του πηγαδιού. Το σύστημα των τροχών είναι κομμάτι του ρομποτικού συστήματος. Το εμπρός μέρος του καλωδίου είναι το αισθητήριο σύστημα.

Στο σημείο εξόρυξης υπάρχουν πολλές οικογένειες συστημάτων για την παρακολούθηση του κοιτάσματος [1]. Μια κατηγορία εργαλείων παρέχει πληροφορίες για τη γεωμετρία και τα υλικά που υπάρχουν στο εσωτερικό. Τα απλούστερα εργαλεία αποτελούνται από μηχανικές δαγκάνες που μετρούν την εσωτερική γεωμετρία των οπών μέσα από τις οποίες περνά η ροή του πετρελαίου καθώς επίσης το βάθος και την απόσταση των τοιχωμάτων εντός του κοιτάσματος. Λίγο πιο εξελιγμένα εργαλεία μετρούν πίεση και θερμοκρασία και ταχύτητα ενώ η πυκνότητα μετριέται με αισθητήρες βασισμένους σε ακτινοβολία.

Άλλη κατηγορία συστημάτων παρακολούθησης είναι επιφορτισμένη με τη καταγραφή των ιδιοτήτων της ροής στο εσωτερικό του κοιτάσματος. Στη κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται πολλά διαφορετικά εργαλεία τα οποία χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες ως προς τη λειτουργία τους, αυτά που παρέχουν μετρήσεις για το ρυθμό της ροής του υλικού και αυτά που απεικονίζουν τη εγκάρσια τομή των υλικών που ρέουν εσωτερικά καταγράφοντας τη ταυτότητα των υλικών στο εσωτερικό. Σήμερα χρησιμοποιούνται συστήματα αισθητήρων που χρησιμοποιούν ευθύγραμμα ελάσματα που βρίσκονται πακτωμένα στο σώμα των αισθητήρων και ένα δεύτερο κομμάτι τους βρίσκεται στο εσωτερικό του υγρού. Πάνω στο δεύτερο κομμάτι είναι τοποθετημένοι αισθητήρες αντίστασης και χωρητικότητας καθώς και μηχανικοί περιστροφικοί αισθητήρες για τη μέτρηση της ταχύτητας. Οι παραπάνω αισθητήρες

παρεμβάλλονται σε διάφορα σημεία στο χώρο ροής και από τις στατικές μετρήσεις ανά σημείο εξάγονται οι πληροφορίες για τη μέτρηση του όγκου του υγρού με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής των σημείων.

Η ανάπτυξη ενός εναλλακτικού τρόπου παρακολούθησης της διαδικασίας γεννήθηκε από όλους τους παραπάνω περιορισμούς που ορίζονται από τις φυσικές συνθήκες. Λόγω αυτής της ανάγκης προτάθηκαν διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης βασισμένοι σε αισθητήρια συστήματα. Για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου είναι απαραίτητο σε πρώτη φάση να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός μίγματος πολυφασικής ροής καθώς επίσης και οι υπάρχουσα τεχνολογία στο συγκεκριμένο πεδίο. Εξετάζεται η συμπεριφορά των υλικών εντός του χώρου μέτρησης και στη συνέχεια γίνεται μια εκτενής αναφορά στις μεθόδους μέτρησης πολυφασικής ροής περιλαμβάνοντας πληροφορίες για τη σχεδίαση, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε μεθόδου καθώς και το πεδίο εφαρμογών της καθεμιάς. Το κεφάλαιο θα επικεντρωθεί στη ροή υγρών και αερίων μέσωσών καθώς είναι τα κύρια υλικά ενδιαφέροντος στη βιομηχανία πετρελαίου.

## **1.2 Πολυφασική ροή**

Ο όρος πολυφασική ροή χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ροή πολλών διαφορετικών υλικών σε κοινό ρεύμα [2]. Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η ύπαρξη διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των διαφορετικών φάσεων που προκύπτει από το φυσικό διαχωρισμό δύο αδιάλυτων μεταξύ τους υλικών. Στις βιομηχανικές εφαρμογές πολυφασικές ροές παρουσιάζονται εντός σωληνώσεων και δοχείων. Η κάθε φάση μπορεί να είναι στερεή, υγρή ή αέρια ανάλογα με τη φύση του υλικού και το μίγμα μπορεί να περιέχει μια μίξη πολλών διαφορετικών φάσεων. Στη βιομηχανία οι πιο κοινές μορφές πολυφασικής ροής είναι οι ακόλουθες:

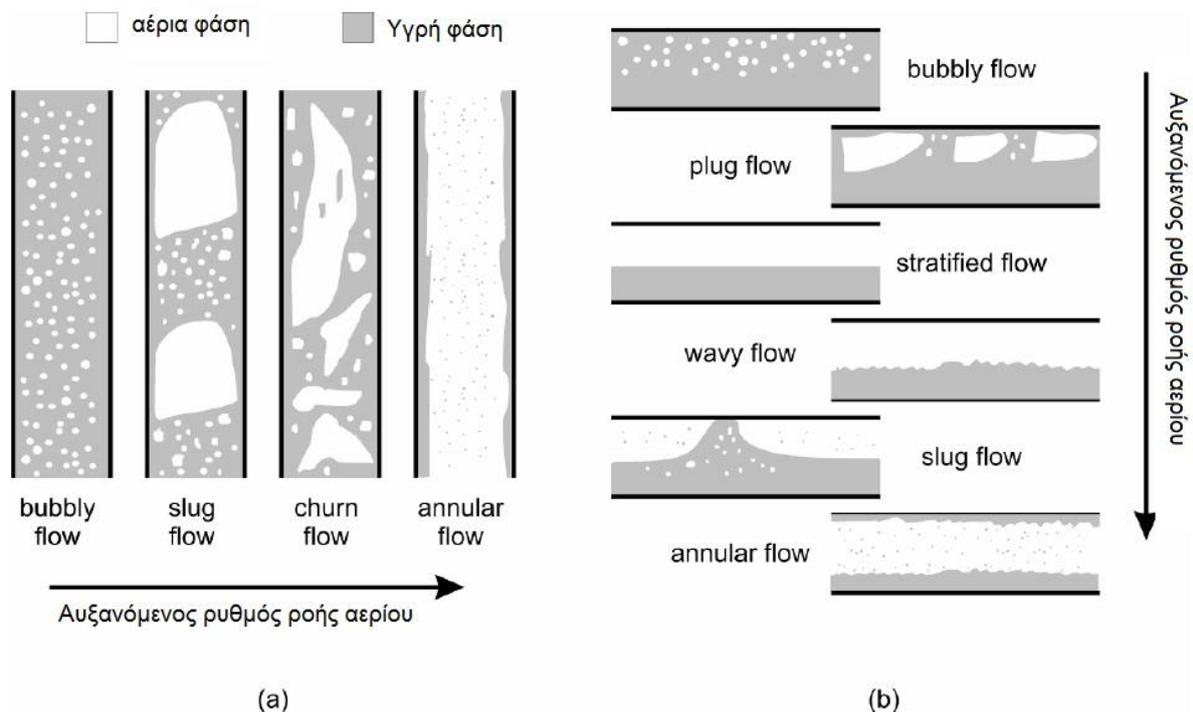
- Αέρια – υγρή ροή, η οποία είναι κοινή σε διαδικασίες βρασμού ή συμπύκνωσης στο εσωτερικό αγωγών.
- Αέρια – Στερεή ροή, που παρουσιάζεται σε διαδικασίες πνευματικής μεταφοράς σωματιδίων.
- Στερεή-υγρή ροή, που συναντάται σε κοίτες ποταμών και σε διαδικασίες παραγωγής στη βιομηχανία τσιμέντου.
- Υγρή –υγρή ροή που παρουσιάζεται κυρίως στη βιομηχανία χημικών με συνηθέστερη τη ροή νερού με πετρέλαιο ή λάδι.

Η βασικότερη μορφή που θα εξεταστεί στην παρούσα εργασία είναι η ροή υγρού – αερίου είτε ως διφασική ροή (νερό , αέρας) είτε ως τριφασική ροή (νερό, αέρας, πετρέλαιο) που είναι πολύ δημοφιλής στη βιομηχανία πετρελαίου.

### 1.2.1 Πρότυπα ροής

Στην πολυφασική ροή υγρού-αερίου, λόγω του γεγονότος πως τα ρευστά είναι άμορφα, υπάρχει άπειρος αριθμός πιθανών κατανομών των φάσεων στο εσωτερικό της ροής. Έχει παρατηρηθεί πως αυτές οι κατανομές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ορισμένες μορφές, που εξαρτώνται από κάποια χαρακτηριστικά της ροής, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του φαινομένου και να βοηθήσει για καλύτερη σχεδίαση των συστημάτων μέτρησης. Οι συγκεκριμένες μορφές ονομάζονται πρότυπα ροής και κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες που περιγράφονται στη συνέχεια [2].

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφή και ορίζουν τη συμπεριφορά της κατανομής στα παρακάτω πρότυπα είναι πολυάριθμοι. Μεταξύ αυτών, οι πιο σημαντικοί είναι ο ρυθμός ροής της κάθε φάσης, οι ιδιότητες του κάθε υλικού, η γεωμετρία και η κλίση του αγωγού καθώς και η κατεύθυνση της ροής. Η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων είναι εκτός της μελέτης της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, οι πιο κοινές περιπτώσεις στη βιομηχανία περιλαμβάνουν οριζόντια ροή και κάθετη ροή με κατεύθυνση προς τα πάνω, περιπτώσεις που θα εξεταστούν στο παρόν κεφάλαιο. Τα κυριότερα πρότυπα ροής που παρουσιάζονται στην περίπτωση κάθετης ροής με κατεύθυνση προς τα πάνω παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



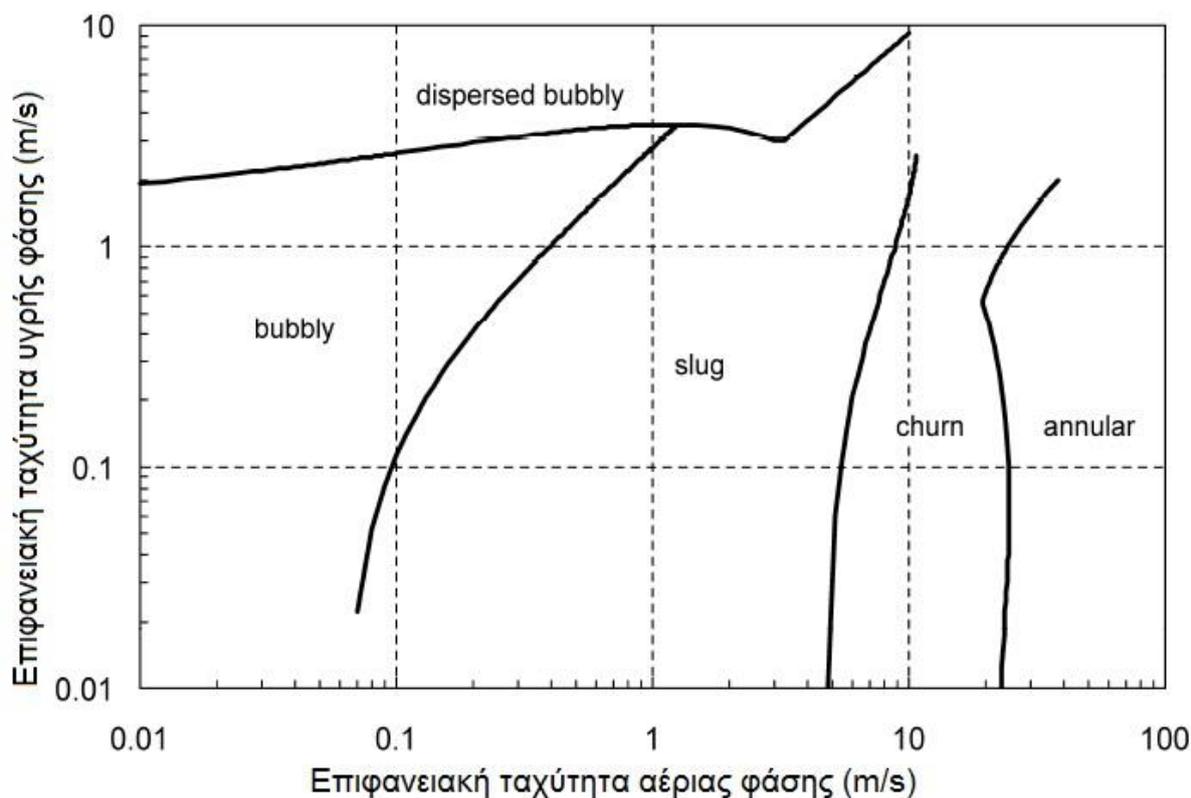
Σχήμα 1.2 Πρότυπα ροής υγρού - αερίου για (α) κάθετη ροή, (β) οριζόντια ροή.

Οι παραπάνω τοπολογίες επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από το ρυθμό ροής της αέριας φάσης. Με χαμηλό ρυθμό ροής παρατηρείται πως η αέρια φάση κατανέμεται εντός του σώματος της υγρής με τη μορφή πολλών μικρών φυσαλίδων, ενώ η υγρή φάση είναι συνεχόμενη μέσα στο χώρο ροής. Αν αυξηθεί ο ρυθμός ροής του αερίου, οι συγκρούσεις

μεταξύ των φυσαλίδων είναι πιο συχνές με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερων σφαιρικών περιοχών. Στη συγκεκριμένη κατανομή συνεχίζουν να εμφανίζονται παράλληλα και μικρές φυσαλίδες. Με επιπλέον αύξηση της ροής αερίου οι μεγάλες σφαιρικές περιοχές διαλύονται και μετατρέπονται σε περιοχές με μη καθορισμένο σχήμα προκαλώντας ταλαντώσεις στην υγρή φάση εντός της ροής. Η αέρια φάση συναντάται περιοδικά με τη μορφή μακρόστενων φυσαλίδων ακαθόριστου σχήματος. Τέλος, όταν η ροή της αέριας φάσης είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να υποστηρίξει μια επιφάνεια υγρού στα τοιχώματα, το αέριο ρέει συνεχόμενα διαμέσου του κέντρου του σωλήνα, ενώ το υγρό ρέει κατά κύριο λόγο ως ένα λεπτό φιλμ στα τοιχώματα. Ακόμη, εμφανίζονται σταγόνες που ρέουν διαμέσου του κέντρου μαζί με την αέρια φάση.

Αντίστοιχα, στην οριζόντια φάση τα πρότυπα ροής είναι παρόμοια με τη κάθετη έχοντας ωστόσο και τη βαρύτητα να παίζει ρόλο, καθώς το βάρος επηρεάζει την κατανομή με την αέρια φάση να ρέει στην κορυφή του σωλήνα ενώ η βαρύτερη υγρή φάση να συναντάται στη βάση. Με χαμηλή ροή αέριας φάσης παρατηρούνται οι μικρές φυσαλίδες μέσα στον όγκο του υγρού, ωστόσο η κατανομή τους είναι περισσότερο συγκεντρωμένη στο πάνω μέρος του σωλήνα. Αντίστοιχα, αύξηση της ροής προκαλεί παρόμοια σφαιρική κατανομή με αυτή που παρατηρείται και στην προηγούμενη περίπτωση επίσης συγκεντρωμένη στο πάνω μέρος του σωλήνα. Περαιτέρω αύξηση της ροής του αερίου προκαλεί διαχωρισμό των δύο φάσεων με την αέρια φάση να είναι στο πάνω όριο και την υγρή στο κάτω. Στη συγκεκριμένη κατανομή αν αυξηθεί περαιτέρω η αέρια ροή εμφανίζονται κυματισμός της υγρής φάσης στη διαχωριστική επιφάνεια που φτάνει ως το πάνω τοίχωμα των σωληνώσεων, με ταυτόχρονη δημιουργία σταγόνων υγρού μέσα στην αέρια φάση. Τέλος, με περαιτέρω αύξηση της ροής του υγρού παρατηρείται η δακτυλιοειδής τοπολογία που εμφανίζεται και στην περίπτωση της κάθετης ροής, δηλαδή η υγρή φάση κατανέμεται ως φιλμ κοντά στα τοιχώματα και η αέρια ρέει διαμέσου του κέντρου του αγωγού. Αντίστοιχα στο σχήμα 1.2β απεικονίζονται οι κατανομές των ροών για την οριζόντια διάταξη.

Τα παραπάνω πρότυπα βασίζονται σε οπτικές παρατηρήσεις από κάμερες υψηλής ακρίβειας και ο καθορισμός τους περιορίζεται μόνο σε διατάξεις συγκεκριμένης τοπολογίας. Πιο προχωρημένες μέθοδοι χρησιμοποιούν αισθητήρες πίεσης και στατιστικά μοντέλα για την ανάλυση των ιδιοτήτων της ροής και το καθορισμό των προτύπων. Οι περιοχές στις οποίες προκύπτουν τα διαφορετικά πρότυπα απεικονίζονται στο παρακάτω χάρτη. Να σημειωθεί πως η κατασκευή του έγινε μέσω του υπολογισμού του ρυθμού ροής του αερίου συναρτήσει του ρυθμού ροής του υγρού. Τα όρια του χάρτη είναι οι ζώνες μετάβασης από το ένα πρότυπο στο άλλο.



Σχήμα 1.3 Χάρτης προτύπων ροής για κάθετη ροή νερού – αέρα. Οι γραμμές είναι το όριο μετάβασης από ένα πρότυπο ροής σε ένα άλλο.

Τα διάφορα πρότυπα αερίου – υγρού έχουν εφαρμογή σε πολυφασική ροή δύο υλικών, στην παρούσα ανάλυση πετρελαίου και αερίου ή νερού. Παρόλα αυτά η παρουσία διαφορετικών υγρών με διαφορετικό βαθμό ανάμιξης μεταξύ τους εισάγουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Για παράδειγμα το νερό με το πετρέλαιο, σε συνθήκες ηρεμίας είναι δύο υγρά διαχωρισμένα. Ωστόσο εντός του πηγαδιού λόγω πιέσεων και θερμοκρασίας μπορεί να είναι αναμεμιγμένα και μάλιστα να θεωρούνται ως μια φάση βάσει προτύπου. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να καθιερωθεί ένα συγκεκριμένο καθολικό πρότυπο πολυφασικής ροής σε οποιαδήποτε διαδικασία.

### 1.2.2 Μοντελοποίηση πολυφασικής ροής

Η κατανομή ενός μίγματος σε φάσεις είναι μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα λόγω της ύπαρξης πολλαπλών διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ των υλικών, των διαφορετικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού ανά περιοχή και τη μεταβατική συμπεριφορά της ροής ανάλογα με το ρυθμό κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των φάσεων. Για παράδειγμα η κατάσταση των σωληνώσεων, η γεωμετρία και η θερμοκρασία παίζουν σημαντικό ρόλο στο ρυθμό ροής και στην ανάμιξη των υλικών και είναι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πολυφασικής ροής. Επιπλέον, επειδή στη μοντελοποίηση των συστημάτων παρακολούθησης των βιομηχανικών διαδικασιών προκύπτουν κάποιες απλοποιήσεις η δυνατότητα πρόβλεψης γίνεται ακόμα δυσκολότερη. Για

τους παραπάνω λόγους η αναλυτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πολυφασικής ροής είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί.

Μελλοντικά είναι πιθανό να υπολογιστεί το μαθηματικό μοντέλο των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπει τη ροή των ρευστών βασισμένο στις εξισώσεις *Navier – Stokes* και να μελετηθεί για κάθε φάση ξεχωριστά ώστε να υπολογιστούν όλες οι λεπτομέρειες της ροής. Ωστόσο η υπολογιστική ισχύς και η ταχύτητα που απαιτούνται για την προσομοίωση μιας τέτοιας διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο είναι πολύ μεγάλες και απαιτούν ιδιαίτερα πολύπλοκα υπολογιστικά συστήματα για αυτό το σκοπό γεγονός μη πρακτικό και οικονομικά ασύμφορο. Ωστόσο, έχει γίνει στοχευμένη προσπάθεια προς αυτή τη κατεύθυνση για συγκεκριμένες κατανομές πολυφασικής ροής με συγκεκριμένα υλικά και σε καθορισμένες τοπολογίες μέσω απλοποιήσεων. Το πιο κοινό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το διφασικό μοντέλο ρευστών [3], [5], [6]. Βασίζεται στην απλοποίηση πως είναι δυνατόν να περιγραφεί κάθε φάση της ροής ως ένα συνεχές ρευστό που καταλαμβάνει ένα κομμάτι του χώρου της ροής. Το μοντέλο αναπτύσσει μια σειρά από εξισώσεις που βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας, ενέργειας και ορμής για κάθε υλικό ξεχωριστά περιλαμβάνοντας και όρους αλληλεπίδρασης μεταξύ των φάσεων στο όριο. Το μοντέλο αυτών των εξισώσεων στη συνέχεια επιλύεται είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά. Με επιπλέον επεξεργασία το παραπάνω μοντέλο μετατρέπεται σε απλούστερες μορφές όπως αυτό που προτάθηκε για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας και πτώσης πίεσης σε διφασική ροή αερίων [8], το οποίο μετατρέπεται σε μονοδιάστατο χωρικά μεταβαλλόμενο, θεωρώντας μέση τιμή του χρόνου.

Τα τελευταία χρόνια με την προοδευτική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και την ανάπτυξη νέων εργαλείων προσομοιώσεων έχουν εισαχθεί σύγχρονες μέθοδοι που βασίζονται στην αριθμητική επίλυση της πολυφασικής ροής μέσω της μεθόδου υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Μια πλήρης περιγραφή πολυφασικής ροής περιλαμβάνει τη φάση του υλικού και τη ταχύτητα σε κάθε σημείο της ροής για δεδομένη χρονική στιγμή. Η διαδικασία προσέγγισης μέσω CFD περιλαμβάνει διακριτοποίηση της ροής σε στοιχειώδεις όγκους με σταθερά χαρακτηριστικά ώστε ο υπολογισμός να εκτελεστεί με αριθμητικές μεθόδους. Επιπλέον, για τη γρηγορότερη επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιούνται και κάποιες αναλυτικές εκφράσεις στη μοντελοποίηση ορισμένων φαινομένων (στροβιλισμοί ρευστού, ταλαντώσεις). Παρ' όλες αυτές τις εξελίξεις ωστόσο, η εφαρμογή τους σε συστήματα πολυφασικής ροής είναι ακόμα σε εμβρυικό στάδιο. Ο λόγος είναι πως στα μοντέλα αυτά που έχουν αναπτυχθεί μέσω λογισμικού CFD, η ακρίβεια και η γενική εφαρμοσιμότητα των μεθόδων εξαρτώνται από εμπειρικές παρατηρήσεις και είναι βασισμένες σε απλοποιήσεις πάνω σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Μελλοντικά θα πρέπει να εκτελεστούν αρκετά πειράματα

για την επαλήθευση της ακρίβειας των μεθόδων πρόβλεψης πολυφασικής ροής ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία τους και να επεκταθεί η χρήση τους.

### 1.3 Σύγχρονες μέθοδοι μέτρησης πολυφασικής ροής

Η απεικόνιση και ποσοτικοποίηση των παραμέτρων σε μια πολυφασική ροή σε πραγματικό χρόνο είναι επιθυμητές στη βιομηχανία και στη έρευνα για λόγους ασφαλείας και ελέγχου των διαδικασιών. Εξ' αιτίας του μεγάλου ενδιαφέροντος που υπάρχει έχουν ερευνηθεί και προταθεί αρκετές μέθοδοι προς αυτή τη κατεύθυνση.

Η μέτρηση ενός πολυφασικού μίγματος εισάγει επιπλέον προβλήματα σε σχέση με εκείνα που ανακύπτουν στη μέτρηση μιας ροής ενός υλικού. Η σημαντικότερη σχετίζεται με την ύπαρξη δύο ή περισσότερων φάσεων που οδηγεί στην ανάγκη διαχωρισμού μεταξύ τους. Για ακαθόριστη μορφή ροής, η διακριτοποίηση πρέπει να έχει μεγάλη χρονική ανάλυση λόγω της ασταθούς φύσης του μίγματος, φαινόμενο που οδηγεί στην ανάγκη καταγραφής δεδομένων με γρήγορο ρυθμό. Άλλες δυσκολίες που προκύπτουν εγείρονται από τη κατάσταση του μέσου που μεταφέρεται η ροή (υλικό σωληνώσεων, διαφάνεια υλικού, γεωμετρία). Αυτές οι παράμετροι ενδεχομένως περιορίζουν ορισμένες βασικές αρχές μέτρησης. Τέλος, η στιβαρότητα και το μέγεθος του αισθητήρα είναι θέματα που επηρεάζουν ορισμένες εφαρμογές στη βιομηχανία όπου οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ακραίες. Παρ' όλες τις τεχνικές δυσκολίες η πρόοδος στη τεχνολογία αισθητήρων και ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων οδήγησε στη αύξηση των πειραματικών μεθόδων μέτρησης των παραμέτρων μιας πολυφασικής ροής. Ο σκοπός της παρούσας παραγράφου είναι η παρουσίαση ορισμένων νέων μεθόδων μέτρησης που επικεντρώνονται κυρίως στη διφασική ροή μεταξύ ρευστών.

#### 1.3.1 Καθορισμός φάσης.

Για να οριστούν οι διαδικασίες που παίζουν ρόλο στη μέτρηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων καθώς και στο καθορισμό της φάσης εισάγεται ο όρος κλάσμα φάσης ο οποίος είναι μια αδιάστατη ποσότητα που εκφράζει το κλάσμα του συνολικού χώρου της ροής ο οποίος καταλαμβάνεται από τη κάθε φάση και είναι πολύ σημαντικός όρος στην περιγραφή μιας πολυφασικής ροής. Είναι η φυσική τιμή μέσω της οποίας καθορίζονται άλλες παράμετροι όπως η πυκνότητα, η διαλυτότητα και το ιξώδες των υλικών ώστε να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα των φάσεων και να γίνει μια πρόβλεψη του προτύπου ροής τους.

Το κλάσμα φάσης μαθηματικά περιγράφεται από μια συνάρτηση  $P_k$  η οποία παίρνει τιμές 0 και 1 και παρουσιάζει την ύπαρξη ή όχι της φάσης  $k$  σε συγκεκριμένη θέση  $x$  και σε δεδομένο χρόνο  $t$  και ορίζεται:

$$P_k(x, t) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \text{ ανήκει στη φάση } k \\ 0, & \text{αν } x \text{ δεν ανήκει στη φάση } k \end{cases} \quad (1.1)$$

Αν υπολογιστεί ο μέσος όρος της συνάρτησης κλάσματος φάσης  $P_k$  στο χώρο ή στο χρόνο λαμβάνονται διαφορετικές εκφράσεις για το κλάσμα φάσης πχ τοπικό, ακτινικό, εγκάρσιο, χωρικό [8], [9].

Για τον υπολογισμό του κλάσματος της κάθε φάσης υπάρχουν πολλές τεχνικές μέτρησης. Οι περισσότεροι αισθητήρες είναι ευαίσθητοι σε κάποια ιδιότητα του μέσου της κάθε φάσης, συνήθως πυκνότητα ή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού της φάσης είτε τοπικά στον όγκο της ροής είτε σε μια εγκάρσια τομή της πολυφασικής ροής (τομή).

### 1.3.1.1 Τοπική μέτρηση φάσης

Η τοπική μέτρηση φάσης είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί αισθητήριες ακίδες στο σχήμα βελόνας που αναγνωρίζουν το υλικό της φάσης μέσα στην οποία βρίσκεται η ακίδα του αισθητήρα. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολυφασικές ροές με υγρή και αέρια φάση καθότι τρυπούν τις φυσαλίδες αερίου μέσα στον κύριο όγκο της υγρής φάσης. Κατ' αυτό τον τρόπο καθορίζεται η τιμή της συνάρτησης κλάσματος φάσης  $P_k$  σε συγκεκριμένο σημείο  $x$  και χρόνο  $t$ . Η μέση τιμή της συνάρτησης  $P_k$  ως προς το χρόνο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T P_k(x, t) dt \quad (1.2)$$

Για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, (σε άπειρο χρόνο) η σχέση προσεγγίζεται από:

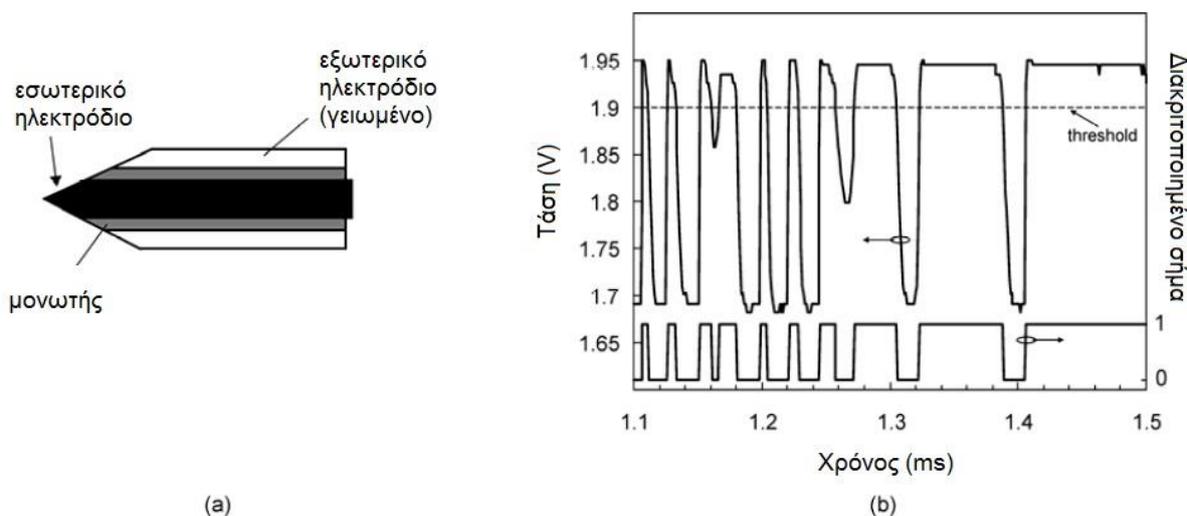
$$\alpha(x) = \frac{T_k}{T} = \frac{T_k}{T_k + T_L} \quad (1.3)$$

όπου  $T_k, T_L$  εκφράζουν το συνολικό χρόνο που ο χώρος  $x$  καταλαμβάνεται από τη φάση  $k$  και  $L$  αντίστοιχα μέσα σε μια περίοδο χρόνου  $T$ . Με μετακίνηση της αισθητήριας βελόνας σε άλλο σημείο του χώρου της πολυφασικής ροής λαμβάνονται τοπικές σειρές μετρήσεων και προκύπτουν πληροφορίες για τη τοπική κατανομή των φάσεων για δεδομένο όγκο και χρόνο. Η μέθοδος αυτή, αν και έχει μεγάλη αξιοπιστία, είναι πολύ αργή στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και μη πρακτική στην εφαρμογή.

Διαφορετικά πρότυπα βασισμένα στη χωρητικότητα, αγωγιμότητα, θερμοκρασία και οπτικά σήματα έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν σε μια προσπάθεια μέτρησης των κλασμάτων των φάσεων [8], [10] με τις πιο κοινές να λειτουργούν μέσω ηλεκτρικών και οπτικών αισθητήριων.

Στην περίπτωση των οπτικών αισθητήρων, μια ακτίνα φωτός οδηγείται διαμέσου της ακίδας, συνήθως μέσω οπτικών ινών. Ανάλογα με το είδος του υλικού της φάσης που βρίσκεται στο χώρο της ακίδας το φως είτε διαδίδεται στο μέσο είτε ανακλάται. Το ανακλώμενο σήμα φωτός μετρείται από ένα φωτοανιχνευτή στο άλλο άκρο της οπτικής ίνας και μετατρέπεται σε ένα σήμα τάσης ανάλογο της έντασής του.

Η ανίχνευσή μέσω ηλεκτρικού αισθητήρα χρησιμοποιεί ένα ρεύμα διέγερσης, συνήθως εναλλασσόμενο, και η ακίδα του αισθητήρα λειτουργεί σαν διακόπτης. Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η ακίδα του αισθητήρα καθώς και το μετρούμενο σήμα τάσης.



Σχήμα 1.4 Σχεδίαση ακίδας αισθητήρα για μέτρηση αγωγιμότητας. (α) οριζόντια τομή (β) τυπική μορφή μετρούμενου σήματος τάσης για πρότυπο ροής με μορφή φυσαλίδων.

Όταν η φάση στο χώρο που βρίσκεται η ακίδα είναι από υλικό ηλεκτρικά αγωγίμο το ρεύμα ρέει από το εσωτερικό ηλεκτρόδιο προς το εξωτερικά γειωμένο. Αν η φάση είναι μη ηλεκτρικά αγωγίμη το κύκλωμα είναι ανοικτό και δεν υπάρχει αγωγίμο ρεύμα. Σε ότι αφορά την απεικόνιση του μετρούμενου σήματος, παρόλο που θεωρητικά θα πρέπει να έχει τετραγωνική μορφή η απόκριση της ακίδας δεν είναι ιδανική λόγω περιορισμένων διαστάσεων της βελόνας και του χρόνου που απαιτείται ώστε να στεγνώσει το υλικό που βρίσκεται πάνω στην ακίδα κατά την αλλαγή φάσης. Γι' αυτό το λόγο στο τελικό σήμα γίνεται ψηφιοποίηση ώστε να εξαλειφθούν τα μεταβατικά φαινόμενα.

Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου μέτρησης εξαρτάται από τη φύση των υλικών που εξετάζονται. Σε υλικά που έχουν μεγάλη διαφορά στο συντελεστή αγωγιμότητας είναι προτιμότερη η ηλεκτρική μέθοδος ενώ αντίθετα μεγάλη διαφορά στο δείκτη διάθλασης καθιστά πιο αξιόπιστη την οπτική μέθοδο. Επιπλέον, το είδος του αισθητήρα παίζει σημαντικό ρόλο στη μέθοδο μέτρησης που εκτελείται. Υπάρχουν δύο είδη αισθητήρα ανάλογα με τον αριθμό των ακίδων μέτρησης που διαθέτουν. Αισθητήρες μιας ακίδας χρησιμοποιούνται για καθορισμό της φάσης καθώς και μέτρηση της πυκνότητας των φυσαλίδων της αέριας φάσης μέσα στην υγρή. Αντίστοιχα αισθητήρες δύο ακίδων επιτρέπουν τη μέτρηση της ταχύτητας και του όγκου των φυσαλίδων. Κατά καιρούς έχουν προταθεί μέθοδοι με πολλαπλό αριθμό ακίδων ανά αισθητήρα όπως τριπλές και τετραπλές ακίδες [11]. Τα παραπάνω συστήματα έχουν τη δυνατότητα επιπλέον μετρήσεων όπως είναι το σχήμα των φυσαλίδων και η ταχύτητα και κατεύθυνση της κάθε φάσης. Ωστόσο το μεγάλο μέγεθος του αισθητήρα λόγω των

πολλαπλών ακίδων επηρεάζει υδροδυναμικά το μέσο και τα δεδομένα που εξάγονται είναι πολλά σε αριθμό και απαιτούν χρονοβόρες και πολύπλοκες διαδικασίες για την πλήρη επεξεργασία αποτελεσμάτων.

### 1.3.1.2 Μέτρηση εγκάρσιας τομής.

Αντίστοιχα με τις τοπικές μετρήσεις η μέση τιμή του κλάσματος της φάσης εξάγεται από τη μέση τιμή της συνάρτησης κλάσματος πάνω στο επίπεδο τομής A για τη δεδομένη χρονική στιγμή και δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_{ks}(t) = \frac{1}{A} \int_A P_k(x, t) da = \frac{A_k}{A_k + A_L} \quad (1.4)$$

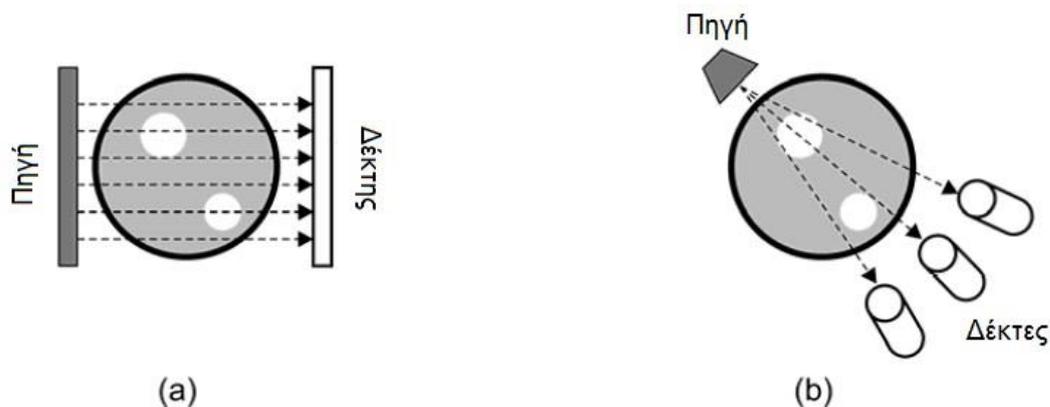
Όπου  $A_k, A_L$  εκφράζουν το κλάσμα του εμβαδού του επιπέδου A που καταλαμβάνεται από τις φάσεις k και L αντίστοιχα. Η μέτρηση εκτελείται είτε με ηλεκτρικές μεθόδους είτε με μέτρηση εξασθένησης ακτινοβολίας και περιγράφονται ακολούθως.

### 1.3.1.3 Μέθοδος μέτρησης τομής με χρήση ακτινοβολίας

Συνήθως οι τεχνικές μέτρησης εξασθένησης ακτινοβολίας αποτελούνται από μια πηγή που παράγει μια δέσμη είτε ακτίνων X ή γάμμα είτε δέσμη νετρονίων και έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε η ακτίνα να διαπερνά τη τομή και να ανιχνεύεται στην απέναντι πλευρά της ροής. Για ομογενές μέσο η εξασθένηση για ευθύγραμμη μονοχρωματική ακτινοβολία ακολουθεί τον εκθετικό νόμο:

$$I = I_0 \exp(-\mu d) \quad (1.5)$$

όπου  $I_0$  η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, I η ένταση της μετρούμενης ακτινοβολίας,  $\mu$  ο συντελεστής απορρόφησης και d η απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στο μέσο. Για μετρήσεις σε επίπεδο εγκάρσιας τομής του κλάσματος της φάσης υπάρχουν δύο μέθοδοι που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.5. Η πρώτη μέθοδος είναι απλούστερη στη κατασκευή ωστόσο χρειάζεται ειδική βαθμονόμηση για να ληφθούν σωστές μετρήσεις καθώς οι δέσμες δεν διαπερνούν διαμετρικά τον κυκλικό τομέα και η απορρόφηση δεν είναι ομοιόμορφη στο μέσο. Αντίθετα η χρήση της δεύτερης μεθόδου, που ονομάζεται πολυακτινική μέτρηση πυκνότητας, χρησιμοποιεί πολλαπλές δέσμες που διαδίδονται ακτινικά εντός του επιπέδου και η εξασθένηση ακολουθεί συμπεριφορά παρόμοια με την εξίσωση (1.5).



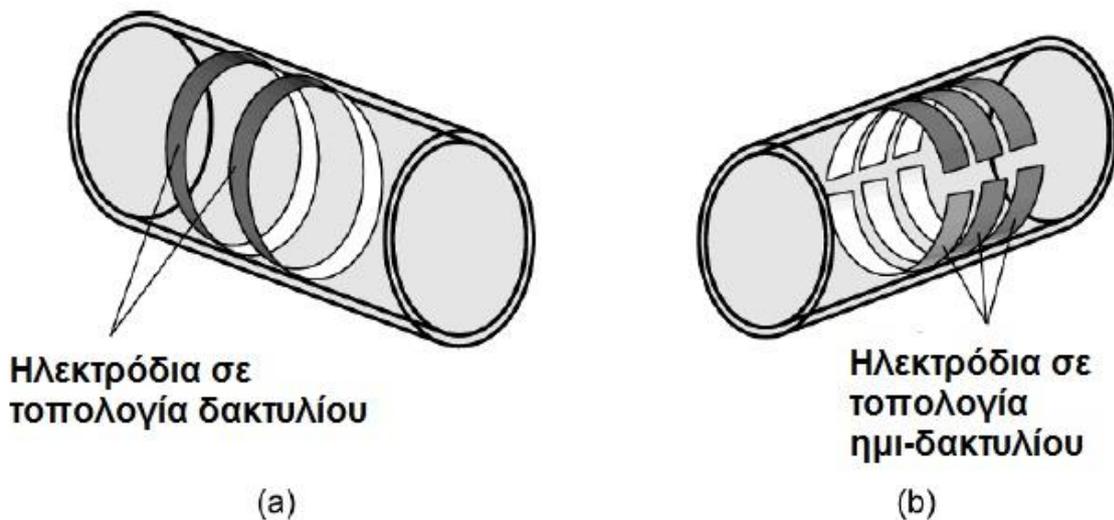
Σχήμα 1.5 Διαγράμματα για τη μέτρηση της εγκάρσιας τομής μέσω εξασθένησης ακτινοβολίας (α) τεχνική μιας λήψης (β) τεχνική πολλαπλών ακτίνων.

#### 1.3.1.4 Μέθοδος μέτρησης με χρήση ηλεκτρικής εμπέδησης.

Η μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας βασίζεται στη διαφορετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και επιτρεπτικότητα των υλικών των φάσεων του μίγματος και για τη μέτρηση χρησιμοποιείται δίκτυο ηλεκτροδίων. Η μέθοδος παρέχει μεγάλη συχνότητα απόκρισης, χαμηλό κόστος και σχετικά απλή κατασκευή.

Τοποθετώντας ηλεκτρόδια στην περίμετρο ενός σωλήνα είναι δυνατόν να μετρηθεί η αντίσταση μεταξύ τους και να εξαχθεί συμπέρασμα για το υλικό στο εσωτερικό. Η μέθοδος παρέχει μια πληθώρα τεχνικών μέτρησης που εξαρτώνται από τη συνδεσμολογία και τη διάταξη του συστήματος των ηλεκτροδίων καθώς και από το σχήμα και το μέγεθός τους. Επιπλέον, η ηλεκτρική τομογραφία χωρίζεται σε δύο τύπους μέτρησης ανάλογα με το τύπο και τις ιδιότητες των υλικών που ερευνώνται την ηλεκτρική τομογραφία χωρητικότητας και αγωγιμότητας.

Αναφορικά με την μέθοδο της αγωγιμότητας [12], χρησιμοποιούνται επίπεδα ηλεκτρόδια σε σχήμα δακτυλίου στο εσωτερικό των αγωγών. Η τυπική διάταξη αποτελείται από δύο μεταλλικούς δακτυλίους πακτωμένους στο εσωτερικό τοίχωμα του σωλήνα που ρέει το μέσο. Διαφορετικές τοπολογίες έχουν προταθεί και εξεταστεί στην περίπτωση ροής δύο φάσεων και παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 1.6 Αισθητήρες μέτρησης αγωγιμότητας. (α) τοπολογία δύο δακτυλιοειδών ηλεκτροδίων (β) τοπολογία ημι-δακτυλίου.

Αντίστοιχα, ηλεκτρική τομογραφία χωρητικότητας [13], [14] εφαρμόζεται σε πολυφασικές ροές όπου το ένα υλικό είναι μη αγώγιμο όπως το πετρέλαιο για παράδειγμα. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα μέτρησης μιας ροής χωρίς παρέμβαση στο εσωτερικό των σωληνώσεων ή των υπολοίπων συστημάτων της διαδικασίας καθώς τα ηλεκτρόδια δεν χρειάζεται να βρίσκονται σε επαφή με το μέσο. Η σχεδίαση και η διάταξη των ηλεκτροδίων αποτελούν αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 1.3.1.5 Μέτρηση πολυφασικής ροής στη βιομηχανία πετρελαίου

Στη βιομηχανία πετρελαίου η συνηθέστερη μορφή πολυφασικής ροής αποτελείται από νερό, πετρέλαιο και αέριο. Τα περισσότερα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου περιέχουν νερό ή εισάγεται νερό στο κοίτασμα κατά τη διαδικασία εξόρυξης για τη διατήρηση της πίεσης. Κατ' αυτό τον τρόπο εξάγεται μαζί με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και νερό δημιουργώντας ένα μίγμα και στη ροής εξόρυξης και στο σύστημα συλλογής.

Σε συνθήκες πολυφασικής ροής οι παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν για τον υπολογισμό του ρυθμού εξαγωγής των υλικών είναι το κλάσμα και η αξονική ταχύτητα της κάθε φάσης στη ροή. Ο ρυθμός ροής  $Q_x$  της φάσης  $x$  καθορίζεται από το γινόμενο της ταχύτητας της φάσης επί της περιοχής που καταλαμβάνει εσωτερικά του χώρου της ροής δηλαδή

$$Q_x = A_x \cdot U_x \quad (1.6)$$

Με δεδομένο πως η περιοχή της ροής υπολογίζεται από τη συνάρτηση κλάσματος  $A_x = A \cdot a_x$ , όπου  $A$  η διατομή της ροής, οι μεταβλητές που πρέπει να υπολογιστούν για το

πλήρη καθορισμό είναι τα κλάσματα και οι ταχύτητες των φάσεων. Ο συνολικός ρυθμός ροής για το παράδειγμα των τριών υλικών που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι:

$$Q_x = Q_{water} + Q_{gas} + Q_{oil} = A \cdot (\alpha_{water} \cdot U_{water} + \alpha_{gas} \cdot U_{gas} + \alpha_{air} \cdot U_{air})$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος μέτρησης σε τέτοιου τύπου ροές συναντά ορισμένες δυσκολίες. Αρχικά θα πρέπει να γίνει μια διαφοροποίηση μεταξύ της υγρής και αέριας φάσης και στη συνέχεια μεταξύ των δύο υγρών φάσεων. Στη βιομηχανία πετρελαίου σήμερα χρησιμοποιούνται δύο στρατηγικές οι μετρητές διαχώρισης φάσης και τα συστήματα μέτρησης σε σειρά [15], [16].

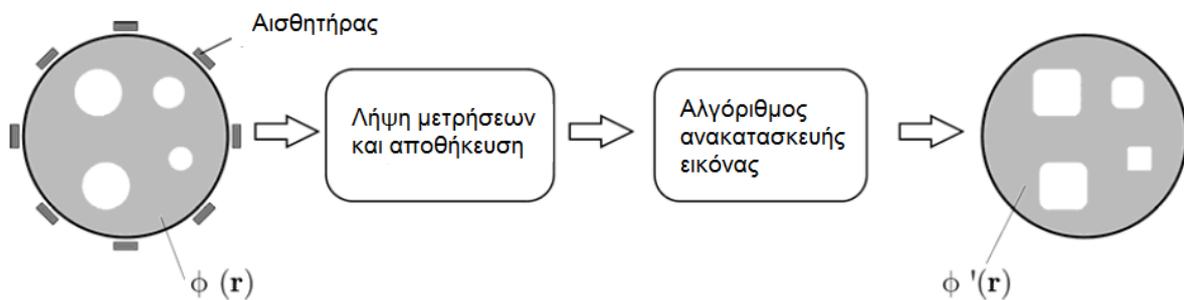
Οι μετρητές διαχωρισμού φάσης χαρακτηρίζονται από το γεγονός πως οι φάσεις διαχωρίζονται πριν γίνει η μέτρηση τους. Οι τρεις φάσεις στη συνέχεια μετρώνται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας τεχνικές μονοφασικής μέτρησης ροής. Ωστόσο καθώς ο χώρος σε μια πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου είναι περιορισμένος και η διαδικασία απαιτεί αρκετά ογκώδη εξοπλισμό, η χρήση συμβατικών συστημάτων διαχωρισμού των φάσεων γίνεται όλο και λιγότερο επιθυμητή.

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα μεθόδων μέτρησης ροής και μοντέλων πρόβλεψης σε σειρά με την παραγωγή που χρησιμοποιούνται στις πλατφόρμες εξόρυξης για τη μέτρηση της πολυφασικής ροής. Για τη μέτρηση του κλάσματος της φάσης γίνεται χρήση των παρακάτω τεχνικών, τομογραφία μέσω ακτινοβολίας, μέτρηση εμπέδησης ή με χρήση αισθητήρα μικροκυμάτων [17], [18], [19]. Η ταχύτητα των φάσεων συνήθως μετριέται με συσχέτιση δύο σημάτων με το χρόνο από δύο βοηθητικούς αισθητήρες. Υπάρχει και μια δεύτερη μέθοδος που ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση καθώς πρώτα το μίγμα των φάσεων ομογενοποιείται θεωρώντας δεδομένο πως οι φάσεις είναι καλά αναμεμιγμένες και έχουν την ίδια ταχύτητα. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί μόνο η μέτρηση της ταχύτητας της ροής χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους όπως η χρήση των σωλήνων *Venturi*. Οι παραπάνω μέθοδοι μέτρησης πολυφασικής ροής έχουν διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας και η χρήση τους εξαρτάται καθαρά από την εφαρμογή. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι μέτρησης καμία δεν έχει την απαιτούμενη ακρίβεια για όλες τις περιπτώσεις. Ως σήμερα υπολογίζεται πως ένας μικρός αριθμός συστημάτων μέτρησης χρησιμοποιείται στην εξόρυξη πετρελαίου γεγονός που σπρώχνει την έρευνα προς αυτή τη κατεύθυνση και δημιουργεί ευκαιρίες σε μια νέα αγορά.

### **1.3.2 Τομογραφική απεικόνιση ροής**

Η τομογραφική απεικόνιση πολυφασικής ροής είναι μια δισδιάστατη απεικόνιση μιας επιφάνειας διαμέσου ενός αντικειμένου. Η χρήση πολυάριθμων μεθόδων τομογραφίας είναι ήδη εφαρμόσιμη στο χώρο της ιατρικής για τη διάγνωση ασθενειών, και σήμερα μέθοδοι που αρχικά είχαν αναπτυχθεί για ιατρικές χρήσεις βρίσκουν εφαρμογή και σε βιομηχανικές διαδικασίες [20], [21], [22].

Η γενική αρχή της υπολογιστικής τομογραφίας απεικόνισης βασίζεται στη μέτρηση μιας φυσικής ιδιότητας διαμέσου του σωλήνα ή του δοχείου που σχετίζεται με το υλικό της φάσης της ροής όπως η ηλεκτρική αντίσταση ή πυκνότητα του υλικού. Η διαδικασία επιτυγχάνεται με τη λήψη ανεξάρτητων μετρήσεων από τους αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι περιμετρικά του χώρου δοκιμής και ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικών διακοπών. Στη συνέχεια, οι τοπικές ιδιότητες της ροής υπολογίζονται από έναν αλγόριθμο ανακατασκευής. Μοιραία, η εικόνα που ανακατασκευάζεται δεν αποτελεί πάντα ακριβές αντίγραφο της πραγματικής κατανομής. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα της διαδικασίας.



Σχήμα 1.7 Βασική διάγραμμα απεικόνισης αρχής λειτουργίας της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η ανακατασκευή της εικόνας συνεπάγεται και την επίλυση του ανάστροφου, όπως ονομάζεται, προβλήματος όπου η κατανομή στο εσωτερικό λαμβάνεται μέσω μιας σειράς μετρήσεων και μιας γνωστής κατανομής. Η επεξεργασία των μετρήσεων και η ανακατασκευή εκτελούνται σε υπολογιστικά συστήματα είτε σε πραγματικό χρόνο είτε αποθηκεύονται και επεξεργάζονται ξεχωριστά. Τη λήψη των μετρήσεων έχουν προταθεί πολλοί τύποι τομογραφίας πολυφασικής ροής. Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες δημοφιλείς τεχνικές και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα της καθεμιάς.

### 1.3.2.1 Τομογραφία με χρήση ακτινοβολίας

Η μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της πυκνότητας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται δέσμες ακτινοβολίας Χ ή Γάμμα [23], [24] ή δέσμη νετρονίων που διαπερνούν κάθετα ένα επίπεδο της τομής. Στη συνέχεια μετριέται η εξασθένηση της δέσμης μέσω αισθητήρων στην απέναντι πλευρά του επιπέδου. Επειδή στα υγρά και στα αέρια υλικά παρουσιάζεται διαφορετική συμπεριφορά κατά την εξασθένηση της ακτινοβολίας η μέθοδος είναι αρκετά ακριβής στο διαχωρισμό υγρών και αερίων φάσεων. Οι τοπικές μετρήσεις σε ολόκληρο το επίπεδο λαμβάνονται είτε με πολλαπλές δέσμες με διαφορετικό προσανατολισμό είτε μέσω περιστρεφόμενης πηγής, ανάλογα με τη τοπολογία. Η τεχνική είναι αρκετά αργή στη μέτρηση με αποτέλεσμα να αποδίδει το μέσο όρο της κατανομής σε ένα μικρό χρονικό διάστημα και όχι τη στιγμιαία κατανομή λόγω των μηχανικών μερών του αισθητήρα. Η χρονική ανάλυση περιορίζεται σε μερικά καρέ ανά δευτερόλεπτο. Σύγχρονες τεχνικές με χρήση παράλληλων

πηγών ακτινοβολίας γάμμα ή Χ που έχουν προταθεί [25] και έχουν καταφέρει να πετύχουν χρονική ανάλυση από 100 ως και 10000 στιγμιότυπα ανά δευτερόλεπτο (*fps*). Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τη δυναμική απεικόνιση των αλλαγών στη ροή, είναι ωστόσο αρκετά ακριβές και αποτελούνται από πολύπλοκα συστήματα.

Η χρήση δέσμης νετρονίων έχει πλεονεκτήματα σε ότι αφορά την εξασθένηση της δέσμης για ορισμένες εφαρμογές. Σε ροές με οργανικά υλικά ή νερό μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγάλη ακρίβεια λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε άτομα υδρογόνου. Αντίθετα πολλά δομικά υλικά όπως το αλουμίνιο ή το ασάλι είναι σχεδόν διάφανα. Παρόλα αυτά η χρήση δεσμών νετρονίων δεν είναι τόσο διαδεδομένη καθώς απαιτεί πολύπλοκο και βαρύ εξοπλισμό για την παραγωγή της δέσμης [26].

#### 1.3.2.2 Μαγνητική τομογραφία

Η μαγνητική τομογραφία είναι μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ιατρική και βασίζεται στις παραμαγνητικές ιδιότητες των πυρήνων των μορίων. Οι μαγνητικοί τομογράφοι βασίζονται τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της μαγνητικής ταλάντωσης των πυρήνων του υδρογόνου σε συνδυασμό με ραδιοσυχνότητες και μαγνητικούς παλμούς για τη χαρτογράφηση του προς εξέταση αντικειμένου. Η μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει εκτός από τη συγκέντρωση και τη ταχύτητα των πυρήνων, σε περίπτωση κινούμενου αντικειμένου. Έχουν προταθεί κάποιες εφαρμογές της μαγνητικής τομογραφίας για την απεικόνιση ροής ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη χρήση της καθώς απαιτείται το μέσο να ρέει μέσα σε μη μαγνητικό και μη αγώγιμο σωλήνα και η χρονική ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί φτάνει ως τα 140 στιγμιότυπα ανά δευτερόλεπτο. Τέλος, ένα σύστημα μαγνητικής τομογραφίας είναι ιδιαίτερα ακριβό και μεγάλο σε μέγεθος που καθιστά τη μέθοδο άβολη για την παρακολούθηση μιας βιομηχανικής διαδικασίας [27].

#### 1.3.2.3 Τομογραφία με τη μέθοδο εκπομπής ποζιτρονίων

Η μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα από ένα ραδιοϊσότοπο που χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής ροής. Εξωτερικοί αισθητήρες μετρούν το ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το σύστημα και παρέχεται η πληροφορία που χρειάζεται για την ανακατασκευή της κατανομής μέσω μιας συμβατικής προσέγγισης. Σε συστήματα πολυφασικής ροής η μέθοδος σκιαγραφεί μια από τις φάσεις ώστε να αναλυθεί η συμπεριφορά της [28]. Παρόλα αυτά η απόκριση της μεθόδου είναι στη κλίματα των λεπτών που είναι απαγορευτική για την παρακολούθηση ταχύτητα εξελισσόμενων φαινομένων.

#### 1.3.2.4 Οπτική τομογραφία

Η μέθοδος χρησιμοποιεί χαμηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είτε στο οπτικό είτε στο υπεριώδες φάσμα ώστε να μετρηθεί το προφίλ διέγερσης του υλικού [29], [30]. Έχουν γίνει ορισμένες έρευνες που εξετάζουν τη συμπεριφορά της μεθόδου σε μονοφασική

και πολυφασική ροή. Το κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων είναι η χρήση φτηνών εκπομπών και δεκτών φωτός. Μια διαφορετική προσέγγιση χρησιμοποιεί ουσίες που εγχέονται μέσα στον όγκο της ροής και μετρείται η σχετική απορρόφηση των υλικών σε ακτινοβολίες κοντά στο φάσμα των υπερύθρων [31]. Η μέθοδος προσφέρει μεγάλη χρονική ανάλυση έχοντας τη δυνατότητα ανάλυσης μερικών χιλιάδων στιγμιότυπων ανά δευτερόλεπτο. Το μεγάλο μειονέκτημα των οπτικών συστημάτων είναι πως περιορίζονται σε πολυφασικές ροές υγρού και αερίου στις οποίες η αέρια φάση έχει μικρό κλάσμα (τυπικά κάτω από 10%) για το λόγο ότι η ροή γίνεται αδιαφανής για μεγαλύτερα ποσοστά αέριας φάσης. Επιπλέον, απαιτείται τα τοιχώματα των σωληνώσεων καθώς και οι φάσεις της ροής να αποτελούνται από διαφανή υλικά περιορίζοντας σημαντικά τις εφαρμογές της.

#### *1.3.2.5 Τομογραφία με χρήση υπερήχων*

Η τομογραφία υπερήχων βασίζεται στην ανίχνευση αλλαγών στην ακουστική εμπέδηση μεταξύ των αντικειμένων, όπως για παράδειγμα στη διφασική ροή υγρού αερίου όπου εμφανίζεται μια μεγάλη διαφορά της μηχανικής αντίστασης μεταξύ των υλικών [32]. Εξωτερικά γύρω από το σωλήνα τοποθετούνται υπερηχητικοί αισθητήρες που αναλαμβάνουν τη μετάδοση και τη μέτρηση των ηχητικών σημάτων [33], [34]. Η χρονική ανάλυση βρίσκεται στην περιοχή μερικών εκατοντάδων στιγμιότυπων ανά δευτερόλεπτο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ανακατασκευής σε ροές αδιαφανών υλικών. Ωστόσο παρουσιάζεται χαμηλή ακρίβεια σε ροές με κλάσμα αέριας φάσης μεγαλύτερο του 10%, όπως και στην οπτική μέθοδο.

#### *1.3.2.6 Ηλεκτρική τομογραφία*

Ένας σημαντικός τομέας των βιομηχανικών διαδικασιών ασχολείται με τη τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης μια μέθοδο που εκμεταλλεύεται την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών πεδίων με την ύλη. Ο κύριος ρόλος της μεθόδου είναι ο καθορισμός της επιτρεπτότητας ή αγωγιμότητας που συνδέονται με τη κατανομή της φάσης στο εσωτερικό της ροής. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ηλεκτρικής τομογραφίας η ηλεκτρική τομογραφία αντίστασης και χωρητικότητας. Στην περίπτωση της τομογραφίας χωρητικότητας τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται περιμετρικά των σωληνώσεων χωρίς παρέμβαση σε άλλα συστήματα εσωτερικά της ροής. Η εικόνα λαμβάνεται εφαρμόζοντας ηλεκτρικά πεδία και μετρώντας τις αποκρίσεις των αισθητήρων. Μια επιτυχημένη σειρά μετρήσεων ολοκληρώνεται όταν έχουν διεγερθεί όλα τα ηλεκτρόδια και έχουν μετρηθεί οι διεγέρσεις των υπολοίπων. Στη μέθοδο της τομογραφίας χωρητικότητας τα σήματα διέγερσης και μέτρησης είναι σήματα τάσης ενώ στην περίπτωση της τομογραφίας αντίστασης η διέγερση είναι σήμα ρεύματος και η μέτρηση σήμα τάσης. Η τομογραφία με τη μέθοδο μέτρησης της αντίστασης έχει χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση της ροής μιγμάτων που περιέχουν θαλασσινό νερό ενώ αντίθετα η τομογραφία

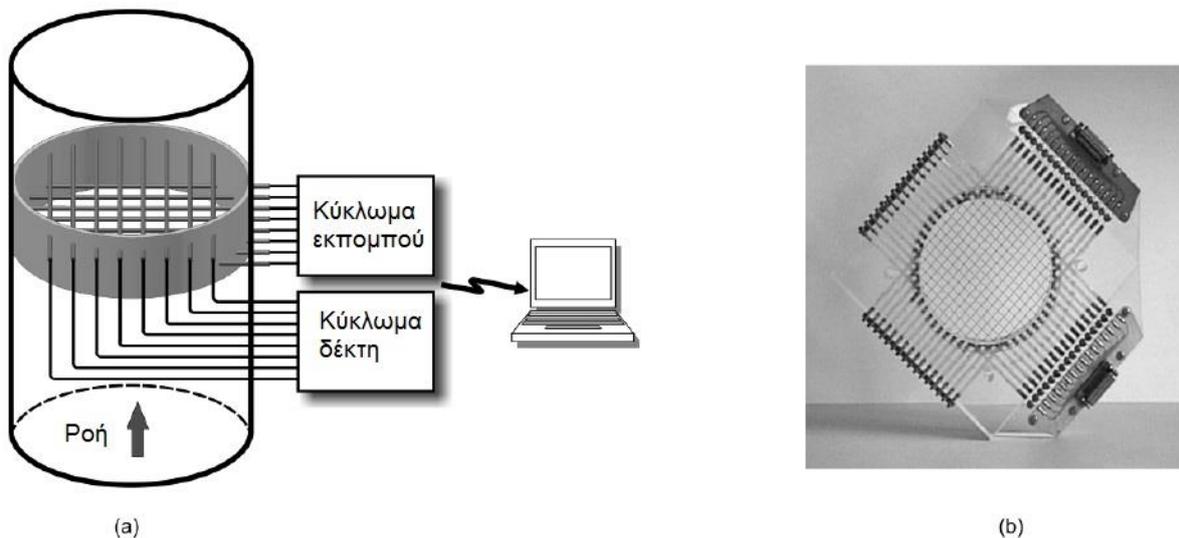
χωρητικότητας είναι κατάλληλη για χρήση σε μη αγώγιμα υλικά όπως σε διφασική ροή πετρελαίου και αερίου.

Η μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας εμπέδησης είναι αρκετά γρήγορη προσφέροντας χρονική ανάλυση περίπου 1000 στιγμιότυπων ανά δευτερόλεπτο, ενώ κύριο μειονέκτημά της είναι η σχετικά μέτρια χωρική ανάλυση της ανακατασκευασμένης εικόνας. Τα μετρούμενα ηλεκτρικά σήματα είναι μη γραμμικές συναρτήσεις των φάσεων και δεν μπορούν να περιοριστούν σε δέσμες όπως στην περίπτωση της τομογραφίας με ακτινοβολία. Γι' αυτό το λόγο η ακρίβεια των μετρήσεων δεν είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις και εξαρτάται από τη χωρική ευαισθησία του αισθητήρα στο αντίστοιχο σημείο. Τέλος, έχει προταθεί μια παραλλαγή της μεθόδου που βασίζεται σε μετρήσεις αμοιβαίας επαγωγής (ηλεκτρομαγνητική τομογραφία). Η μέθοδος είναι κατάλληλη για απεικόνιση αγώγιμων ή μαγνητικών υλικών όπως τα μέταλλα.

### **1.3.3 Αισθητήρες πλέγματος**

Οι αισθητήρες πλέγματος είναι συσκευές απεικόνισης ροής που προσφέρουν υψηλή χωρική και χρονική ανάλυση. Παρόλο που η αρχή λειτουργίας τους δεν βασίζεται σε κλασσικές μεθόδους τομογραφίας, εντούτοις είναι αποδεκτή ως εναλλακτική μέθοδος απεικόνισης και μπορεί να συγκριθεί με όλες τις παραπάνω μεθόδους. Η μέθοδος προτάθηκε από [35], [36] και έχει εφαρμοστεί στην παρακολούθηση φαινομένων μονοφασικών και διφασικών ροών.

Ο αισθητήρας βασίζει τη λειτουργία του σε διάταξη ηλεκτροδίων εντός του χώρου της ροής, πιο συγκεκριμένα αποτελείται από δύο ομάδες ηλεκτροδίων τοποθετημένων και τεντωμένων διαμέσου ενός κάθετου επιπέδου του σωλήνα. Η κάθε ομάδα αποτελείται από έναν αριθμό ηλεκτροδίων παράλληλων μεταξύ τους στο ίδιο νοητό επίπεδο. Τα ηλεκτρόδια των ομάδων τοποθετούνται κάθετα μεταξύ τους, ώστε να σχηματίζουν ένα πλέγμα, έχοντας και μια μικρή διαχωριστική απόσταση για να μην έρχονται σε επαφή και υπάρξει βραχυκύκλωμα. Τα βοηθητικά ηλεκτρονικά μετρούν τη τοπική αγωγιμότητα στα κενά μεταξύ των σημείων διασταύρωσης των ηλεκτροδίων με αρκετά μεγάλη συχνότητα. Θεωρώντας μια διφασική ροή μεταξύ ενός αγώγιμου και ενός μη αγώγιμου υλικού όπως νερό και ο αέρας, οι μετρήσεις που λαμβάνονται σε κάθε σημείο τομής των επιπέδων αποτελούν μια ένδειξη της φάσης που παρατηρείται σε εκείνο το σημείο. Κατ' αυτό τον τρόπο ο αισθητήρας είναι ικανός να καθορίσει τη στιγμιαία κατανομή στο επίπεδο.

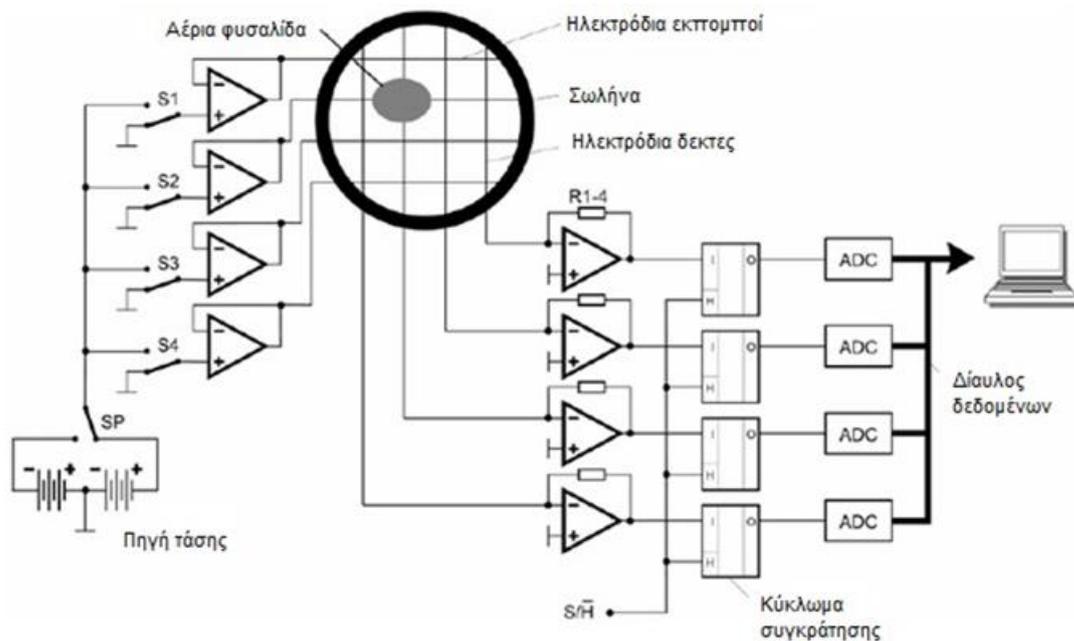


Σχήμα 1.8 (α) Σχεδιάγραμμα απεικόνισης ενός αισθητήρα πλέγματος (β) φωτογραφία αισθητήρα.

Σε ότι αφορά την αρχή μέτρησης, ελέγχεται από τα ηλεκτρονικά και περιγράφεται με τον ακόλουθο τρόπο. Τα ηλεκτρόδια του ενός επιπέδου χρησιμοποιούνται ως πομποί και του άλλου ως δέκτες. Τα ηλεκτρόδια πομποί ενεργοποιούνται τροφοδοτώντας τα με παλμούς τάσης μέσω διακοπών, ενώ τα ηλεκτρόδια δέκτες παραμένουν γειωμένα. Το ρεύμα στο ηλεκτρόδιο δέκτης που προκύπτει από επαγωγή είναι μια μέτρηση της αγωγιμότητας του ρευστού στον αντίστοιχο όγκο γύρω από το σημείο διασταύρωσης των ηλεκτροδίων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα ηλεκτρόδια πομπούς και μόλις ολοκληρωθεί λαμβάνεται ένα πλήρες στιγμιότυπο της ροής στο επίπεδο. Οι μετρήσεις είναι τιμές τάσης που είναι ανάλογες της αγωγιμότητας του μέσου γύρω από κάθε σημείο διασταύρωσης τη στιγμή λήψης της μέτρησης. Η μέθοδος ουσιαστικά διαχωρίζει την πολυφασική ροή μέσω του πλέγματος σε έναν αριθμό ξεχωριστών ανεξάρτητων περιοχών (σημεία διασταύρωσης ηλεκτροδίων), με κάθε ένα από τα μετρούμενα σήματα ανά περιοχή να δίνει τη σύσταση της ροής. Οι μετρήσεις είναι μια σειρά δεδομένων που ευθέως αναπαριστά τη κατανομή των φάσεων στο κάθετο επίπεδο, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται διαδικασία ανακατασκευής, όπως για παράδειγμα η επίλυση του ανάστροφου προβλήματος στην περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας για τον καθορισμό των φάσεων.

Η τεχνολογία των αισθητήρων πλέγματος συνεχώς αναπτύσσεται αρχικά προς τη κατεύθυνση της αύξησης της συχνότητας των μετρήσεων και στη μέτρηση της ταχύτητας της φάσης. Σήμερα οι αισθητήρες κατασκευάζονται με πλέγμα ως και  $64 \times 64$  ηλεκτροδίων με διάμετρο ως και  $0,05\text{mm}$  ενώ είναι ικανοί να λειτουργήσουν σε συνθήκες πίεσης ως  $7\text{MPa}$  και θερμοκρασίες ως τους  $286^\circ\text{C}$  [2]. Οι αισθητήρες πλέγματος συναντώνται ευρέως στη μέτρηση ροής νερού - ατμού για παρακολούθηση διαδικασιών εντός πυρηνικών αντιδραστήρων είτε για παρακολούθηση μεταβατικών φαινομένων βρασμού.

Η παρεμβατική φύση των αισθητήρων πλέγματος έχει ερευνηθεί μέσω καμερών υψηλής ταχύτητας και σε σύγκριση με συστήματα τομογραφίας ακτίνων Χ. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο αισθητήρας αποδίδει εικόνες χωρίς διαταραχή στη ροή. Η επιρροή στη ροή παρουσιάζεται στη συνέχεια και αφού τα ρευστά περάσουν από το επίπεδο του αισθητήρα. Κατ' αυτό τον τρόπο η μέθοδος προσφέρει ένα συμβιβασμό. Παρόλο που είναι παρεμβατική προσφέρει χαμηλό κόστος, ευκολία στη χρήση και υλοποίηση, και υψηλή τοπική και χρονική ανάλυση σε σχέση με άλλες μεθόδους τομογραφίας.



Σχήμα 1.9 Ηλεκτρονικό σύστημα ενός 4 x 4 αισθητήρα πλέγματος.

## 2 Ηλεκτρικές ιδιότητες των ρευστών

Στην ηλεκτρική τομογραφία ο χαρακτηρισμός ενός υλικού της πολυφασικής ροής γίνεται μέσω αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών πεδίων με το ρευστό εσωτερικά των σωληνώσεων [37], [38]. Ο χαρακτηρισμός του ρευστού, και κατ' επέκταση ο προσδιορισμός της φάσης, γίνεται μέσω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του οι οποίες επηρεάζουν τη τελική μέτρηση. Τα ρευστά όπως και γενικά όλα τα υλικά μπορούν να χαρακτηριστούν και να κατανεμηθούν σύμφωνα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες ο μηχανισμός των οποίων εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο.

### 2.1 Εμπέδηση και σύνθετη επιτρεπτικότητα

Στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία η εμπέδηση περιγράφει τη σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος για μεταβατικά φαινόμενα, κυρίως για ημιτονοειδές σήμα ρεύματος. Αν εφαρμοστεί μια τάση της μορφής  $v(t) = V\cos(\omega t + \theta_u)$  με γωνιακή συχνότητα  $\omega = 2\pi f$  παρουσιάζεται ένα ρεύμα της μορφής  $i(t) = I\cos(\omega t + \theta_i)$ . Η εμπέδηση ορίζεται από το νόμο του *Ohm* σε μιγαδική μορφή ως:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Όπου  $V = V\exp(j\theta_u)$  και  $I = I\exp(j\theta_i)$  οι μιγαδικές μορφές για τη τάση και το ρεύμα αντίστοιχα. Η σχέση (2.1) βάσει των παραπάνω μετατρέπεται σε:

$$Z = \frac{V\exp(j\theta_u)}{I\exp(j\theta_i)} = \frac{V}{I}\exp(j(\theta_u - \theta_i)) = Z\exp(j\theta_z) \quad (2.2)$$

Η σχέση (2.2) δίνει τη μορφή της μιγαδικής αντίστασης.

Η έννοια της εμπέδησης υποθέτει ότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υλικού είναι χρονικά αμετάβλητα. Η εμπέδηση αποτελεί γενικότερο όρο της αντίστασης επειδή λαμβάνει υπόψη τις διαφορές φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος αποτελώντας ένα θεμελιώδη όρο της θεωρίας ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Σε πολλές εφαρμογές είναι προτιμότερη η χρήση της αγωγιμότητας, όρος που αποτελεί το αντίστροφο μέγεθος της  $Z$ , δηλαδή:

$$Y = \frac{1}{Z}\exp(-j\theta_z) = Y\exp(-j\theta_z) \quad (2.3)$$

Ο όρος της εμπέδησης δεν συναντάται μόνο στον ηλεκτρομαγνητισμό αλλά σε όλα τα φαινόμενα που λαμβάνει χώρα μετάδοση κυμάτων σε ένα μέσο όπως στην ακουστική θεωρία όπου εξετάζονται μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Με χρήση της ταυτότητας του *Euler* οι σχέσεις (3.2) και (2.3) μετατρέπονται σε

$$Z = Z\cos(\theta_z) + jZ\sin(\theta_z) = R + jX$$

$$Y = Y\cos(\theta_Y) + jY\sin(\theta_Y) = G + jB$$

Όπου  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ ,  $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$  τα πλάτη και  $\theta_z = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$ ,  $\theta_y = \tan^{-1}\left(\frac{B}{G}\right)$  οι γωνίες των μεγεθών. Τα πραγματικά μέρη των μεγεθών  $R, G$  εκφράζουν την απώλεια του ηλεκτρικού σήματος μέσα στο ρευστό ενώ τα φανταστικά μέρη  $X, B$  εκφράζουν την άεργο ενέργεια που αποθηκεύεται σε μια περίοδο. Όλες οι παραπάνω τιμές είναι εν γένει εξαρτώμενες από τη συχνότητα των κυμάτων που διαδίδονται στο μέσο.

Η εμπέδηση είναι εξ ορισμού μιγαδικό μέγεθος. Η μόνη περίπτωση στην οποία η εμπέδηση δεν έχει μιγαδική συνιστώσα είναι όταν η γωνία  $\theta_z = 0$  οπότε και η συμπεριφορά του μέσου είναι καθαρά ωμική (αντιστάτης). Η συμπεριφορά των ιδανικών πηνίων και πυκνωτών είναι καθαρά φανταστική καθότι η γωνία  $\theta_z = \pm 90^\circ$  μηδενίζοντας το πραγματικό όρο της εμπέδησης, έχοντας αντίθετα μεταξύ τους πρόσημα για τα σήματα τάσης και ρεύματος. Στην επαγωγική συμπεριφορά η γωνία της εμπέδησης είναι μεταξύ  $0 \leq \theta_z \leq 90^\circ$  ενώ στη χωρητική συμπεριφορά η εμπέδηση είναι μεταξύ  $-90^\circ \leq \theta_z \leq 0$ . Ένα οποιοδήποτε στοιχείο ενός κυκλώματος αποκαλείται επαγωγικό ή χωρητικό σε συγκεκριμένη συχνότητα ανάλογα με το πρόσημο της γωνίας που παρουσιάζει η εμπέδησή του.

Η παραπάνω θεωρία εφαρμόζεται στα ηλεκτρικά δίκτυα. Για τη μελέτη και το χαρακτηρισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών χρησιμοποιούνται πιο κοινές παράμετροι όπως η σύνθετη σχετική επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  που συνδέεται με την απόλυτη επιτρεπτότητα  $\varepsilon_m = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ , όπου  $\varepsilon_0 = 8,85 \frac{PF}{m}$  η επιτρεπτότητα του κενού. Η επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και η μιγαδική μορφή της δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.4)$$

Το πραγματικό μέρος  $\varepsilon'$  αναφέρεται συνήθως ως επιτρεπτότητα ενώ το φανταστικό  $\varepsilon''$  ως ο παράγοντας απώλειας. Η σχέση

$$D = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 E \quad (2.5)$$

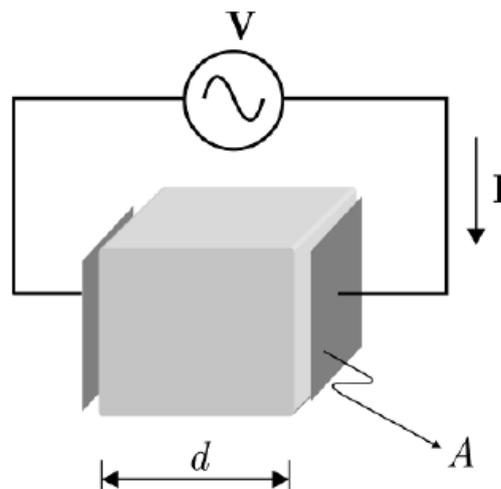
συνδέει τη διηλεκτρική μετατόπιση με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Το πραγματικό μέρος της επιτρεπτότητας εκφράζει την ικανότητα του υλικού να υποστηρίξει ένα ηλεκτρικό πεδίο ενώ το φανταστικό αναπαριστά τις απώλειες εντός του υλικού. Αυτές οι απώλειες περιλαμβάνουν διηλεκτρικές απώλειες λόγω φαινομένων συντονισμού ή ηλεκτρικής χαλάρωσης καθώς και απώλειες λόγω ιονισμού, φαινόμενα που θα εξεταστούν στη συνέχεια. Υπό εναλλασσόμενο ρεύμα τα πεδία εντός των υλικών παρουσιάζουν ημιτονοειδείς εναλλασσόμενες μεταβολές με το χρόνο. Κατ' αυτό τον τρόπο οι απώλειες στο υλικό εκδηλώνονται ως διαφορά φάσης μεταξύ των πεδίων  $D$  και  $E$ . Επομένως είναι συνήθης η εκτίμηση του μεγέθους των απωλειών στο υλικό ποιοτικά μέσω του όρου

$$\tan \theta_\varepsilon = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.6)$$

όπου  $\theta_\varepsilon$  η διαφορά φάσης μεταξύ των πεδίων  $D$  και  $E$ . Η τιμή της γωνίας είναι μεγάλη για αγώγιμα υλικά.

## 2.2 Χαρακτηρισμός αντίστασης υλικών

Για την εύρεση της επιτρεπτότητας και το χαρακτηρισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ενός υλικού εκτελούνται μετρήσεις εμπέδησης. Για την εκτέλεση της μέτρησης χρησιμοποιείται μια κυψέλη καθορισμένων διαστάσεων μέσα στην οποία τοποθετείται το προς εξέταση υλικό και στη συνέχεια εφαρμόζεται μια τάση μεταξύ δύο παράλληλων όμοιων ηλεκτροδίων [38]. Η διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1 Παράδειγμα μιας απλής κυψέλης μέτρησης.

Η σχέση που συνδέει τις ηλεκτρικές ιδιότητες με τις φυσικές είναι

$$Y = j\omega k \varepsilon \varepsilon_0 \quad (2.7)$$

Ο παράγοντας  $k$  εξαρτάται από τη γεωμετρία και εκφράζει το λόγο της κάθετης επιφάνειας του όγκου του δείγματος προς την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Για τη διάταξη της εικόνας... ο παράγοντας  $k$  προσεγγίζεται από τη σχέση:

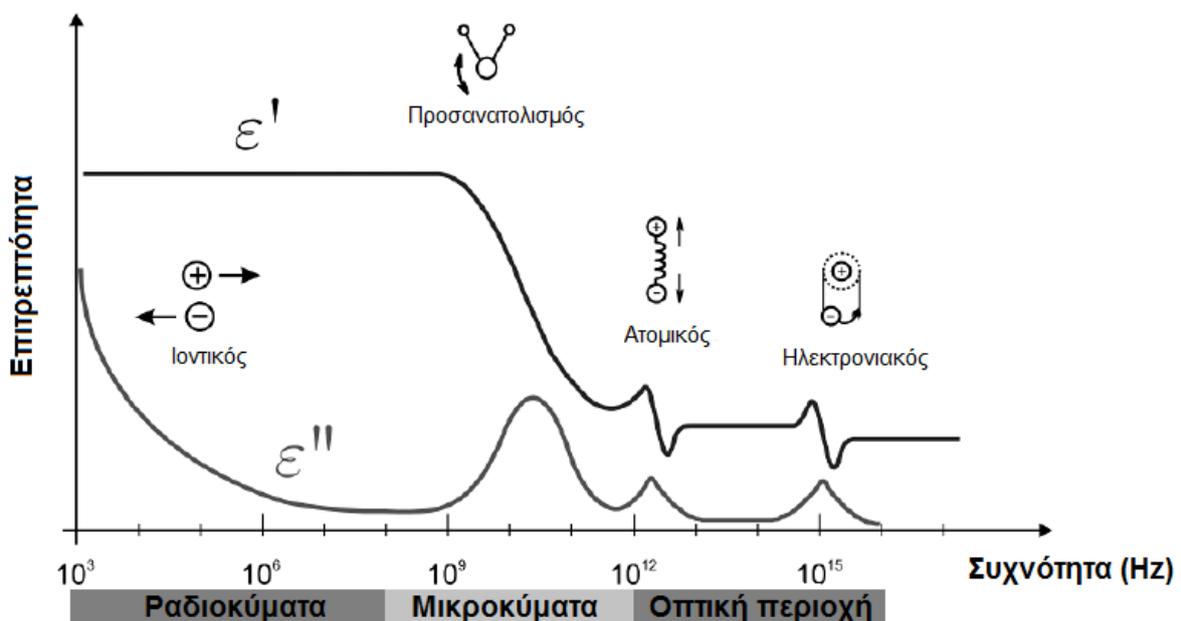
$$k = \frac{A}{d} \quad (2.8)$$

όπου  $A$  το εμβαδό της τετράγωνης επιφάνειας που κατανέμεται το δυναμικό και  $d$  η απόσταση μεταξύ των πλακών. Για πολυπλοκότερες γεωμετρίες ο όρος  $k$  μπορεί να υπολογιστεί είτε με αναλυτικές μεθόδους είτε μέσω προσομοιώσεων.

## 2.3 Διηλεκτρική χαλάρωση

Η μιγαδική επιτρεπτότητα  $\varepsilon$  των ρευστών, εμφανίζει το φαινόμενο της διηλεκτρικής χαλάρωσης που εκφράζεται ως η μείωση της πραγματική τιμή της επιτρεπτότητας  $\varepsilon'$  με αύξηση της συχνότητας του διαδιδόμενου κύματος στο υλικό. Η επιτρεπτότητα ενός ρευστού

χαρακτηρίζεται από πολλούς μηχανισμούς που εξαρτώνται από τους δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων και στα φαινόμενα πόλωσης συμβάλλοντας στη συνολική ηλεκτρική συμπεριφορά του μέσου. Στο σχήμα (2.2) παρουσιάζονται διαγραμματικά οι διαφορετικοί μηχανισμοί πόλωσης. Η ιοντική αγωγιμότητα και ο προσανατολισμός των διπόλων χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά του μέσου στο φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων και των μικροκυμάτων. Οι ατομικές ιδιότητες του υλικού χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά σε συχνότητες στο οπτικό φάσμα. Παρατηρείται πως ανάλογα με τη συχνότητα του φαινομένου ρόλο παίζουν διαφορετικοί παράγοντες στο κάθε υλικό. Κάθε διηλεκτρικός μηχανισμός έχει μια ομάδα χαρακτηριστικών συχνοτήτων που λαμβάνει χώρα. Με αύξηση της συχνότητας οι πιο αργοί μηχανισμοί συμβάλλουν όλο και λιγότερο στο χαρακτηρισμό της επιτρεπτότητας. Ταυτόχρονα ο παράγοντας της ιοντικής αγωγιμότητας γίνεται αντιληπτός στις χαμηλές συχνότητες και μειώνεται με αύξηση της συχνότητας.



Σχήμα 2.2 Σχηματικό διάγραμμα απεικόνισης των διαφορετικών διηλεκτρικών μηχανισμών.

Η διηλεκτρική συμπεριφορά πολλών ρευστών στο φάσμα των μικροκυμάτων χαρακτηρίζεται από μια μοναδική διαδικασία ηλεκτρικής χαλάρωσης. Η μαθηματική έκφραση της περιγράφεται από την εξίσωση *Debye* η οποία σχετίζει τη μιγαδική επιτρεπτότητα  $\epsilon$  με το χρόνο χαλάρωσης  $\tau$  της διαδικασίας, την τιμή του πραγματικού μέρους της επιτρεπτότητας σε χαμηλές συχνότητες  $\epsilon_s$  και την αντίστοιχη τιμή στις υψηλές συχνότητες (οπτικό φάσμα)  $\epsilon_h$ .

$$\epsilon = \epsilon_h + \frac{\epsilon_s - \epsilon_h}{1 + j\omega\tau} \quad (2.9)$$

Η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φανταστικού μέρους της επιτρεπτότητας  $\epsilon''$  είναι η

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.10)$$

Η σχέση (2.9) αποτελεί μια απλουστευμένη έκφραση της επιτρεπτότητας. Πολλά ρευστά υλικά περιέχουν ένα παράγοντα αγωγιμότητας λόγω της κίνησης ιόντων με την ηλεκτρική αγωγιμότητα να είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Έτσι το μοντέλο επεκτείνεται προσθέτοντας ένα στατικό όρο ως εξής:

$$\varepsilon = \varepsilon_h + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.11)$$

Ακόμα και στην περίπτωση των μονωτικών υλικών όπου η τιμή του  $\sigma$  είναι σχετικά μικρή, ο δεύτερος όρος μπορεί να είναι ο κυρίαρχος στις χαμηλές συχνότητες. Από τη σχέση (2.11) τα πραγματικά και φανταστικά μέρη υπολογίζονται ως εξής:

$$\varepsilon' = \text{Re}\{\varepsilon\} = \varepsilon_h + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$\varepsilon'' = \text{Im}\{\varepsilon\} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_h) \cdot \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$$

Στην πραγματικότητα δεν ακολουθούν όλα τα ρευστά την εξίσωση *Debye*. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί και άλλες παρόμοιες εμπειρικές εξισώσεις για την συμπεριφορά των ρευστών. Αυτές οι εξισώσεις περιλαμβάνουν πολλούς χρόνους χαλάρωσης. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση είναι η ακόλουθη (εξίσωση *Cole-Cole*):

$$\varepsilon = \varepsilon_h + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_h}{1 + (j\omega\tau)^{1-\beta}} \quad (2.12)$$

Όπου  $\beta$  μια παράμετρος που δίνει το εύρος της περιοχής ολικού μεγίστου της  $\varepsilon''$ , υποδικτύοντας μια κατανομή του χρόνου χαλάρωσης. Για  $\beta = 0$  η εξίσωση (2.12) μετατρέπεται στη (2.9). Η σχέση (2.12) χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό μιας ευρείας γκάμας υλικών. Ορισμένες τιμές της παραμέτρου  $\beta$  δίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1 Διηλεκτρική χαλάρωση για συγκεκριμένα υγρά στους 25°C. Οι τιμές των υλικών βασίστηκαν στα [39], [40].

Υλικό	$\varepsilon_h$	$\varepsilon_s$	$\beta$	$\tau$ (ps)
Προπανάλη	3,2	20	0	291,78
Αέρας	1	-	-	-
Αργό πετρέλαιο	2,32	2,19	0,52	11,3
Αιθανόλη	4,2	24	0	127,85
Νερό (απιονισμένο)	5	78	0	8,08

Από τις τιμές της παραμέτρου  $\tau$  στο πίνακα και την εξίσωση (2.10) υπολογίζεται πως η διαδικασία χαλάρωσης λαμβάνει χώρα σε συχνότητες μεγέθους GHz. Στη συγκεκριμένη εργασία και στην εφαρμογή οι μετρήσεις λαμβάνουν χώρα σε τιμές μεταξύ 0,5 – 1MHz. Ως επακόλουθο, οι μηχανισμοί χαλάρωσης είναι δυνατό να παραλειφθούν από την περεταίρω

μελέτη και η τιμή της επιτρεπτότητας του υλικού να θεωρείται ίση με αυτή χαμηλής συχνότητας που δίνεται από τη σχέση

$$\varepsilon_s = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2.13)$$

Όπου  $\varepsilon$  περιγράφει τη στατική σχετική επιτρεπτότητα που ονομάζεται και διηλεκτρική σταθερά. Το ισοδύναμο κύκλωμα χαμηλών συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του υλικού όπως περιγράφηκε παραπάνω εκφράζεται εισάγοντας την έκφραση (2.13) στη σχέση αγωγιμότητας (2.7) δηλαδή:

$$Y = k(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon) \quad (2.14)$$

## 3 Ηλεκτρική Τομογραφία

### 3.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική τομογραφία είναι μια μη παρεμβατική μέθοδος απεικόνισης εγκάρσιας τομής που αναπτύχθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1980 από το πανεπιστήμιο του Manchester. Είναι σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας είναι αρκετά γρήγορο στη κατασκευή μιας εικόνας. Σήμερα είναι δυνατόν να κατασκευαστούν συστήματα με συχνότητα ως και  $1000\text{Hz}$ , αν και στις περισσότερες εφαρμογές προτιμώνται συχνότητες από  $10\text{Hz}$  ως  $100\text{Hz}$ . Η ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα που προσφέρει η μέθοδος την καθιστά ιδανική για παρακολούθηση βιομηχανικών διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο. Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η γενική θεωρία γύρω από την παραπάνω μέθοδο τομογραφίας.

### 3.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας η ηλεκτρική τομογραφία υιοθετείται ολοένα και περισσότερο ως μέθοδος μέτρησης σήμερα. Αν και αναπτύχθηκε αρχικά για δισδιάστατη απεικόνιση μιας εγκάρσιας τομής εντός ενός κλειστού χώρου, ως μέθοδος έχει τη δυνατότητα και τρισδιάστατης απεικόνισης ενός συγκεκριμένου χώρου [41], [42]. Αυτός είναι και ο λόγος που ως μέθοδος είναι αρκετά ευέλικτη και προσφέρει πολλές διαφορετικές πληροφορίες σε σχέση με άλλες παραδοσιακές μεθόδους τομογραφίας.

Τα πρώτα συστήματα που αναπτύχθηκαν [43], [44] αποτελούνταν από μια διάταξη 8 ηλεκτροδίων για την απεικόνιση μιας κατανομής αέρα και άμμου. Τα αρχικά αυτά συστήματα κατασκευάζονταν από απλές διατάξεις κυκλωμάτων. Συγκεκριμένα ένας μετατροπέας τάσης χωρητικότητας με έναν πολυπλέκτη χρησιμοποιούνταν για τη μέτρηση των 28 συνδυασμών ηλεκτροδίων. Η μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά καθώς και η διαδικασία απεικόνισης εκτελούνταν από έναν υπολογιστή. Παρόλο που οι μετρήσεις ήταν σχετικά γρήγορες, η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς της εποχής καθυστέρουσε την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με επακόλουθο την αδυναμία απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο.

Σημαντική παράμετρος στη μέθοδο είναι η ανάλυση των κυκλωμάτων μέτρησης της χωρητικότητας καθώς θα πρέπει να αντιλαμβάνονται μεταβολές της τάξης των *femto* – *Farad* (*fF*). Από τη στιγμή που το μέγεθος των μεταβολών αυτών είναι τόσο μικρό, είναι σημαντικό οι μέθοδοι αυτές [45], [46] να είναι θωρακισμένες από παρασιτικές χωρητικότητες είτε από την πηγή είτε από τη γείωση. Οι δύο βασικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για τη μέτρηση της χωρητικότητας είναι η μέθοδος μεταφοράς φορτίου (*charge transfer*) [45], [46] και η μέθοδος εναλλασσόμενου ρεύματος (*AC-based*) [47]. Η δεύτερη είναι σημαντικά καλύτερη από την πρώτη προσφέροντας καλύτερη ανάλυση μετρήσεων και υψηλότερο δείκτη

σηματοθορύβου ( $SNR$ ), όντας ωστόσο ακριβή και πολύπλοκη μέθοδος. Αντίθετα η μέθοδος μεταφοράς φορτίου απαιτεί μικρότερα σε μέγεθος και λιγότερο πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα καθιστώντας το σύστημα μικρότερο σε όγκο, βάρος και με αυξημένη αξιοπιστία. Η χρήση μεγάλων σε μέγεθος ηλεκτροδίων επιτρέπει τη μειωμένη ανάλυση των μετρήσεων. Αποφεύγοντας τη σχεδίαση μιας διάταξης με πολλά ηλεκτρόδια επιτρέπει τη χρήση λίγων και μεγάλου μεγέθους ηλεκτροδίων και ηλεκτρονικών με χαμηλότερη ανάλυση μετρήσεων. Το μειονέκτημα αυτής της σχεδίασης είναι ο μικρότερος αριθμός μετρήσεων που έχει συνέπειες στην ανάλυση της εικόνας που κατασκευάζεται. Τέλος, έχουν προταθεί και εναλλακτικές μέθοδοι μέτρησης είτε με χρήση υψηλών τάσεων είτε μέσω διαφορικής μέτρησης της τάσης.

Το φυσικό και μαθηματικό υπόβαθρο της μεθόδου περιγράφεται σε δύο διαφορετικά προβλήματα, το ορθό και το ανάστροφο τα οποία απαιτείται να αναλυθούν για να μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ανάλυση του ορθού προβλήματος [48] είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση της γεωμετρίας του αισθητήρα ενώ η επίλυση του ανάστροφου προβλήματος χρειάζεται για την ανακατασκευή της εικόνας. Το ορθό πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα δισδιάστατο επίπεδο πρόβλημα με την προϋπόθεση ότι τα ηλεκτρόδια είναι αρκετά μεγάλα και η ευκρίνεια του συστήματος δεν είναι πάρα πολύ μεγάλη. Η βασική ιδέα για την επίλυση των δύο προβλημάτων, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, είναι η αναγωγή των μετρήσεων σε ολοκληρώματα πάνω σε μια επιφάνεια που απλοποιεί αρκετά τη μαθηματική έκφραση του προβλήματος.

Για την ανακατασκευή της εικόνας έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι [49] με τις κυριότερες να είναι η μέθοδος *linear back projection*, η μέθοδος *Landweber* [51], [52] και η μέθοδος *Tikhonov* [50]. Πιο πρόσφατα έχουν προταθεί νέες μέθοδοι ανακατασκευής που βασίζονται είτε στη χρήση ασαφούς λογικής είτε μέσω νευρωνικών δικτύων. Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους χαρακτηρίζεται από την ποιότητα της εικόνας που κατασκευάζεται και το χρόνο ανακατασκευής. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται.

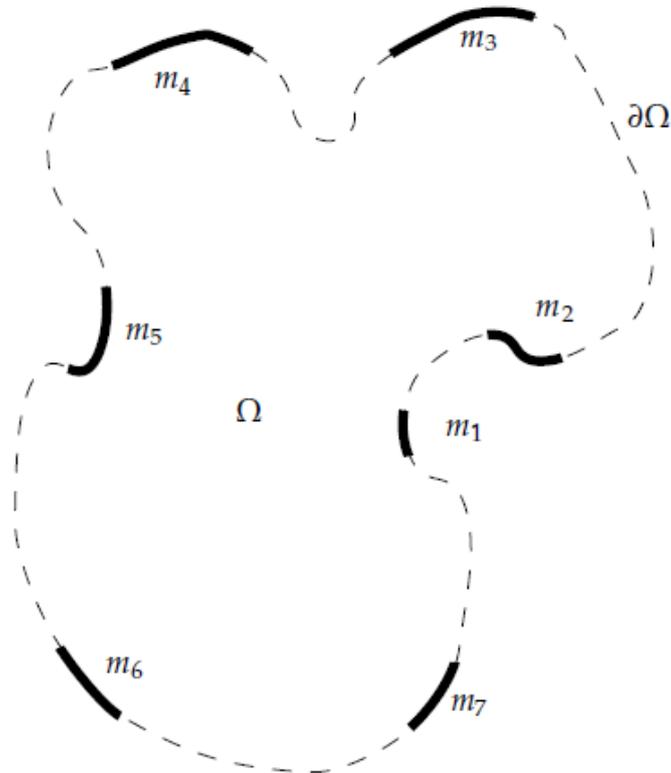
### 3.3 Τομογραφία

Η διαδικασία της τομογραφίας ορίζεται ως τη κατασκευή εγκάρσιων εικόνων σωμάτων που βρίσκονται σε ένα χώρο  $\Omega$  από μετρήσεις που λαμβάνονται εκτός του χώρου με όριο το  $d\Omega$ . Οι μετρήσεις  $m_i$  υπολογίζονται από ολοκλήρωση πάνω στο χώρο ανακατασκευής έχοντας και μια κατανομή βαρών, δηλαδή:

$$m_i = \int_{\Omega} f(x)S_i(x) da \quad (3.1)$$

Με :  $\Omega$  το χώρο ανακατασκευής  
 $S_i$  τη κατανομή των βαρών

$f$  η συνάρτηση κατανομής όπως υπολογίζεται από το τομογράφο.  
 $x(x, y)$  το σημείο ενδιαφέροντος στο επίπεδο.



Σχήμα 3.1 Η εικόνα απεικονίζει το χώρο  $\Omega$  με το όριο  $\partial\Omega$  στο οποίο εκτελούνται οι μετρήσεις  $m_i$ . Συνήθως μια διαταραχή παρουσιάζεται στο χώρο  $\Omega$  και το φαινόμενο μετράται πάνω στο όριο. Κάθε μέτρηση  $m_i$  είναι περισσότερο ευαίσθητη σε ένα κομμάτι του χώρου  $\Omega$  και η πίνακας αυτός απεικονίζεται στο πίνακα  $S_i$ .

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη βασική σχέση υπολογισμού για όλες τις μεθόδους τομογραφίας. Τα κοινά στοιχεία όλων των μεθόδων είναι οι μετρήσεις που λαμβάνονται πάνω στο όριο του χώρου ενδιαφέροντος, και το γεγονός πως είναι μη παρεμβατικές μέθοδοι για τη διάταξη της ροής.

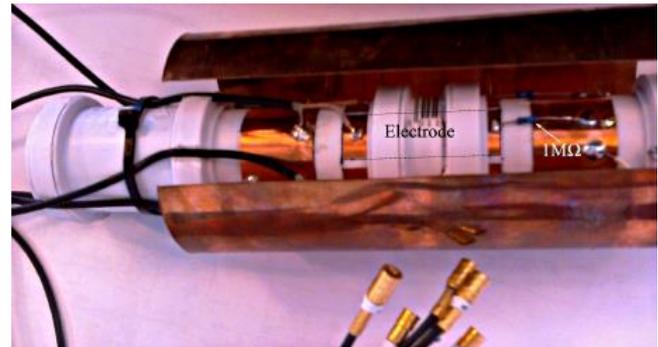
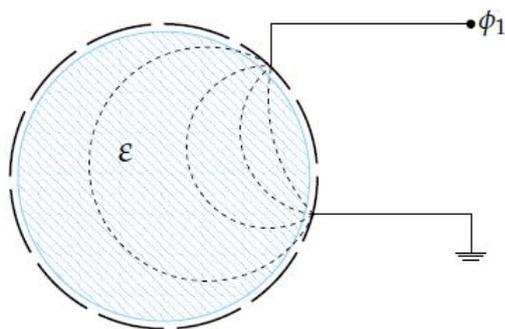
### 3.4 Ηλεκτρική τομογραφία

Για κάθε μέθοδο τομογραφίας η κατανομή και οι μετρήσεις διαφέρουν. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας, ως οριακές μετρήσεις  $m_i$  λαμβάνονται οι τιμές των χωρητικοτήτων και ως συνάρτηση κατανομής  $f$  η κατανομή της επιτρεπτότητας  $\epsilon(x, y)$  εντός του κλειστού τομέα  $\Omega$ . Οι τυπικές τιμές των μετρούμενων χωρητικοτήτων είναι στο επίπεδο των  $fF$  και λαμβάνονται μέσω κυκλωμάτων με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι το γεγονός πως χαρακτηρίζεται ως “*soft-field*”. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το ηλεκτρικό πεδίο κατανέμεται στο χώρο προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα οι μετρήσεις των χωρητικοτήτων να επηρεάζονται από όλο το χώρο και όχι από το τοπικό σημείο ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα η ευαισθησία να μην είναι απόλυτα καθορισμένη για κάθε μέτρηση. Το παραπάνω φαινόμενο σε συνδυασμό με τον

σχετικά μικρό αριθμό μετρήσεων είναι οι αιτίες που η εικόνα παρουσιάζει θολούρα ακόμα και με χαμηλότερης ανάλυσης εικόνες.

Η κατασκευή ενός απλού αισθητήρα μέτρησης ηλεκτρικής χωρητικότητας βασίζεται στη τοποθέτηση ηλεκτροδίων εξωτερικά ενός σωλήνα μέσα από τον οποίο ρέει το προς μέτρηση υλικό. Πάνω και κάτω από το χώρο των αισθητών καθώς και περιμετρικά στο εξωτερικό πολλές φορές τοποθετούνται ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να μην επηρεάζεται το σύστημα από εξωτερικά πεδία.



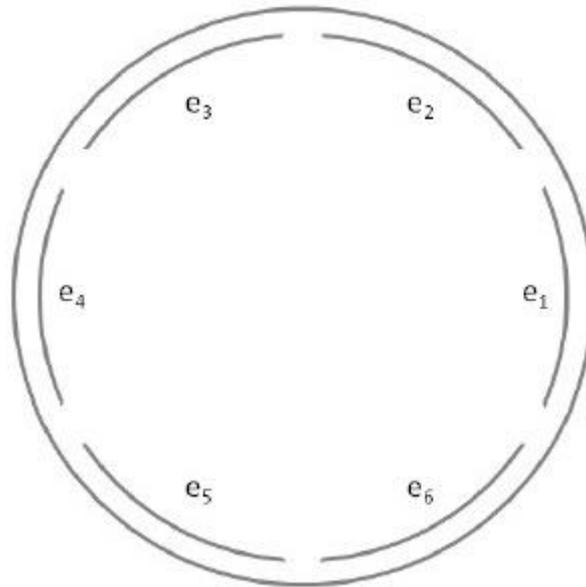
**Σχήμα 3.2** Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη 12 ηλεκτροδίων γύρω από ένα δακτύλιο. Σε ένα ηλεκτρόδιο εφαρμόζεται σταθερό δυναμικό  $\Phi_1$  ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν γειωμένα. Στη συνέχεια μετράται η χωρητικότητα μεταξύ κάθε γειωμένου ηλεκτροδίου με την πηγή. Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται ένας δοκιμαστικός αισθητήρας με 6 ηλεκτρόδια. Η θέση κάθε ηλεκτροδίου παρουσιάζεται με τη διακεκομμένη γραμμή.

Η διαδικασία των μετρήσεων περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός εξωτερικού σήματος τάσης σε ένα ηλεκτρόδιο και μετρώντας τη χωρητικότητα στα υπόλοιπα ενώ είναι γειωμένα. Το μετρούμενο ηλεκτρόδιο συνδέεται σε ηλεκτρονικό κύκλωμα μετατροπής χωρητικότητας σε τάση ώστε να είναι μετρήσιμη η έξοδος. Οι μετρήσεις που εκτελούνται σε αισθητήρα  $N$  ηλεκτροδίων είναι  $\frac{N(N-1)}{2}$ . Οι αμοιβαίες χωρητικότητες δεν υπολογίζονται και καθώς η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων  $i$  και  $j$  είναι ίδια με τη χωρητικότητα μεταξύ  $j$  και  $i$  είναι απαραίτητο μόνο μια μέτρηση ανά ζεύγος.

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών είναι δυνατόν να μετρηθούν περισσότερες από μια σειρά  $\frac{N(N-1)}{2}$  μετρήσεων και είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Για να μπορεί ωστόσο να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται αρκετά γρήγορη επεξεργασία και κατασκευή της εικόνας πριν ολοκληρωθεί η επόμενη μέτρηση. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σήμερα απαιτούν χρόνο για τον υπολογισμό ώστε να έχουν καλά αποτελέσματα στην εικόνα. Οι πλέον γρήγορη μέθοδος απεικόνισης βασίζεται στη χρήση αλγορίθμου *Linear Back Projection* (LBP) η οποία μπορεί να δώσει γρήγορα εικόνα αλλά με αρκετά έντονη θολούρα.

### 3.5 Πίνακας ευαισθησίας

Το αντικείμενο της παραγράφου είναι ο υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας του ορθού προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ανάλυση ξεκινά με τον υπολογισμό του ορθού προβλήματος [2], [48], [53] η επίλυση του οποίου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των χωρητικότητας μεταξύ των ηλεκτροδίων έχοντας γνωστή τη κατανομή της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας στο εσωτερικό. Η επίλυση που θα παρατεθεί δεν εξαρτάται από τη γεωμετρία και τη κατανομή, ωστόσο για την απλούστερη ανάλυση θα χρησιμοποιηθούν απλές τοπολογίες. Μια τυπική απλή γεωμετρία αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3.3 Τυπική γεωμετρία αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων  $e_i$  εξαρτάται από τη κατανομή της επιτρεπτότητας εντός του χώρου  $\Omega$ .

Η γεωμετρία περιλαμβάνει ένα δίσκο, η τομή του σωλήνα μέσα στον οποίο ρέει το μέσο, στο όριο του οποίου είναι συμμετρικά τοποθετημένα ηλεκτρόδια. Εξωτερικά τοποθετείται στρώμα μονωτικού και γειωμένο περίβλημα που θωρακίζει τον αισθητήρα από εξωτερικές παρεμβολές.

Το ηλεκτρικό δυναμικό εσωτερικά του χώρου του αισθητήρα εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες. Στη διαδικασία των μετρήσεων το εξωτερικό περίβλημα όπως και όλα τα ηλεκτρόδια πλην ενός είναι γειωμένα. Το δυναμικό  $u_j$  στο ηλεκτρόδιο  $j$ , όταν το εξωτερικό δυναμικό εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο  $i$  εκφράζεται από τη συνάρτηση δέλτα

$$\delta_{ij} = u_j = \begin{cases} 0, & j \neq i \\ 1, & j = i \end{cases}$$

Ο συμβατικός τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας μεταξύ δύο αγωγίμων πλακών είναι ίσος με το κλάσμα μεταξύ του ρυθμού συσσώρευσης φορτίου στα ηλεκτρόδια δια το δυναμικό που ευθύνεται για αυτή τη μετακίνηση φορτίου και δίνεται από το τύπο:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.2)$$

Η εξίσωση της συνέχειας μπορεί να εκφράσει το φορτίο  $Q$  συναρτήσει της κλίσης του δυναμικού  $\nabla u_j$ . Έτσι η παραπάνω σχέση, με τη χρήση των εξισώσεων του *Maxwell* μπορεί να εκφραστεί μόνο συναρτήσει του δυναμικού. Η εξίσωση συνέχειας εκφρασμένη σε δισδιάστατο χώρο είναι ισοδύναμη με το θεώρημα *Green*. Ολοκληρώνοντας την απόκλιση του ηλεκτρικού πεδίου  $(\nabla \cdot \vec{E})$  πάνω σε μια επιφάνεια  $\Omega$  είναι ισοδύναμο με το ολοκλήρωμα την ροής του ηλεκτρικού πεδίου  $\vec{E}$  από το όριο  $\partial\Omega$  και δίνεται από το τύπο:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot \vec{E} da = \oint_{\partial\Omega} \vec{E} \cdot \vec{n} ds \quad (3.3)$$

Το φορτίο  $Q_{ij}$  πάνω στο ηλεκτρόδιο  $i$  που προκαλείται από το δυναμικό  $u_j$  δίνεται από το τύπο:

$$Q_{ij} = \oint_{\delta e_i} \varepsilon \cdot u_j dl \quad (3.4)$$

Όπου  $\varepsilon = \varepsilon(x, y)$  η κατανομή της επιτρεπτότητας.

Ο τελικός υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας κατασκευάζεται αριθμητικά από την παραπάνω σχέση. Στην ουσία είναι η ιακωβιανή μήτρα του συστήματος και εκφράζεται από:

$$[[S]]_{ip} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon_p} Q_i \quad (3.5)$$

Όπου το στοιχείο  $ip$  της Ιακωβιανής μήτρας είναι η παράγωγος του φορτίου του ηλεκτροδίου  $Q_i$  σε σχέση με την επιτρεπτότητα του στοιχείου  $p$ .

Υπολογίζοντας την αλλαγή του φορτίου που προκαλείται από διαταραχές στην επιτρεπτότητα του μέσου κατασκευάζουμε το πίνακα ευαισθησίας. Αριθμητικά σημαίνει την επίλυση της παραπάνω σχέσης για κάθε πιθανή κατανομή επιτρεπτότητας, διαδικασία αρκετά χρονοβόρα και μη αποδοτική. Μια απλούστερη αλλά και αρκετά αργή μέθοδος είναι ο πειραματικός υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά σημαντική καθώς είναι ένας τρόπος πειραματικού υπολογισμού. Η ανακατασκευή του πίνακα επιτυγχάνεται δημιουργώντας περιοχές υψηλής επιτρεπτότητας εντός του αισθητήρα μέσα σε υλικό χαμηλότερης επιτρεπτότητας και μετρώντας τη χωρητικότητα των ηλεκτροδίων. Γνωρίζοντας τη τοπολογία της επιτρεπτότητας, μέσω των μετρήσεων μπορεί να κατασκευαστεί εμπειρικά ένας πίνακας ευαισθησίας για το αισθητήριο σύστημα.

Η ανάλυση που ακολουθεί στη συνέχεια και θα υιοθετηθεί και στην υλοποίηση χρησιμοποιεί μια γρήγορη αριθμητική επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το δυναμικό εντός του χώρου του αισθητήρα υπολογίζεται από το τύπο:

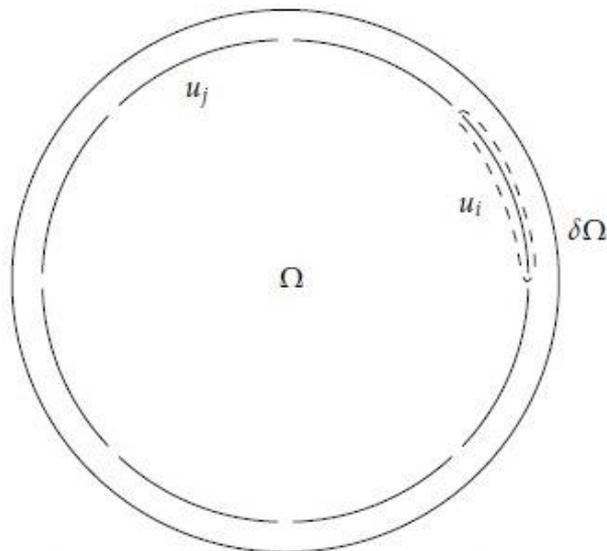
$$\nabla \cdot [\varepsilon \nabla u_i] = 0 \quad (3.6)$$

Όπου  $u_i$  το δυναμικό που παράγεται εφαρμόζοντας τάση στο ηλεκτρόδιο  $i$  κρατώντας τα υπόλοιπα γειωμένα. Στο όριο του χώρου  $\Omega$  το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια  $\delta\Omega$ . Άρα ισχύει:

$$\begin{aligned} u_i &= \delta_{ij}, & \text{στο } e_j \\ \varepsilon \nabla u_i \cdot n &= 0, & \text{στο } \delta\Omega \end{aligned}$$

Όπου  $e_j$  το ηλεκτρόδιο  $j$ . Το πεδίο  $u_i$  χρησιμοποιείται για την εύρεση του φορτίου  $Q_{ij}$  από την επίλυση της εξίσωσης (3.6). Ο αρχικός υπολογισμός γίνεται εφαρμόζοντας δυναμικό στο ηλεκτρόδιο  $j$  και ολοκληρώνοντας πάνω σε ένα κλειστό όριο γύρω από το ηλεκτρόδιο  $i$  για τον υπολογισμό του φορτίου που δημιουργείται πάνω στο ηλεκτρόδιο λόγω του πεδίου που προκαλείται από το ηλεκτρόδιο  $j$ . Το κλειστό μονοπάτι γύρω από το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι οσοδήποτε μικρό. Για ευκολία υπολογισμών θεωρείται ότι το όριο ολοκλήρωσης είναι πολύ κοντά στο ηλεκτρόδιο ώστε το πεδίο να είναι ομοιόμορφο και ορίζεται ως τιμή δυναμικού  $u_i = 1$ , δηλαδή:

$$\begin{aligned} u_i &= 1 \quad \text{στο } e_i \\ Q_{ij} &= \int_{\delta e_i} \varepsilon (\nabla u_j) u_i \cdot n \, dl \end{aligned} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.4 Το αρχικό δυναμικό εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο  $j$ . Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το περίγραμμα  $\delta e_i$  πάνω στο οποίο υπολογίζεται το ολοκλήρωμα. Όσο το  $\delta e_i$  πλησιάζει το ηλεκτρόδιο  $i$  τόσο η τιμή  $u_i$  πλησιάζει το 1, που σύμφωνα με τη σχέση (2.6) δεν αλλάζει τη τιμή του ολοκληρώματος.

Πλέον, υπάρχουν δύο πεδία μέσα στον υπολογισμό του φορτίου. Η αρχική έκφραση περιλάμβανε μόνο το πεδίο από το ηλεκτρόδιο  $j$  ενώ τώρα προστέθηκε και το πεδίο του ηλεκτροδίου  $i$ . Χρησιμοποιώντας το θεώρημα *Green* στη σχέση (3.7) το ολοκλήρωμα μετατρέπεται σε:

$$Q_{ij} = \int_{\delta e_i} \varepsilon(\nabla u_j) u_i \cdot n \, dl = \int_{\Omega} \nabla \cdot \{ \varepsilon(\nabla u_j) u_i \} \, d\alpha = \int_{\Omega} \varepsilon(\nabla u_j) \cdot \varepsilon(\nabla u_i) + u_i \nabla \cdot \{ \varepsilon \nabla u_j \} \, d\alpha$$

Εξαλείφοντας τους όρους ανώτερης τάξης σύμφωνα με τη σχέση (2.5) έχουμε:

$$Q_{ij} = \int_{\Omega} \varepsilon(\nabla u_j) \cdot \varepsilon(\nabla u_i) \, d\alpha \quad (3.8)$$

Η παραπάνω σχέση (3.8) είναι μια έκφραση του φορτίου και έμμεσα υπολογίζει και τη χωρητικότητα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Σημαντική παρατήρηση είναι πως το συνολικό φορτίο σε ένα ηλεκτρόδιο εξαρτάται από δύο λύσεις της (3.6), μια με δυναμικό  $\delta_{ij}$  και μια με δυναμικό  $\delta_{ji}$ . Στη συνέχεια θα ακολουθήσει η ανάλυση και κατασκευή του πίνακα ευαισθησίας με τη μέθοδο της γραμμικοποίησης της εξίσωσης (3.8).

Υποθέτοντας μια μικρή διαταραχή  $\delta e$  στη κατανομή της επιτρεπτότητας, οδηγούμαστε σε μικρές αλλαγές στα μετρούμενα δυναμικά των ηλεκτροδίων.

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon + \delta \varepsilon$$

$$\tilde{u}_k = u_k + \delta u_k$$

Η διαταραχή που δημιουργείται θεωρείται μικρή και περιορισμένη ώστε να έχει μη μηδενική τιμή μόνο εντός του χώρου ενδιαφέροντος  $\Omega$ . Στο όριο  $\delta\Omega$  η διαταραχή σταματά να υφίσταται. Το αποτέλεσμα στο φορτίο υπολογίζεται από :

$$\delta q_{ij} = \tilde{q}_{ij} - q_{ij} \quad (3.9)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.8) υπολογίζουμε το φορτίο σε σχέση με το δυναμικό

$$\begin{aligned} \delta q_{ij} &= \tilde{q}_{ij} - q_{ij} = \int_{\Omega} \tilde{\varepsilon}(\nabla \tilde{u}_j) \cdot \varepsilon(\nabla \tilde{u}_i) \, d\alpha - \int_{\Omega} \varepsilon(\nabla u_j) \cdot \varepsilon(\nabla u_i) \, d\alpha \\ &= \int_{\Omega} \delta \varepsilon(\nabla \tilde{u}_i) \cdot (\nabla \tilde{u}_j) + \varepsilon[\nabla u_j \cdot \nabla \delta u_i + \nabla \delta u_j \nabla u_i + \nabla \delta u_j \nabla \delta u_i] \, d\alpha \end{aligned} \quad (3.10)$$

Απλοποιώντας την παραπάνω σχέση αγνοώντας τον όρο δεύτερης τάξης :

$$\delta q_{ij} = \int_{\Omega} \delta \varepsilon(\nabla \tilde{u}_i) \cdot (\nabla \tilde{u}_j) + \varepsilon[\nabla u_j \cdot \nabla \delta u_i + \nabla \delta u_j \nabla u_i] \, d\alpha$$

Λόγω της (3.6), όπου τα πεδία  $u_k$  είναι λύσεις της, ο δεύτερος όρος της σχέσης (3.9) μπορεί να μετασχηματιστεί:

$$\nabla \cdot [\varepsilon \delta u_k \nabla u_l] = [\varepsilon \nabla \delta u_k] \cdot \nabla u_l + \nabla \delta u_k \cdot [\varepsilon \nabla u_l] = [\varepsilon \nabla \delta u_k] \cdot \nabla u_l \quad (3.11)$$

Κάνοντας χρήση του θεωρήματος *Green* επιστρέφουμε τη σχέση στη μορφή επικαμπύλιου ολοκληρώματος γύρω από κλειστό χωρίο γύρω από το ηλεκτρόδιο  $j$ :

$$\begin{aligned} \delta q_{ij} &= \int_{\Omega} \delta \varepsilon (\nabla \tilde{u}_i) \cdot (\nabla \tilde{u}_j) + \nabla \cdot [\varepsilon \delta u_i \nabla u_j + \varepsilon \delta u_j \nabla u_i] da \\ &= \int_{\Omega} \delta \varepsilon (\nabla \tilde{u}_i) \cdot (\nabla \tilde{u}_j) + \oint_{\delta e_i} \varepsilon \delta u_i \nabla u_j \cdot n dl + \oint_{\delta e_j} \varepsilon \delta u_j \nabla u_i \cdot n dl \end{aligned}$$

Επειδή στο όριο οι διαταραχές  $\delta u_k$  μηδενίζονται στο  $\delta u_i$  η εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \delta q_{ij} &= \int_{\Omega} \delta \varepsilon (\nabla \tilde{u}_i) \cdot (\nabla \tilde{u}_j) da \\ &= \int_{\Omega} \delta \varepsilon [(\nabla u_i) \cdot (\nabla u_j) + (\nabla \delta u_i) \cdot (\nabla u_j) + (\nabla u_i) \cdot (\nabla \delta u_j) + (\nabla \delta u_i) \cdot (\nabla \delta u_j)] da \end{aligned}$$

Αφαιρώντας ξανά τους όρους μεγαλύτερης τάξης το αποτέλεσμα είναι το ακόλουθο:

$$\delta q_{ij} = \int_{\Omega} \delta \varepsilon (\nabla u_i) \cdot (\nabla u_j) da \quad (3.12)$$

Η ύπαρξη του δεύτερου δυναμικού εντός του ολοκληρώματος στο (3.7) δεν επηρέαζε το αποτέλεσμα καθώς στο δυναμικό δόθηκε η τιμή  $u_i = 1$  στο όριο. Με το μετασχηματισμό *Green* στο χώρο, τα δυναμικά και των δύο ηλεκτροδίων επηρεάζουν τη τιμή του φορτίου. Η σχέση περιγράφει την ευαισθησία του αισθητήρα στο χώρο που καλύπτουν τα δύο πεδία των ηλεκτροδίων  $i, j$ . Η σχέση επίσης καταδεικνύει και τη συμμετρία του φορτίου δηλαδή  $Q_{ij} = Q_{ji}$ .

### 3.6 Αναλυτική έκφραση ευαισθησίας

Από τη σχέση (3.5) υπολογίζεται ο πίνακας ευαισθησίας του αισθητήρα [54]. Για τον υπολογισμό της ανάλυσης είναι επιθυμητό να δοθεί μια διαφορετική έκφραση για την ευαισθησία σε μορφή διανυσματικού πεδίου. Για αυτό το λόγο ορίζεται το διάνυσμα  $\vec{\xi}_i$  το οποίο εκφράζει το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από το ηλεκτρόδιο  $i$  όταν το τελευταίο βρίσκεται σε δυναμικό  $V = 1 \text{ volt}$ , δηλαδή:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= V_i \vec{\xi}_i \\ c_{ij} &= \varepsilon V \vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j \\ \delta Q_i &= V_j \delta c_{ij} = \delta \varepsilon V \vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j \end{aligned}$$

Από τη σχέση (3.5) υπολογίζονται οι αναλυτικές εκφράσεις για την ευαισθησία του αισθητήρα ακολούθως:

$$\xi_o = \xi_o^x - i\xi_o^y = \frac{iR \sqrt{2 \cos(\pi/N) + 2 \cos(n\pi/N)}}{\pi(x+iy) \sqrt{R^2 e^{-i\pi/N} - 2R(x+y) \cos(n\pi/N) + (x+y)^2 e^{i\pi/N}}} - \frac{iR \sqrt{2 \cos(\pi/N) + 2 \cos(n\pi/N)}}{\pi(x+iy) \sqrt{R^2 e^{i\pi/N} - 2R(x+y) \cos(n\pi/N) + (x+y)^2 e^{-i\pi/N}}} \quad (3.13)$$

Στην παραπάνω σχέση με  $n$  εκφράζεται ο λόγος του κενού μεταξύ των ηλεκτροδίων ως προς το μέγεθος τους. Από την παραπάνω μιγαδική σχέση λόγω συμμετρίας μπορεί να υπολογιστεί το πεδίο κάθε ηλεκτροδίου  $\xi_i$  μέσω μιας στροφής κατά  $\frac{2\pi j}{N}$ . Η έκφραση του πεδίου ευαισθησίας για κάθε ηλεκτρόδιο δίνεται από τη σχέση

$$\xi_i(x + yi) = e^{-\frac{2\pi j}{N}} \times \xi_o \left( (x + yi) e^{-\frac{2\pi j}{N}} \right) \quad (3.14)$$

### 3.7 Διακριτοποίηση πίνακα

Πριν εξεταστεί η διακριτοποίηση του πίνακα ευαισθησίας θα πρέπει ο χώρος ενδιαφέροντος  $\Omega$  να χωριστεί σε στοιχειώσεις υποχώρους. Επειδή εξετάζεται τοπολογία κυλινδρική με εγκάρσια τομή κύκλο, η διακριτοποίηση θα γίνει σε πολικές συντεταγμένες. Σε πολικές συντεταγμένες ο χώρος χωρίζεται:

$$r_i = \frac{R}{M} (i - 1)$$

$$\theta_j = \frac{2\pi}{N} (j - 1)$$

Όπου  $i, j$  οι αριθμοί της στοιχειώδης ακτίνας και γωνίας αντίστοιχα,  $M, N$  η διαμέριση της ακτίνας και γωνίας στο χώρο,  $k = (i, j)$  ο αριθμός του στοιχειώδους υποχώρου,  $r_k$  ακτίνα του  $k$ -οστού στοιχείου και  $da_k$  το στοιχειώδες εμβαδό. Η παραπάνω εξίσωση εκφρασμένη σε διακριτό χώρο [2]:

$$\delta q_{ij} = \sum_k \delta \varepsilon_k \nabla u_i(r_k, \theta_k) \cdot \nabla u_j(r_k, \theta_k) da_k$$

Όπου  $\delta \varepsilon_k$  η τιμή της επιτρεπτότητας του  $k$ -οστού στοιχείου. Από την παραπάνω εξίσωση γίνεται αντιληπτό ο τρόπος που υπολογίζεται το φορτίο στο ηλεκτρόδιο. Ο πίνακας ευαισθησίας ορίζεται στο διακριτό χώρο ως εξής:

$$S_{ijk} = \nabla u_i(r_k, \theta_k) \cdot \nabla u_j(r_k, \theta_k) da_k \quad (3.15)$$

Και ο υπολογισμός του φορτίου εκφράζεται από τη σχέση:

$$\delta q_{ij} = \sum_k \delta \varepsilon_k S_{ijk}$$

Για μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση δεικτών θα υιοθετηθεί η χρήση ενός μόνο δείκτη  $i$  ο οποίος θα χαρακτηρίζει συνολικά το εξεταζόμενο ζεύγος ηλεκτροδίων, για παράδειγμα  $i = 1$  αναφέρεται στα ηλεκτρόδια 1 και 2,  $i = 2$  μεταξύ των 1 και 3. Έτσι η σχέση μετατρέπεται:

$$\delta q_i = \sum_k \delta \varepsilon_k S_{ik} \quad (3.16)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη διακριτή έκφραση του συστήματος ηλεκτρικής τομογραφίας και είναι η βάση για την ανακατασκευή του πίνακα ευαισθησίας. Επειδή η σχέση αυτή είναι γραμμικοποιημένη είναι σημαντικό να γίνει βαθμονόμηση του αισθητήρα και κανονικοποίηση της ευαισθησίας  $\varepsilon$  ώστε η διαταραχή να βρίσκεται στην περιοχή του  $\varepsilon_0$ .

Το συνολικό φορτίο στο ζεύγος ηλεκτροδίων δίνεται από τη σχέση:

$$q_i = q_i^0 + S_{ik}(\varepsilon_k - \varepsilon_k^0)$$

Όπου  $q_i^0$  η βαθμονομημένη μέτρηση και  $\varepsilon_k^0$  η κατανομή της ευαισθησίας. Από τη σχέση αυτή εξάγεται η επιτρεπτότητα του χώρου  $\Omega$  σύμφωνα με:

$$\varepsilon_k = S_{ik}^{-1}(q_i - q_i^0) + \varepsilon_k^0$$

Η έκφραση αυτή δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα στον υπολογισμό της επιτρεπτότητας. Παρατηρείται πως απαιτείται η αντίστροφη μήτρα του πίνακα ευαισθησίας  $S_{ik}^{-1}$  ο οποίος δεν είναι εν γένει τετραγωνικός και δεν έχει αντίστροφο. Έτσι, δεν είναι εύκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση κλειστής μορφής.

Η επίλυση της παραπάνω σχέσης χρειάζεται να εκφράζεται μέσω της μέτρησης της χωρητικότητας. Επιπλέον, απαιτείται ένα μέγεθος το οποίο θα μετασχηματίζει τις μετρήσεις σε μια απεικόνιση. Γι' αυτό το λόγο εισάγεται ένα διάνυσμα  $\vec{g}$  το οποίο εκφράζει το χρώμα του κάθε εικονοστοιχείου, σε αποχρώσεις του γκρι, ανάλογα με την κατανομή της επιτρεπτότητας. Κανονικοποιώντας τη σχέση μέσω δύο σετ μετρήσεων ( $c_{i,high}, c_{i,low}$ ) και ( $\varepsilon_{i,high}, \varepsilon_{i,low}$ ) λαμβάνονται οι εξής πίνακες μετρήσεων:

$$c_{i,norm} = \frac{c_i - c_{i,low}}{c_{i,high} - c_{i,low}} = \frac{q_i - q_{i,low}}{q_{i,high} - q_{i,low}}$$

$$|\vec{g}_{i,norm}| = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i,low}}{\varepsilon_{i,high} - \varepsilon_{i,low}}$$

Τέλος η έκφραση για το ορθό μοντέλο γράφεται ως εξής:

$$c_i = S_{ik} \vec{g}_i \quad (3.17)$$

Η σχέση αυτή χαρακτηρίζει ξεχωριστά κάθε εικονοστοιχείο της τελικής τομής και βάσει αυτής κατασκευάζεται το αντίστροφο μοντέλο που απαιτείται για την απεικόνιση.

Η επίλυση του ορθού μοντέλου απαιτεί τη γνώση της επιτρεπτότητας και βάσει αυτής υπολογίζει τις χωρητικότητες στον αισθητήρα. Η αντίστροφη διαδικασία απαιτεί την εύρεση της επιτρεπτότητας με γνωστές τις χωρητικότητες. Η λύση αυτού του προβλήματος είναι ιδιαίτερα απαιτητική καθώς συνήθως ο αριθμός των εικονοστοιχείων που χρειάζεται να υπολογιστούν είναι πολύ μεγαλύτερος από τη μέτρηση των χωρητικότητων με αποτέλεσμα το σύστημα να μην είναι καλώς ορισμένο. Στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία κατασκευής του αισθητήρα, καταγραφής των μετρήσεων και θα εξεταστεί τέλος ο τρόπος ανακατασκευής της εικόνας μέσω της επίλυσης του ανάστροφου προβλήματος.

## 4 Σχεδιασμός αισθητήρα

### 4.1 Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο πρόβλημα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η ανεπαρκής χωρική ανάλυση. Ταυτόχρονα, η ευαισθησία της μέτρησης είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη σχεδίαση του αισθητήρα και τη μέθοδο ανακατασκευής της εικόνας. Βασικός κανόνας είναι πως αύξηση του αριθμού των αισθητήριων οργάνων μεγαλώνει με ανάλογο τρόπο την ανάλυση. Ωστόσο το πρόβλημα της επεξεργασίας παραμένει σημαντικό καθώς η ισχυρά μη γραμμική φύση του προβλήματος προκαλεί δυσκολίες στη σύνθεση των επιμέρους δεδομένων. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας (ECVT) ο βαθμός δυσκολίας του προβλήματος αυξάνεται καθώς ο μη γραμμικός χαρακτήρας του φαινομένου είναι ιδιαίτερα ισχυρός. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διέπουν τη σχεδίαση ενός αισθητήρα ECVT για τις ανάγκες απεικόνισης σε ένα σύστημα μέτρησης ροής [55].

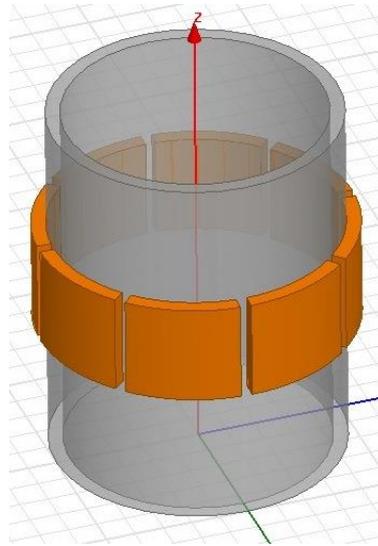
Το μέγεθος, το σχήμα και ο αριθμός των ηλεκτροδίων παίζουν σημαντικό ρόλο στη λήψη των μετρήσεων του αισθητήρα καθώς επίσης στην ευαισθησία και την ποιότητα της εικόνας που κατασκευάζεται. Ανάλογα με τις δυνατότητες ενός αισθητήρα για απεικόνιση χωρίζονται σε αισθητήρες δισδιάστατης και τρισδιάστατης τομογραφίας. Οι τρισδιάστατοι αισθητήρες, λόγω της έκτασής τους στις τρεις διαστάσεις είναι μεγαλύτεροι σε όγκο και πολυπλοκότεροι καθώς απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτροδίων, μετρήσεων και υπολογιστικού όγκου [55].

#### 4.1.1. Δισδιάστατος αισθητήρας

Στη δισδιάστατη μέθοδο ηλεκτρικής τομογραφίας, ο αισθητήρας έχει ευαισθησία στη μέτρηση στην ακτινική συνιστώσα (άξονες  $x, y$ ) θεωρώντας άπειρο μήκος ηλεκτροδίου στο  $z$  άξονα [56]. Η εικόνα ενός δισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας απεικονίζεται στο σχήμα 4.1.

Για την πλήρη απεικόνιση ενός στιγμιότυπου απαιτούνται  $\frac{M(M-1)}{2}$  μετρήσεις χωρητικότητας στο επίπεδο, όπου  $M$  είναι ο αριθμός των ηλεκτροδίων του επιπέδου. Στην περίπτωση της δισδιάστατης τομογραφίας αγνοούνται οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου στη διάσταση του  $z$  άξονα. Παρ' όλα αυτά το μήκος των ηλεκτροδίων δεν είναι πρακτικά άπειρο, λόγω πραγματικών διαστάσεων του αισθητήριου συστήματος, με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή παραμόρφωση του πεδίου που προκαλεί αλλοιώσεις στη τελική εικόνα κατά την ανακατασκευή, ένα φαινόμενο που ονομάζεται ως "*fringe effect*" [57]. Η κατανομή της επιτρεπτότητας στο χώρο υπολογίζεται από το πίνακα ευαισθησίας και τις χωρητικότητες που μετρώνται. Στη συνέχεια απεικονίζεται η κατανομή της επιτρεπτότητας στο επίπεδο της τομής

και αντιστοίχως καθορίζεται η φύση του υλικού καθώς η επιτρεπτικότητα αποτελεί μοναδικό χαρακτηριστικό.



Σχήμα 4.1 Μοντέλο 2D αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται γύρω από δακτύλιο στο όριο του χώρου μέτρησης  $\Omega$ . Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος ANSYS Maxwell.

#### 4.1.2. Τρισδιάστατος αισθητήρας

Στη δισδιάστατη τομογραφία μελετάται η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου με το μετρούμενο χώρο μόνο ακτινικά, θεωρώντας το αξονικό επίπεδο άπειρο. Για τη κατασκευή μιας τρισδιάστατης τομής εντός ενός χώρου  $\Omega$  απαιτείται η συσχέτιση των ηλεκτροδίων όχι μόνο σε ένα επίπεδο αλλά σε όλο χώρο. Το κύριο χαρακτηριστικό του τρισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η ισοκατανομή της ευαισθησίας των μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου σε όλο το χώρο και προς όλες τις διαστάσεις.

Μια αρχική προσέγγιση ήταν η κατασκευή ενός ψευδο-τρισδιάστατου αισθητήρα για την προσπάθεια δυναμικής απεικόνισης της ροής [58]. Η ψευδο-τρισδιάστατη απεικόνιση μπορούσε να επιτευχθεί μέσω μιας σειράς δισδιάστατων εικόνων στοιβαγμένων κατά μήκος του άξονα  $z$  που λαμβάνονται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Στη συνέχεια μέσω ψηφιακής επεξεργασίας γίνεται σύνθεση μιας εικόνας, η ανάλυση της οποίας εξαρτάται από τη συχνότητα λήψης των δισδιάστατων εικόνων, την ευαισθησία του αισθητήρα και τον αλγόριθμο επεξεργασίας. Το πρόβλημα της μεθόδου ήταν η αδυναμία λεπτομερούς απεικόνισης καθώς δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν μικρές χωρικές κατανομές.

Μια πιο σύγχρονη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μη γραμμική σχέση που ισχύει και στην περίπτωση της δισδιάστατης τομογραφίας και την επεκτείνει στο τρισδιάστατο χώρο. Στη κατασκευή του αισθητήρα πρέπει να ληφθούν υπόψη και η ακτινική και η αξονική συνιστώσα του πεδίου. Ζητούμενο επίσης είναι και η ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου προς όλες τις διαστάσεις για μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα στην ανακατασκευασμένη εικόνα. Η γεωμετρία, ο αριθμός των ηλεκτροδίων και η μορφή τους παίζουν καθοριστικό ρόλο

σε όλες τις παραπάνω παραμέτρους. Σήμερα, έχουν μελετηθεί και δοκιμαστεί πολλά αισθητήρια συστήματα με αρκετά διαφορετικές τοπολογίες μεταξύ τους. Στη συνέχεια θα εξεταστούν ορισμένες από αυτές πάνω σε κυλινδρική γεωμετρία αισθητήρα καθώς η ηλεκτρική τομογραφία είναι η συνήθης μέθοδος σε συστήματα σωληνώσεων στη βιομηχανία.

## 4.2 Τύπος αισθητήρα

Ένα σπουδαίο πλεονέκτημα των κυλινδρικών αισθητήρων είναι η αξονική συμμετρία που έχουν και που καθιστά αρκετά εύκολη και μη παρεμβατική την εγκατάστασή τους. Στις περισσότερες τοπολογίες είναι σύνηθες να υπάρχουν πολλαπλά επίπεδα ηλεκτροδίων με διαφορετικά σχήματα και θέσεις που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ευαισθησίας. Μερικές από τις πιθανές τοπολογίες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 4.2. Ο αριθμός των επιπέδων καθώς το σχήμα και το μέγεθός τους διαφέρουν από εφαρμογή σε εφαρμογή και επηρεάζουν κυρίως την αξονική ακρίβεια χωρίς να αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά της ακτινικής συμμετρίας. Η συνηθέστερη τοπολογία χρησιμοποιεί τετράγωνα ή ορθογώνια ηλεκτρόδια γύρω από το σωλήνα σε πολλά επίπεδα.



Σχήμα 4.2 Τρεις διαφορετικοί σχηματισμοί ενός αισθητήρα τρισδιάστατης τομογραφίας ECVT. Αριστερά είναι ένας αισθητήρας ενός επιπέδου τριγωνικής τοπολογίας, ενώ οι υπόλοιποι είναι ορθογώνιοι τριών και δύο επιπέδων αντίστοιχα [55].

Αύξηση των ηλεκτροδίων ανά επίπεδο επιτρέπει καλύτερη ανάλυση στην ακτινική συνιστώσα, αντίστοιχα αύξηση του αριθμού των επιπέδων επηρεάζει αρνητικά την ακτινική ανάλυση αλλά βελτιώνει την αξονική ανάλυση του αισθητήρα. Η τυπική τοπολογία πολλών επιπέδων περιλαμβάνει έναν αριθμό ορθογωνίων ηλεκτροδίων ανά επίπεδο διατεταγμένων με μια διαφορά γωνίας μεταξύ γειτονικών επιπέδων. Η διαφορά γωνίας βελτιώνει την ανάλυση της ανακατασκευασμένης εικόνας καθώς η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται περισσότερο ομοιόμορφη μειώνοντας τα σημεία χαμηλής ευαισθησίας (νεκρά σημεία) εντός του αισθητήρα. Ο μέγιστος αριθμός των επιπέδων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνήθως καθορίζεται από το σύστημα καταγραφής των μετρήσεων και το χώρο στον οποίο θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας. Σε συστήματα μέτρησης πολλών εισόδων είναι δυνατόν να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο περισσότερα ηλεκτρόδια και άρα να ανακατασκευαστεί

εικόνα με υψηλότερη ανάλυση με χρήση πολλών επιπέδων. Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων επηρεάζει τη κάθε μέτρηση καθώς εισάγεται θόρυβος από τα γειτονικά ηλεκτρόδια. Θεωρητικά μεγαλύτερη η απόσταση των ηλεκτροδίων επηρεάζει περισσότερο τις μετρήσεις αυξάνοντας το θόρυβο και μειώνοντας το λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR). Τέλος, το σχήμα των ηλεκτροδίων επηρεάζει ανάλογα και την ευαισθησία των μετρήσεων και την ανακατασκευή της εικόνας λόγω του “*fringe effect*”.

Οι παραπάνω διαφορετικές παράμετροι που επηρεάζουν τη σχεδίαση ενός τρισδιάστατου ηλεκτρικού τομογράφου δεν έχουν μελετηθεί ενδελεχώς. Η αύξηση του αριθμού των ηλεκτροδίων, η μελέτη της επιρροής του σχήματος και του μεγέθους τους και οι μέθοδοι ανακατασκευής της εικόνας είναι ορισμένα παραδείγματα σχεδιαστικών παραμέτρων που δεν έχουν βελτιστοποιηθεί πλήρως για κάθε πιθανή τοπολογία. Η σχεδίαση ενός αισθητήρα συνήθως περιλαμβάνει προσομοιώσεις σε υπολογιστή που εξετάζουν τις επιμέρους παραμέτρους και επιβεβαιώνουν τη καλή λειτουργία ενός πειραματικού αισθητήρα. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί μια απλή τοπολογία που αποτελείται από τρία επίπεδα ηλεκτροδίων τετράγωνου σχήματος γύρω από κυλινδρικό σωλήνα. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά ενός κυλινδρικού αισθητήρα τετράγωνων ηλεκτροδίων συναρτήσει του αριθμού των επιπέδων του. Βάσει των χαρακτηριστικών της τοπολογίας προτιμήθηκε η χρήση τριών επιπέδων που προσφέρει καλύτερη αξονική ανάλυση καθώς δεν συνυπολογίστηκε το μέγεθος του αισθητήρα για την εφαρμογή. Αν το μέγεθος είναι ζητούμενο χρειάζεται να εξεταστούν περαιτέρω και άλλες τοπολογίες.

Πίνακας 2 Συγκριτικός πίνακας κυλινδρικής τοπολογίας συναρτήσει του αριθμού των επιπέδων του αισθητήρα.

Τύπος αισθητήρα	Συμμετρία	Αξονική ανάλυση	Ακτινική ανάλυση
Κυλινδρικός με ένα επίπεδο	Μεγάλη	Χαμηλή ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο	Μεγάλη ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο
Κυλινδρικός με δύο επίπεδα	Μέτρια	Μέτρια ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο	Μέτρια ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο
Κυλινδρικός με τρία επίπεδα	Μέτρια	Μεγάλη ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο	Μέτρια προς υψηλή ευαισθησία. Μειώνεται προς το κέντρο

### 4.3 Ανάλυση αισθητήρα

Ως ανάλυση του αισθητήρα ορίζεται η μικρότερη δυνατή μετατόπιση  $\vec{\delta x}$  που παράγει μετρούμενο σήμα [54]. Στην περίπτωση του αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας οι μετρήσεις είναι σε αριθμό ίσες με το τετράγωνο του αριθμού των ηλεκτροδίων. Για να μπορεί να γίνει μέτρηση όλων των εξόδων πρέπει να συνυπολογιστεί το επίπεδο θορύβου όλων των πιθανών

μετρήσεων. Το βασικό κριτήριο για να μπορεί να γίνει σωστή μέτρηση είναι η μέση τιμή της ισχύος όλων των σημάτων να είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή θορύβου επί το εύρος ζώνης

$$\frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j (\delta m_{ij})^2 \geq NP \quad (4.1)$$

Όπου  $m_{ij}$  η μέτρηση στο ηλεκτρόδιο  $i$  όταν το ηλεκτρόδιο  $j$  βρίσκεται υπό δυναμικό  $V$ .

Από τη σχέση (3.11) υπολογίζεται η μεταβολή το φορτίου λόγω αλλαγής της κατανομής της επιτρεπτότητας:

$$\delta m_{ij} = \delta q_{ij} = \int_{\Omega} \delta \varepsilon (\nabla u_i) \cdot (\nabla u_j) da = V \Delta \varepsilon \int_{\mathcal{V}} \overrightarrow{\delta x} \cdot \nabla (\overrightarrow{\xi_i} \cdot \overrightarrow{\xi_j}) dv \quad (4.2)$$

Όπου  $\mathcal{V}$  στοιχειώδης όγκος,  $\overrightarrow{\delta x}$  μοναδιαίο διάνυσμα μεταβολής της επιτρεπτότητας, και  $\overrightarrow{\xi_i}$  το μοναδιαίο διάνυσμα που ορίζεται ως η επιρροή του ηλεκτροδίου  $i$  στις μετρήσεις. Το πεδίο που ορίζεται από όλα τα  $\overrightarrow{\xi_i}$  διανύσματα καλείται και πεδίο ευαισθησίας του αισθητήρα.

Η σχέση (4.1) λόγω της (4.2) μετατρέπεται σε

$$\frac{1}{N^2} \sum_i \sum_j \left( V \Delta \varepsilon \int_{\mathcal{V}} \overrightarrow{\delta x} \cdot \nabla (\overrightarrow{\xi_i} \cdot \overrightarrow{\xi_j}) dv \right)^2 \geq NP \quad (4.3)$$

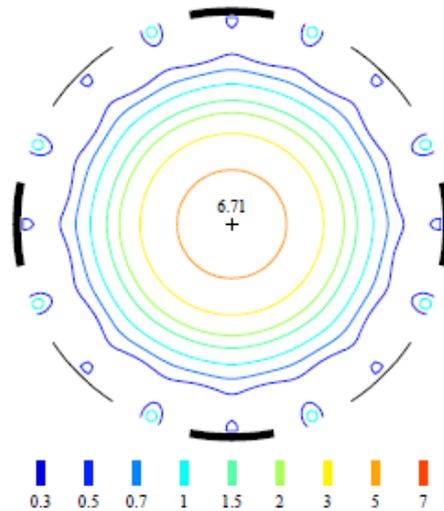
Για μικρές τιμές όγκου  $\mathcal{V}$  το ολοκλήρωμα της (3.3) μπορεί να θεωρηθεί σταθερό οδηγώντας στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{V^2 \Delta \varepsilon^2 \mathcal{V}^2}{N^2} \sum_i \sum_j \left( \overrightarrow{\delta x} \cdot \nabla (\overrightarrow{\xi_i} \cdot \overrightarrow{\xi_j}) \right)^2 \geq NP \quad (4.4)$$

Στη σχέση (4.4) ο όρος που καθορίζει την ανάλυση είναι ο  $\overrightarrow{\delta x}$  και εξαρτάται από τη μεταβολή της επιτρεπτότητας  $\Delta \varepsilon$  τη τάση  $V$  και τον όγκο  $\mathcal{V}$  του αντικειμένου. Έτσι, όσο μεγαλύτερες οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς του σήματος και καλύτερες οι μετρήσεις και η ανάλυση του αισθητήρα. Σημαντικό ρόλο ωστόσο στην ανάλυση του εσωτερικού του αισθητήρα παίζει το γινόμενο  $\overrightarrow{\xi_i} \cdot \overrightarrow{\xi_j}$  που καθορίζει την πυκνότητα της ευαισθησίας και τη κατεύθυνση της μετατόπισης  $\overrightarrow{\delta x}$ . Γι' αυτό το λόγο είναι και διαφορετική η ανάλυση στην αξονική και ακτινική συνιστώσα. Από την παραπάνω σχέση (4.4) αποδεικνύεται πως η εσωτερική ανάλυση είναι ανάλογη της σχέσης:

$$\frac{N}{\sqrt{\sum_i \sum_j |\nabla (\overrightarrow{\xi_i} \cdot \overrightarrow{\xi_j})|^2}} \quad (4.5)$$

Στην παρακάτω απεικονίζεται η ευαισθησία της ανάλυσης του αισθητήρα στο εσωτερικό του. Η ανάλυση είναι ομοιογενής στο κέντρο ενώ όσο πλησιάζουμε προς τα εξωτερικά τοιχώματα εξαρτάται από τη θέση του σημείου σε σχέση με τα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 4.3 Ανάλυση αισθητήρα στο εσωτερικό. Με μαύρο χρώμα στο όριο απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια. Οι τιμές αναφέρονται στη μετατόπιση  $1000 \times \delta x (m^3)$ .

Ένα επιπλέον σημαντικό μέγεθος κατά την απεικόνιση είναι η διαφορική ανάλυση του αισθητήρα. Ένα βασικό πρόβλημα που ανακύπτει κατά την ανακατασκευή της εικόνας είναι πως πολύ γειτονικά αντικείμενα απεικονίζονται σαν ένα ενιαίο καθώς οι μετρούμενες χωρητικότητες είναι πολύ μικρής κλίμακας σε πολύ μικρό όγκο. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται και στη μέθοδο ανακατασκευής της εικόνας αλλά και στην ικανότητα του αισθητήρα να μετρά και να ξεχωρίζει τις πολύ μικρές μεταβολές. Συγκεκριμένα αν υπάρχουν εντός του χώρου  $\Omega$  δύο κατανομές επιτρεπτότητας χωρισμένες από μια απόσταση  $\vec{\delta x}$  η μεταβολή υπολογίζεται σύμφωνα με τη (4.2) ως εξής:

$$\delta q_{ij}^1 = V \int_{\mathcal{V}} \left[ \Delta \varepsilon \left( \vec{x} + \frac{1}{2} \vec{\delta x} \right) + \Delta \varepsilon \left( \vec{x} - \frac{1}{2} \vec{\delta x} \right) \right] (\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j) dv$$

Αν οι δύο κατανομές υπολογίζονταν ως ενιαίο αντικείμενο

$$\delta q_{ij}^0 = V \int_{\mathcal{V}} 2 \Delta \varepsilon(\vec{x}) (\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j) dv$$

Η διαφορά των δύο σημάτων είναι

$$\delta q_{ij}' = \delta q_{ij}^1 - \delta q_{ij}^0 = V \int_{\mathcal{V}} \left[ \Delta \varepsilon \left( \vec{x} + \frac{1}{2} \vec{\delta x} \right) - 2 \Delta \varepsilon(\vec{x}) + \Delta \varepsilon \left( \vec{x} - \frac{1}{2} \vec{\delta x} \right) \right] (\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j) dv$$

Για μικρή διαταραχή πάνω σε αντικείμενο όγκου  $\mathcal{V}$  η σχέση μετατρέπεται σε :

$$\delta q_{ij}' = \frac{1}{4} V \Delta \varepsilon \int_{\mathcal{V}} \vec{\delta x} \cdot \nabla \left( \vec{\delta x} \cdot \nabla (\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j) \right) dv \quad (4.6)$$

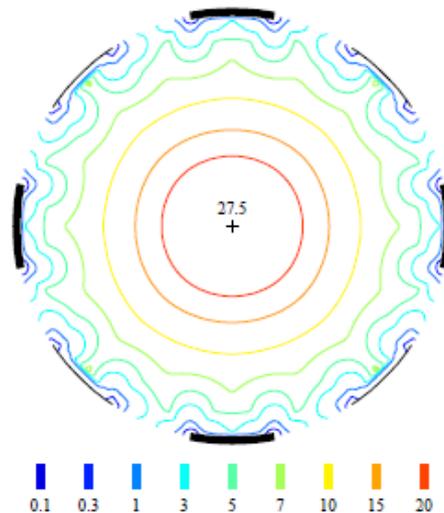
Και σύμφωνα με τη σχέση (4.2)

$$\frac{V^2 \Delta \varepsilon^2 \mathcal{V}^2}{16 N^2} \sum_i \sum_j \vec{\delta x} \cdot \nabla \left( \vec{\delta x} \cdot \nabla (\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j) \right)^2 \geq NP \quad (4.7)$$

Από τη (4.7) η βέλτιστη διαφορική ανάλυση είναι ανάλογη της έκφρασης:

$$\sqrt{\frac{4N}{\sum_i \sum_j \{div(\nabla(\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j))\}^2}} \quad (4.8)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της διαφορικής ανάλυσης στο εσωτερικό του αισθητήρα. Αντίστοιχα η ανάλυση είναι ομοιόμορφη στο κέντρο του χώρου και εξαρτάται από τη θέση σε σχέση με τα ηλεκτρόδια κοντά στο όριο.



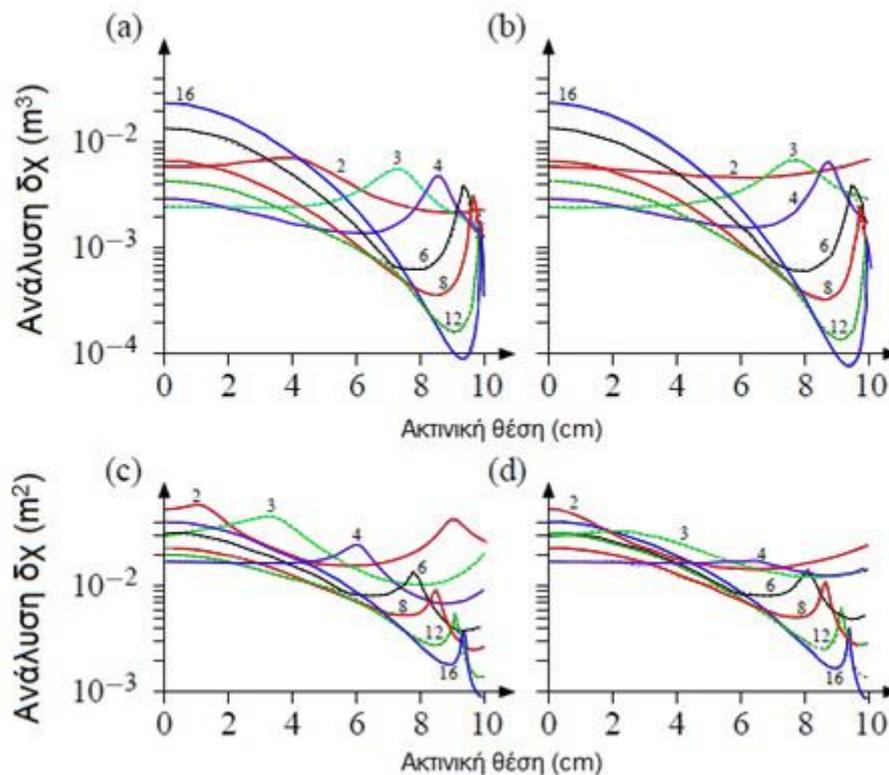
Σχήμα 4.4 Ανάλυση αισθητήρα στο εσωτερικό. Με μαύρο χρώμα στο όριο απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια. Οι τιμές αναφέρονται στη μετατόπιση  $1000 \times \delta x (m^2)$ .

Ως τώρα εξετάστηκε η ανάλυση σε σχέση με την ευαισθησία του αισθητήρα σύμφωνα με το γινόμενο  $\vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j$ . Στην παρούσα παράγραφο θα εξεταστεί η επίδραση της διαμέτρου, των ηλεκτροδίων και του κενού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια στην ανάλυση των μετρήσεων.

Σε ότι αφορά τη διάμετρο του αισθητήρα το πεδίο  $\vec{\xi}_i$  είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της ακτίνας  $R$  όπως παρουσιάζεται στη σχέση (4.5). Έτσι, και η ανάλυση είναι αντιστρόφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ακτίνας. Ως αποτέλεσμα η ανάλυση θέσης του αισθητήρα είναι ανάλογη του  $R^3$  του αισθητήρα σύμφωνα με τη σχέση (4.8) ενώ η διαφορική ανάλυση είναι ανάλογη του  $R^2$ , δηλαδή διπλασιασμός της διαμέτρου του αισθητήρα προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της μικρότερης μετρούμενης μεταβολής  $\vec{\delta x}$  οκτώ φορές και τη μικρότερη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων κατά τέσσερις φορές. Για την αντιστάθμιση της απώλειας απαιτείται αντίστοιχη αύξηση του δυναμικού  $V$  κατά οκτώ φορές.

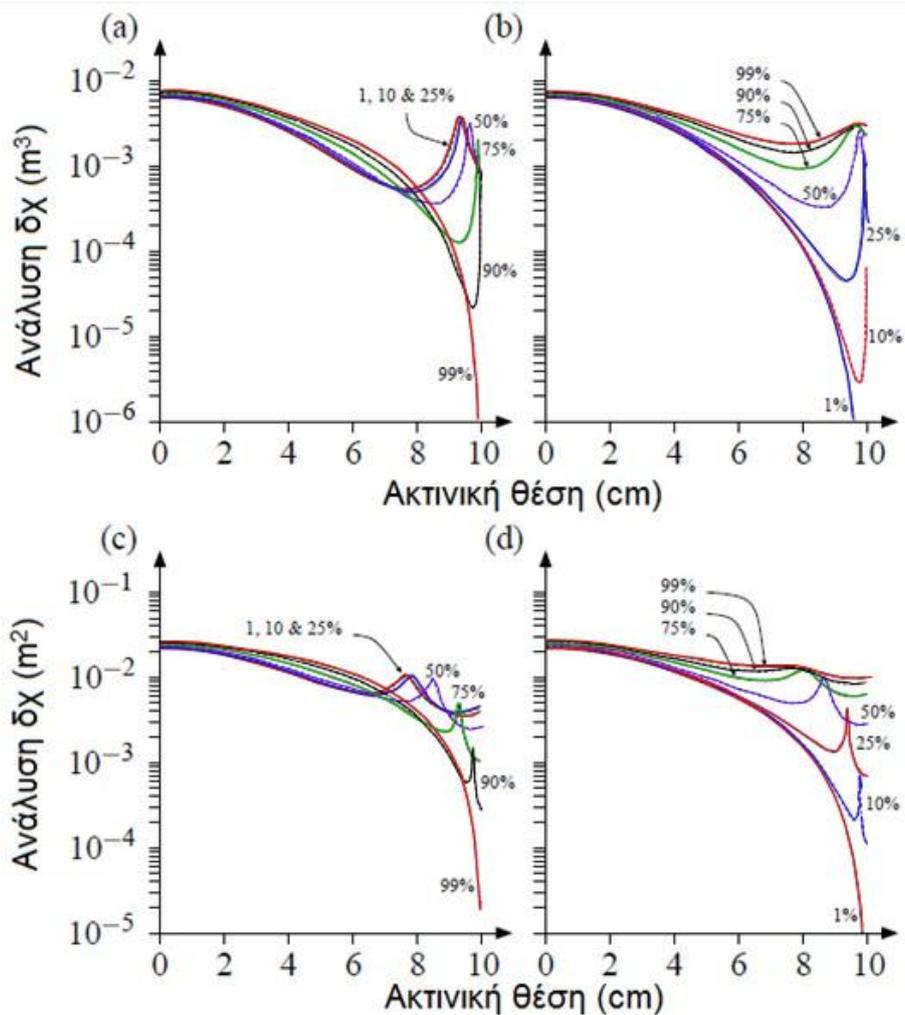
Για τον υπολογισμό του ιδανικού αριθμού των ηλεκτροδίων καθώς και της μεταξύ τους απόστασης για τη καλύτερη κατανομή της ανάλυσης το πρόβλημα είναι περισσότερο πολύπλοκο. Λόγω συμμετρίας της ανάλυσης θεωρούνται δύο επιφάνειες κάθετες πάνω στο

επίπεδο των ηλεκτροδίων η μια μεταξύ του κέντρου του δίσκου και του κέντρου ενός ηλεκτροδίου και η δεύτερη μεταξύ του κέντρου του αισθητήρα και του κέντρου του κενού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων. Στην την εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η εξάρτηση της ανάλυσης από την απόσταση από το κέντρο προς το όριο του αισθητήρα με λόγο κενού μεταξύ ηλεκτροδίων  $n = 50\%$ .



Σχήμα 4.5 Εξάρτηση ανάλυσης (a), (b) και διαφορικής (c), (d) ανάλυσης σε σχέση με τον αριθμό των ηλεκτροδίων. Ο υπολογισμός έγινε σε σύστημα αισθητήρα ακτίνας  $R = 10\text{cm}$  με  $n = 50\%$ . Τα διαγράμματα (a), (c) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα προς το κέντρο του ηλεκτροδίου στο όριο ενώ τα (b), (d) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα ως το κέντρο του κενού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων.

Παρατηρείται μικρή διαφορά στην ανάλυση για τοπολογίες πολλών ηλεκτροδίων . Για μικρό αριθμό η ανάλυση είναι καλύτερη στο κέντρο του αισθητήρα ενώ όσο αυξάνεται ο αριθμός η ανάλυση είναι καλή κοντά στο όριο των ηλεκτροδίων και μειώνεται προς το κέντρο. Στην παρακάτω προσομοίωση εξετάζεται η εξάρτηση της ανάλυσης με το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4.6 Εξάρτηση ανάλυσης (a), (b) και διαφορικής (c), (d) ανάλυσης σε σχέση με το λόγο του κενού  $n$ . Ο υπολογισμός έγινε σε σύστημα αισθητήρα ακτίνας  $R = 10\text{cm}$  με  $n = 50\%$ . Τα διαγράμματα (α), (c) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα προς το κέντρο του ηλεκτροδίου στο όριο ενώ τα (b), (d) αναφέρονται στη τομή από το κέντρο του αισθητήρα ως το κέντρο του κενού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων.

Παρατηρείται από τα αποτελέσματα πως η επίδραση του κενού είναι μικρή στο κέντρο και μεγαλώνει κοντά στο όριο. Ελαχιστοποίηση του κενού επιφέρει καλή ανάλυση στο όριο στις περιοχές των ηλεκτροδίων και μεγιστοποίηση του κενού επιφέρει καλή ανάλυση στο κέντρο της απόστασης δύο γειτονικών ηλεκτροδίων.

#### 4.4 Επιλογή και υπολογισμός ηλεκτροδίων

Ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της ευαισθησίας του ηλεκτρικού πεδίου στην ακτινική και αξονική διάταξη ώστε να μπορεί να λειτουργήσει είτε ως δισδιάστατος είτε ως τρισδιάστατος μεταβάλλοντας ανάλογα τον τρόπο διεξαγωγής των μετρήσεων και του συσχετισμού των χωρητικότητων. Για την επίτευξη και των δύο λειτουργιών χρησιμοποιήθηκε η τροπολογία τριών επιπέδων ηλεκτροδίων τετράγωνου σχήματος. Το σχήμα των ηλεκτροδίων αποφασίστηκε να είναι τετράγωνο, για λόγους απλότητας κατασκευής και συμμετρίας του συστήματος. Λόγω πρακτικών περιορισμών του συστήματος μέτρησης,

κάθε επίπεδο περιλαμβάνει οκτώ ηλεκτρόδια διατεταγμένα το ένα δίπλα στο άλλο έχοντας ένα μικρό κενό μεταξύ τους.

Η κατασκευή αποτελείται από μια σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 100mm και εσωτερικής 97mm από διάφανο *Plexiglas*. Το μήκος του σωλήνα επιλέχτηκε στο  $h = 1\text{m}$  ώστε να είναι πρακτικά άπειρο στην αξονική συνιστώσα για τις ανάγκες της εφαρμογής. Στην εξωτερική επιφάνεια του *Plexiglas* τοποθετήθηκαν τετράγωνα ηλεκτρόδια σε τρία επίπεδα, καθένα από τα οποία αποτελείται από οκτώ ξεχωριστά ηλεκτρόδια. Το μήκος της πλευράς του καθενός υπολογίζεται από το γεωμετρικό τύπο για το μήκος τόξου:

$$l = \frac{2\pi r_{ext}(\mu - \varphi)}{360} \quad (4.9)$$

όπου  $r_{ext}$  η εξωτερική ακτίνα του σωλήνα

$\mu = \frac{360}{M}$  η γωνία του τόξου εκφρασμένη σε μοίρες.  $M$  είναι ο αριθμός των ηλεκτροδίων.

$\varphi$  γωνία που αφαιρείται από τη γωνία του τόξου ώστε να υπάρχει ένα κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων στο επίπεδο.

Η επιλογή της γωνίας  $\varphi$  εισάγεται για να δημιουργήσει ένα κενό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων στο επίπεδο. Καθώς η ακτίνα του δακτυλίου και ο αριθμός των ηλεκτροδίων είναι καθορισμένος, το μόνο που απαιτείται είναι ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος των μετρήσεων. Το κενό μεταξύ των επιπέδων καθώς και το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων στο ίδιο επίπεδο είναι μια παράμετρος που θα εξεταστεί βάσει προσομοιώσεων στη συνέχεια. Και βάσει της οποίας θα δοθεί μια τιμή για τη γωνία  $\varphi$ . Ο λόγος που χρειάζεται το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι για τη μείωση του θορύβου και τη βελτίωση του δείκτη SNR των μετρήσεων καθώς η ένταση του πεδίου παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή στα άκρα των ηλεκτροδίων.

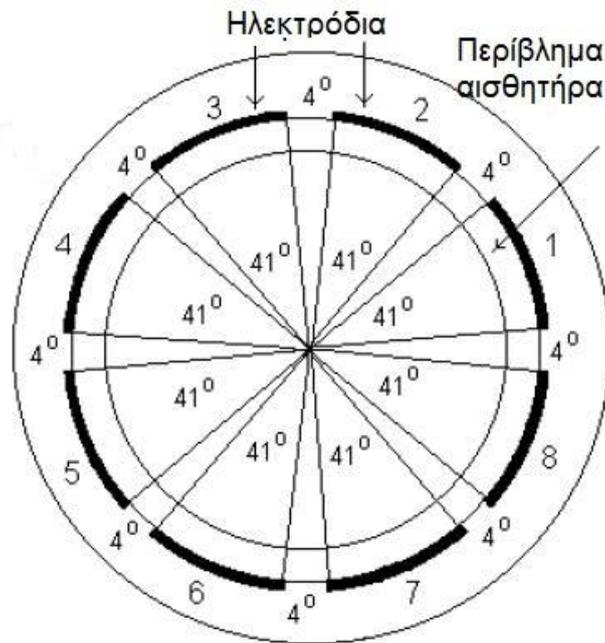
Για σωλήνα ακτίνας  $r_{ext} = 5\text{ cm}$  σε επίπεδο με  $M = 8$  ηλεκτρόδια και γωνία  $\varphi = 4^\circ$  το μήκος της πλευράς είναι

$$l = \frac{2\pi r_{ext}(\mu - \varphi)}{360} = 3,58\text{cm}$$

Αντίστοιχα ο λόγος του κενού μεταξύ των ηλεκτροδίων υπολογίζεται ως:

$$n = \frac{4}{41} \times 100 = 10.25\%$$

Το τόξο που διαγράφει το κάθε ηλεκτρόδιο έχει γωνία  $41^\circ$  ενώ το κενό  $4^\circ$ . Η τομή του ενός επιπέδου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.7 Κάτοψη δισδιάστατου αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας. Με σκούρο μαύρο χρώμα απεικονίζονται τα ηλεκτρόδια στο εξωτερικό περίβλημα του αισθητήρα.

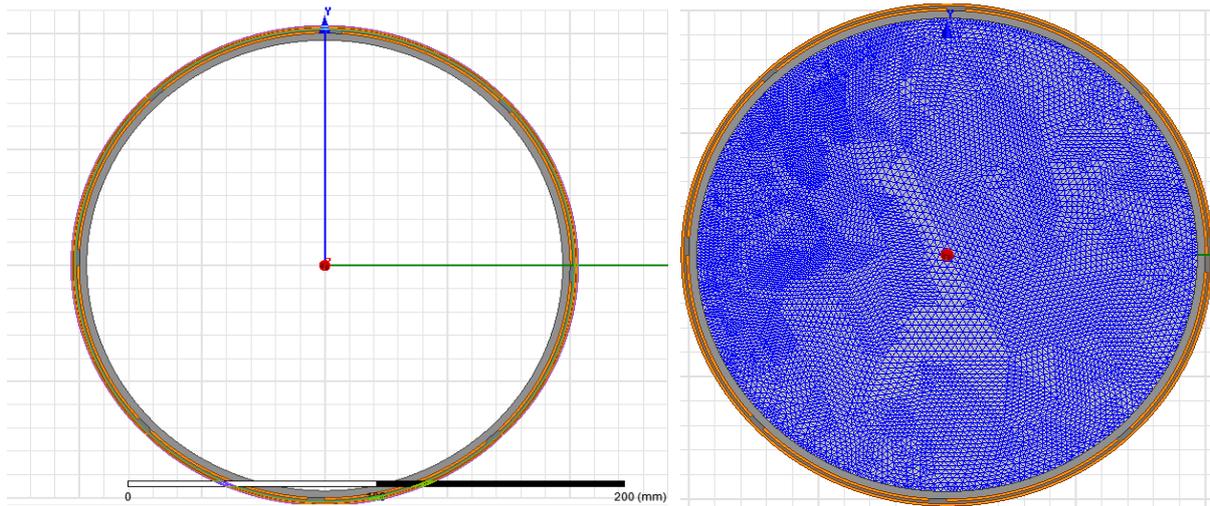
## 4.5 Προσομοιώσεις

Για να μπορεί να υπολογιστεί η ευαισθησία του αισθητήρα είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί ένα μοντέλο του συστήματος στον υπολογιστή. Η διαδικασία υπολογισμού εκτελείται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στην παρούσα παράγραφο κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα για τον αισθητήρα, ένα για δισδιάστατη απεικόνιση και ένα για τρισδιάστατη απεικόνιση.

### 4.5.1 Δισδιάστατο μοντέλο

#### 4.5.1.1 Μοντέλο προσομοίωσης

Για την προσομοίωση του αισθητήρα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός του χώρου σε διακριτό πλέγμα, στο οποίο κάθε στοιχείο θα έχει κοινές ιδιότητες. Όσο μικρότερη η διαμέριση τόσο ακριβέστερο το αποτέλεσμα. Η διαμέριση επετεύχθη χωρίζοντας το χώρο σε τρίγωνα με μέγιστο εμβαδό  $3.2\text{mm}^2$ . Το πρόγραμμα που αναλαμβάνει την προσομοίωση αναγνωρίζει τις διαχωριστικές επιφάνειες καθώς και τα ανώμαλα σημεία και διαμορφώνει κατάλληλα το μέγεθος και το σχήμα του πλέγματος ώστε να έχει τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διαμέριση που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις:

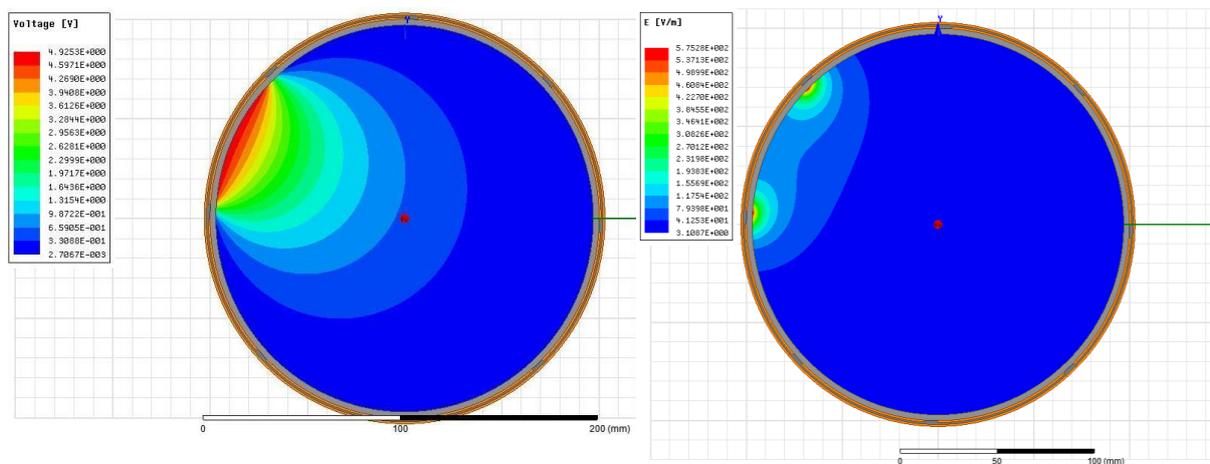


Σχήμα 4.8 Μοντέλο διαδιάστατου αισθητήρα (αριστερά) και διαμέριση εσωτερικού χώρου (δεξιά). Για τη κατασκευή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS MAXWELL

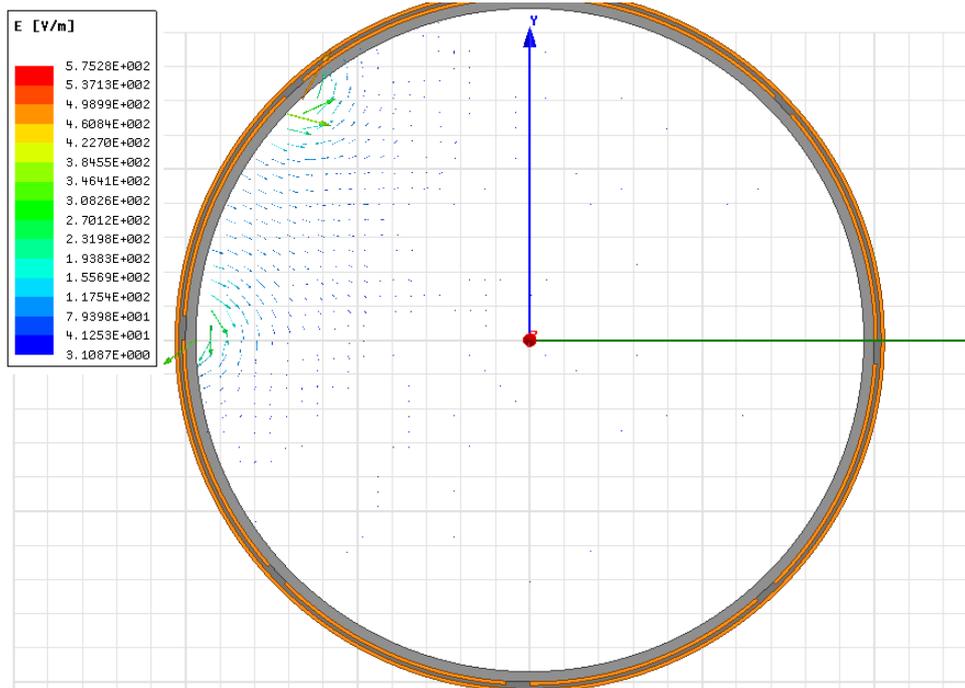
Για να ολοκληρωθεί σωστά η προσομοίωση χρειάζεται να δοθεί στο πρόγραμμα η μέθοδος επίλυσης. Στην περίπτωση του προς κατασκευή αισθητήρα χρειάζεται να γίνει υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και του δυναμικού στο εσωτερικό της επιφάνειας. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται η ηλεκτροστατική μέθοδος που κάνει χρήση των εξισώσεων του *Maxwell*. Πιο συγκεκριμένα, η προσομοίωση αφού διαμερίσει το χώρο, επιλύει αριθμητικά την εξίσωση

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \Phi(x, y)) = -\rho \quad (4.10)$$

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων δόθηκε δυναμικό διέγερσης  $V_s = 5 \text{ Volt}$  σε ένα ηλεκτρόδιο με τα υπόλοιπα γειωμένα και εξετάστηκε η συμπεριφορά του πεδίου. Η κατανομή του δυναμικού και της έντασης του πεδίου στο εσωτερικό της επιφάνειας παρουσιάζονται στη συνέχεια όπως αποτυπώθηκαν από τις προσομοιώσεις:



Σχήμα 4.9 Κατανομή δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο του αισθητήρα με το ένα ηλεκτρόδιο σε δυναμικό  $V = 5 \text{ Volts}$  με τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια γειωμένα.

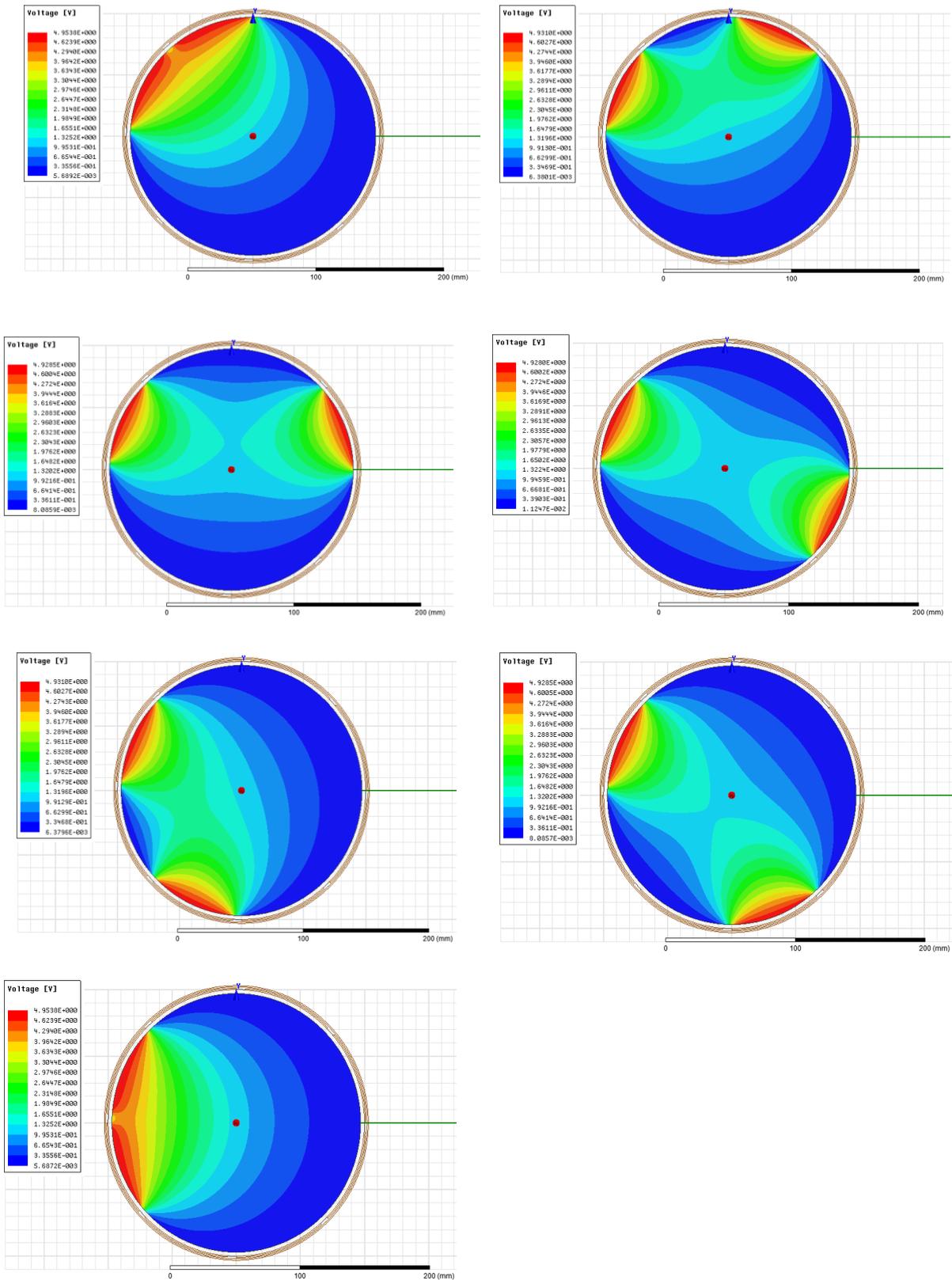


**Σχήμα 4.10** Διάγραμμα έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Η ένταση παρουσιάζει μέγιστες τιμές κοντά στα άκρα του ηλεκτροδίου Τα διανύσματα είναι εφαπτομενικά στις δυναμικές γραμμές.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρατηρείται πως η επίδραση του πεδίου στο κάθε ηλεκτρόδιο παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή στα άκρα. Το φαινόμενο αυτό είναι διακρίνεται πολύ έντονα στην εικόνα που παρουσιάζει το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα άκρα του διεγερμένου ηλεκτροδίου είναι κοντά με το διπλανό γειωμένο το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη διαφορά δυναμικού στη τοπική περιοχή. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι που αυξάνει την ένταση του πεδίου και καθιστά απαραίτητο στη σχεδίαση να υπάρχει ένα κενό διάστημα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Έτσι, μικρό κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων επιτρέπει μεγαλύτερη επιφάνεια σάρωσης και άρα καλύτερη ανάλυση των μετρήσεων, ωστόσο προκαλεί αυξημένο θόρυβο λόγω αυτού του φαινομένου. Στην περίπτωση της σχεδίασης του συγκεκριμένου αισθητήρα παρατηρείται πως αυτές οι περιοχές υψηλής έντασης είναι αρκετά μικρές και το φαινόμενο περιορίζεται αρκετά.

#### 4.5.1.2 Ευαισθησία αισθητήρα

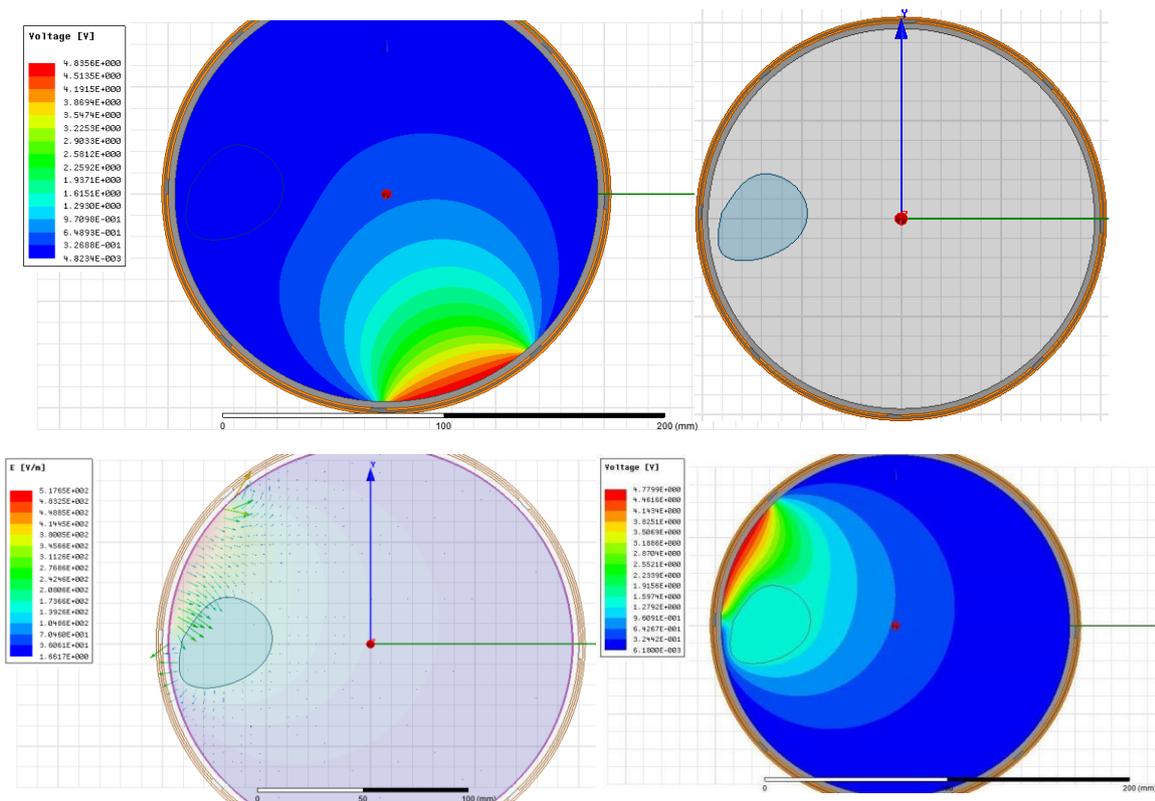
Ο βασικότερος λόγος που είναι απαραίτητο να εκτελεστούν οι προσομοιώσεις είναι η κατασκευή του πίνακα ευαισθησίας. Σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά στο τρόπο υπολογισμού του για τις ανάγκες της απεικόνισης στη κατασκευή της εικόνας. Σε φυσικό επίπεδο εκφράζει το πόσο επηρεάζει κάθε ηλεκτρόδια ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου εσωτερικά. Κάθε σημείο του χώρου προσδιορίζεται στο πίνακα από  $\frac{N(N-1)}{2}$  σημεία, για όλα τα πιθανά ζεύγη μετρούμενων ηλεκτροδίων. Η προσομοίωση του για κάθε ζεύγος παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες:



Σχήμα 4.11 Κατανομή ευαισθησίας στο επίπεδο της τομής για τα διάφορα ζεύγη ηλεκτροδίων.

#### 4.5.1.3 Προσομοιώσεις

Τέλος εκτελέστηκε μια προσομοίωση για να μελετηθεί η κατανομή του πεδίου αν στο εσωτερικό υπάρχει μη ομοιόμορφη κατανομή της επιτρεπτότητας. Στην προσομοίωση ο χώρος θεωρείται πως είναι γεμάτος με υλικό υψηλής επιτρεπτότητας (νερό) ενώ σε τυχαίο σημείο υπάρχει κοιλότητα υλικού χαμηλής επιτρεπτότητας (πετρέλαιο). Από τις κατανομές που υπολογίζονται παρατηρείται πως το νερό λόγω της υψηλής αγωγιμότητας διατηρεί σχεδόν σταθερό δυναμικό σε όλη την επιφάνεια αλλοιώνοντας τη κατανομή του δυναμικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αντίστοιχη μεταβολή και στο ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο, καθώς μέσα στο νερό η διαφορά δυναμικού είναι πολύ μικρή και το πεδίο ιδιαίτερα ασθενές. Ως επακόλουθο επηρεάζεται το επαγόμενο φορτίο των γειτονικών ηλεκτροδίων και η μετρούμενη χωρητικότητα των ζευγών ηλεκτροδίων. Αντίστοιχα εξετάζεται η κατανομή του δυναμικού και για ηλεκτρόδιο που βρίσκεται μακριά από το χώρο της κατανομής. Εκεί παρατηρείται πως επηρεάζεται μια μικρή μόνο περιοχή με πολύ ασθενή τιμή δυναμικού η οποία βρίσκεται κοντά στο κέντρο του αισθητήρα, ενώ η περιοχή που βρίσκεται το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας δεν ξεχωρίζει σε σχέση με τον υπόλοιπο χώρο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατανομή των δύο υλικών στο χώρο.



Σχήμα 4.12 Κατανομή δυναμικού και ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο σε μη ομοιόμορφη κατανομή. Στις εικόνες (α) και (δ) παρουσιάζεται η κατανομή δυναμικού ενώ στην εικόνα (γ) η κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

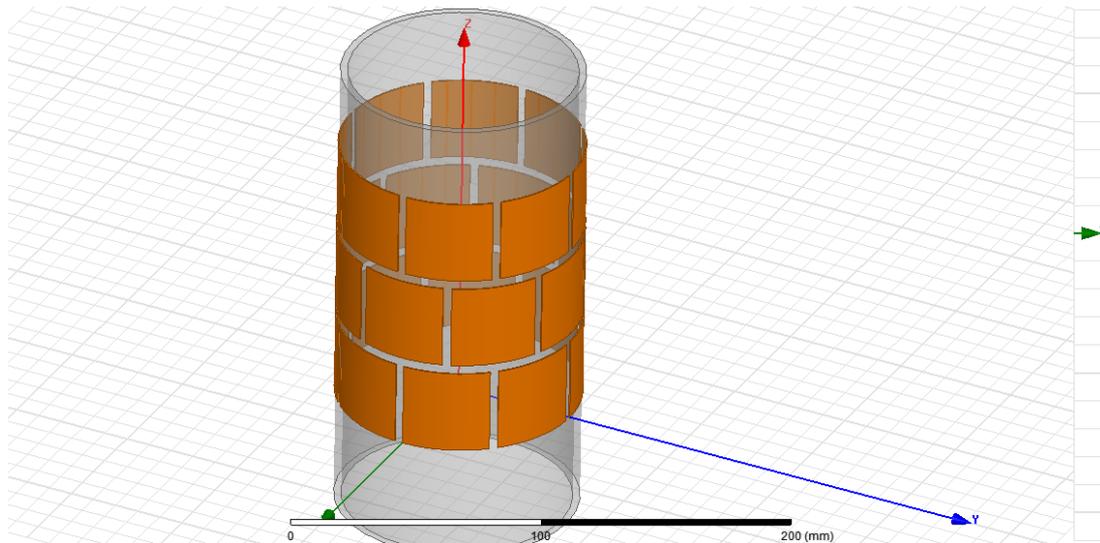
## 4.5.2 Τρισδιάστατο μοντέλο

### 4.5.2.1 Κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου

Για τη κατασκευή της τρισδιάστατης απεικόνισης χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά επίπεδα των 8 ηλεκτροδίων. Για να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή του πεδίου, να αυξηθεί η ανάλυση στην αξονική διεύθυνση και να διπλασιαστεί η ανάλυση στην ακτινική διεύθυνση, τα επίπεδα των ηλεκτροδίων τοποθετούνται διατεταγμένα το ένα κάτω από το άλλο έχοντας μια διαφορά στην αρχική γωνία κατά  $22,5^\circ$ . Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η επικάλυψη των σημείων που είναι στα όρια των ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα τη καλύτερη κατανομή του πεδίου και τη μεγαλύτερη ευαισθησία του αισθητήρα. Τέλος, επιλέχθηκε ένα μικρό κενό μεταξύ των πλακών των ηλεκτροδίων ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές και να αυξηθεί ο δείκτης σήματος προς θόρυβο (SNR) των μετρήσεων.

Η βασική διαφορά της τρισδιάστατης μέτρησης είναι πως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων διαφορετικών επιπέδων. Έτσι, στη διαδικασία των μετρήσεων υπολογίζονται όλες οι χωρητικότητες μεταξύ όλων των ηλεκτροδίων είτε βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο είτε σε διαφορετικά. Σε αυτή την περίπτωση κατασκευάζεται μεγαλύτερος πίνακας ευαισθησίας που περιλαμβάνει όλα τα πιθανά ζεύγη μετρήσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σε έναν τρισδιάστατο αισθητήρα τριών επιπέδων με 8 ηλεκτρόδια ανά επίπεδο να χρειάζονται  $\frac{M(M-1)}{2} = \frac{24(23-1)}{2} = 276$  ανεξάρτητες μετρήσεις για την ανακατασκευή της εικόνας.

Η κατασκευή των υπολοίπων επιπέδων γίνεται με τον ίδιο τρόπο ωστόσο υπάρχουν δυο συγκεκριμένα σημεία προσοχής. Αρχικά, το κάθε επίπεδο με το προηγούμενο είναι μετατοπισμένο κατά τη μισή γωνία του τόξου που επιλέχτηκε για το σχεδιασμό του ηλεκτροδίου δηλαδή  $22,5^\circ$ , ώστε να είναι περισσότερο ομοιογενές το πεδίο αξονικά και να έχει ο αισθητήρας μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση. Επιπλέον, το κάθε επίπεδο από τα υπόλοιπα έχει ένα κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων ίσο με το κενό μεταξύ των ηλεκτροδίων στο ίδιο επίπεδο. Η επιλογή αυτή γίνεται για μεγαλύτερη ομοιογένεια στη μέτρηση των χωρητικότητων μεταξύ διαφορετικών επιπέδων. Το τρισδιάστατο μοντέλο του αισθητήρα που κατασκευάστηκε για τις προσομοιώσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

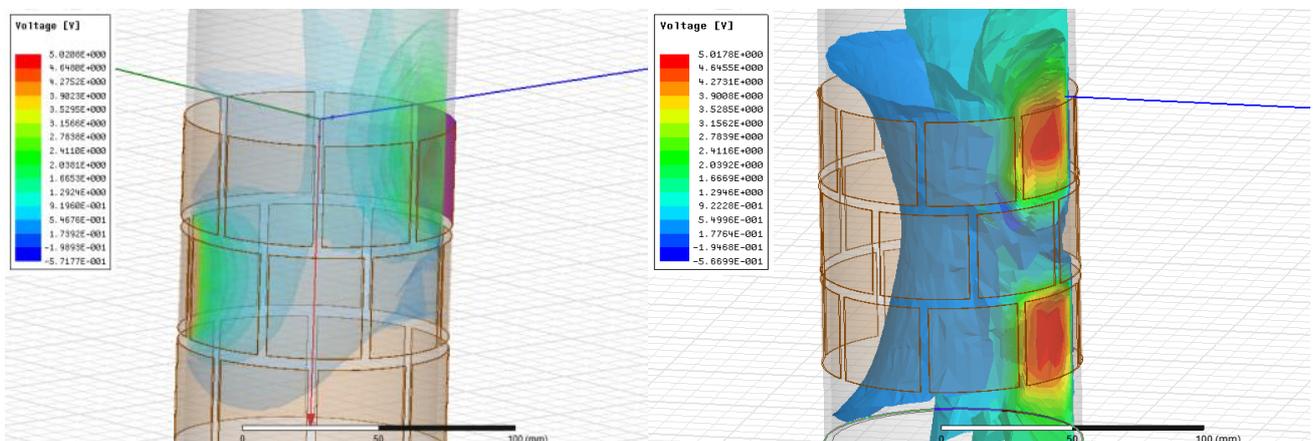


Σχήμα 4.13 Τρισδιάστατο μοντέλο αισθητήρα. Η κατασκευή έγινε με τη χρήση του ANSYS MAXWELL.

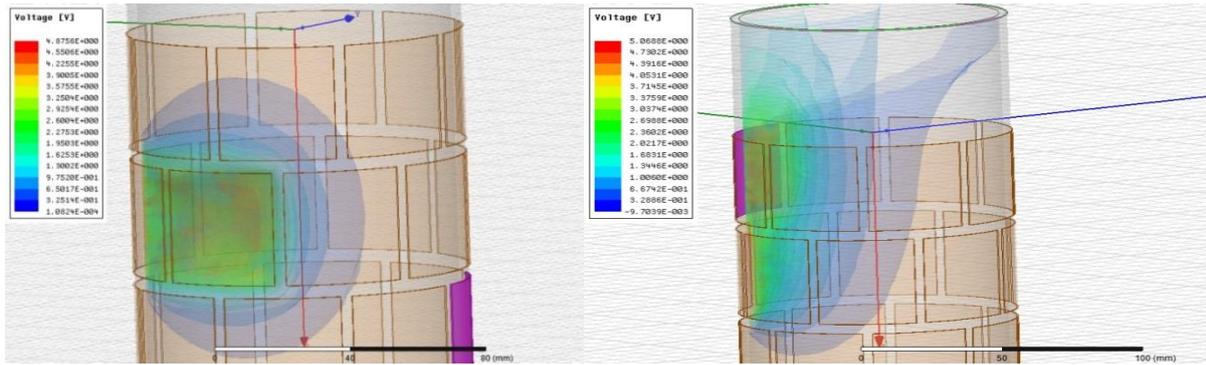
Η κατασκευή του είναι ίδια με του δισδιάστατου, εκτός από το γεγονός πως υπάρχουν τρία διαφορετικά επίπεδα ηλεκτροδίων διατεταγμένα στο χώρο με γωνία  $22,5^\circ$  μεταξύ τους ανά επίπεδο για καλύτερη ακρίβεια όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω κεφάλαιο.

#### 4.5.2.2 Ευαισθησία αισθητήρα και προσομοιώσεις

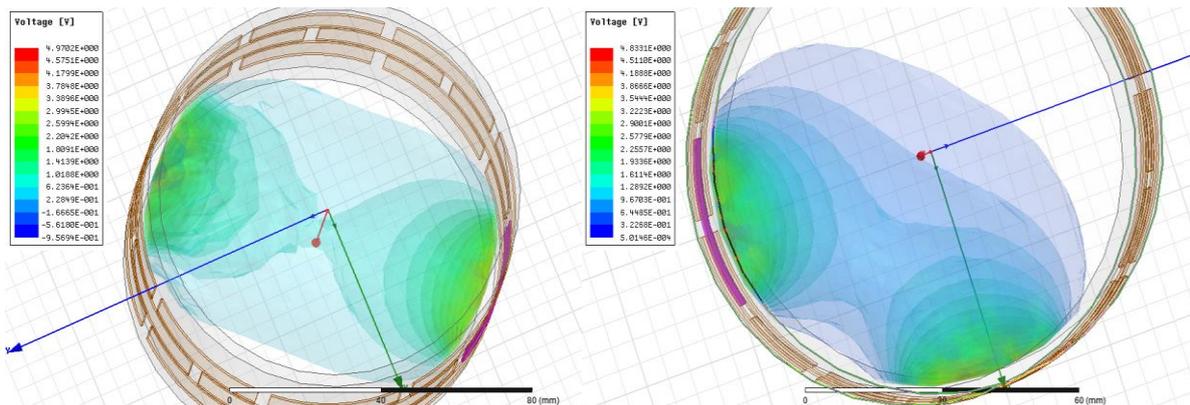
Για την απεικόνιση της ευαισθησίας θα εκτελεστούν ορισμένες προσομοιώσεις. Επειδή ο αριθμός των συνολικών ζευγαριών ηλεκτροδίων ανέρχεται σε 276 και η διάταξη έχει κυλινδρική συμμετρία θα γίνει απεικόνιση μόνο ορισμένων χαρακτηριστικών ζευγαριών.



Σχήμα 4.14 Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ ηλεκτροδίων διαφορετικών επιπέδων.



Σχήμα 4.15 Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο χώρο που παράγεται από ένα ηλεκτρόδιο.



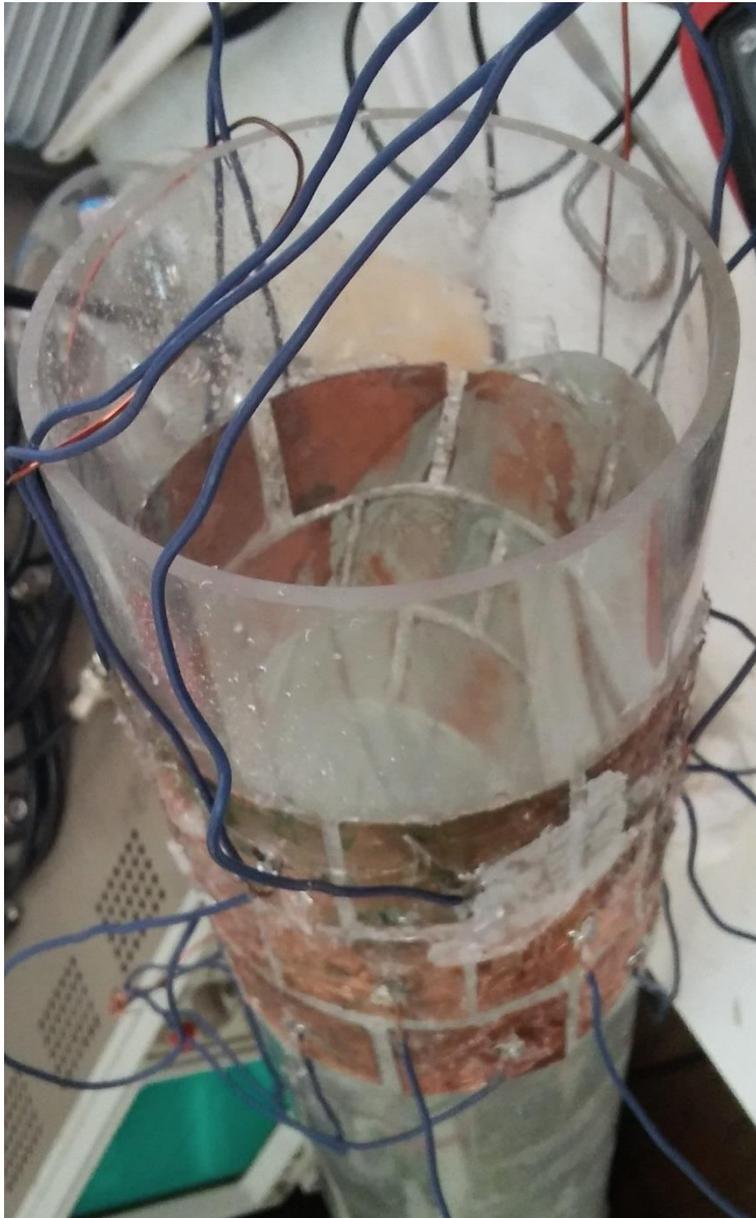
Σχήμα 4.16 κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων στο ίδιο επίπεδο.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων γίνεται αντιληπτό πως η ευαισθησία του αισθητήρα μειώνεται ακτινικά προς το κέντρο του όπως παρουσιάζεται κυρίως στο σχήμα 4.16. Η μετατόπιση που υπάρχει στη γωνία μεταξύ των επιπέδων βοηθά στη καλύτερη κατανομή καθώς το δυναμικό γύρω από το κάθε ηλεκτρόδιο κατανέμεται σφαιρικά, με αποτέλεσμα το κενό που δημιουργείται μεταξύ ηλεκτροδίων του ίδιου επιπέδου καλύπτεται από τα ηλεκτρόδια των γειτονικών επιπέδων. Μια επιπλέον παρατήρηση δείχνει πως το δυναμικό στα ακραία επίπεδα εκτείνεται και στο χώρο εκτός του αισθητήρα. Για να περιοριστεί το πεδίο εντός του χώρου ευθύνης είναι δυνατόν να προστεθούν δύο γειωμένοι δακτύλιοι χαλκού ως ακραία επίπεδα διαμορφώνοντας το ηλεκτρικό πεδίο. Κατ' αυτό τον τρόπο θα περιορίζονται οι μετρήσεις στο χώρο του αισθητήρα και θα εξαλειφθούν οι πιθανές παρεμβολές με άλλα συστήματα στο χώρο.

### 4.5.3 Πειραματική διάταξη

Η διάταξη που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του πειράματος παρουσιάζεται αποτελείται από τετράγωνα φύλλα χαλκού τοποθετημένα περιμετρικά του διάφανου σωλήνα από Plexiglas. Η στήριξη των ηλεκτροδίων έγινε με ακρυλική κόλλα. Σε κάθε ηλεκτρόδιο έγινε κόλληση ενός καλωδίου για τη λήψη των μετρήσεων. Εξωτερικά στη διάταξη τοποθετήθηκε στρώμα σιλικόνης για να αποφευχθούν πιθανά βραχυκυκλώματα μεταξύ των γειτονικών

ηλεκτροδίων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε.



Σχήμα 4.17 Διάταξη αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας

Από την παραπάνω εικόνα για τις ανάγκες των μετρήσεων, τα ηλεκτρόδια που βρίσκονται στα ακραία επίπεδα είναι γειωμένα σε κοινό κόμβο. Ακόμα, παρατηρείται η εξωτερική μόνωση με στρώμα σιλικόνης για καλύτερη μόνωση και την αποφυγή επαφής του χαλκού με υγρά υλικά.



Σχήμα 4.18 Εσωτερικό διάταξης

## 5 Σχεδίαση συστήματος μέτρησης

### 5.1 Εισαγωγή

Για την αποτελεσματική απεικόνιση, εκτός από τη σωστή σχεδίαση του αισθητήρα, απαιτείται και λεπτομερής μέτρηση των χωρητικότητων. Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων είναι μια διαδικασία επίπονη καθώς απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια λόγω πολύ ασθενών σημάτων. Περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης τα χαρακτηριστικά του οποίου εξαρτώνται από την εφαρμογή και αναλόγως επηρεάζουν το είδος και την ακρίβεια της κάθε μέτρησης. Αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα καθένα από τα οποία παραμετροποιείται με διαφορετικά χαρακτηριστικά για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

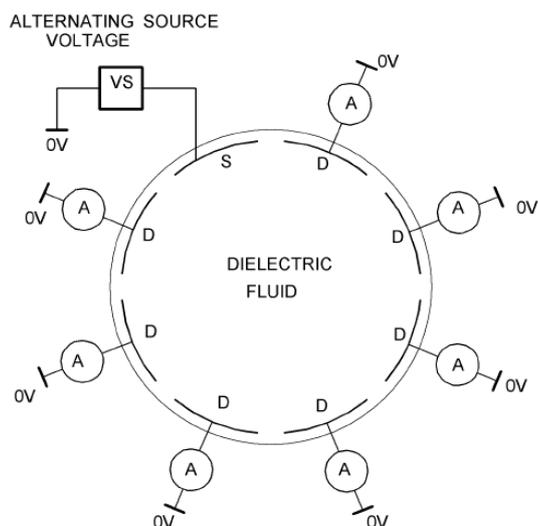
- Σύστημα διακοπών που αναλαμβάνει τον έλεγχο των μετρήσεων
- Γεννήτρια σημάτων και εξωτερική τροφοδοσία
- Μετρητικό σύστημα
- Σύστημα μετατροπής αναλογικό σε ψηφιακό (A/D) για επεξεργασία από υπολογιστή.
- Υπολογιστής που παρέχει χρονισμό στα διακοπτικά κυκλώματα, αναλαμβάνει την αποθήκευση δεδομένων και τον αλγόριθμο ανακατασκευής της εικόνας

### 5.2 Πρότυπα μετρήσεων χωρητικότητας

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της ανακατασκευασμένης εικόνας είναι ο αριθμός των μετρήσεων. Στη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι συνδυασμού των ζευγών ηλεκτροδίων που μετρώνται και ονομάζονται πρότυπα. Με την εξέλιξη της μεθόδου έχουν προταθεί πολλά διαφορετικά πρότυπα μέτρησης της χωρητικότητας μεταξύ πολλών διαφορετικών ζευγών ηλεκτροδίων [59]. Σε κυλινδρικά δοχεία η συνήθης πρακτική είναι η μέτρηση γειτονικών ζευγών ηλεκτροδίων. Η σειρά μέτρησης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Στη συγκεκριμένη μέθοδο εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα σε ένα ηλεκτρόδιο που χαρακτηρίζεται πηγή. Τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια παραμένουν σε μηδενικό δυναμικό και χαρακτηρίζονται ως δέκτες. Με αυτό το τρόπο μετριέται η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρονικών. Στη συνέχεια επιλέγεται το επόμενο ηλεκτρόδιο δέκτης, γειτονικά το προηγούμενου και ακολουθεί η ίδια διαδικασία. Μόλις ολοκληρωθεί η μέτρηση όλων των πιθανών συνδυασμών μεταξύ του ηλεκτροδίου πηγής και των δεκτών επιλέγεται ως πηγή το δεύτερο ηλεκτρόδιο του επιπέδου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Επειδή  $C_{ij} = C_{ji}$  ο αριθμός των μετρήσεων είναι ίσος με:

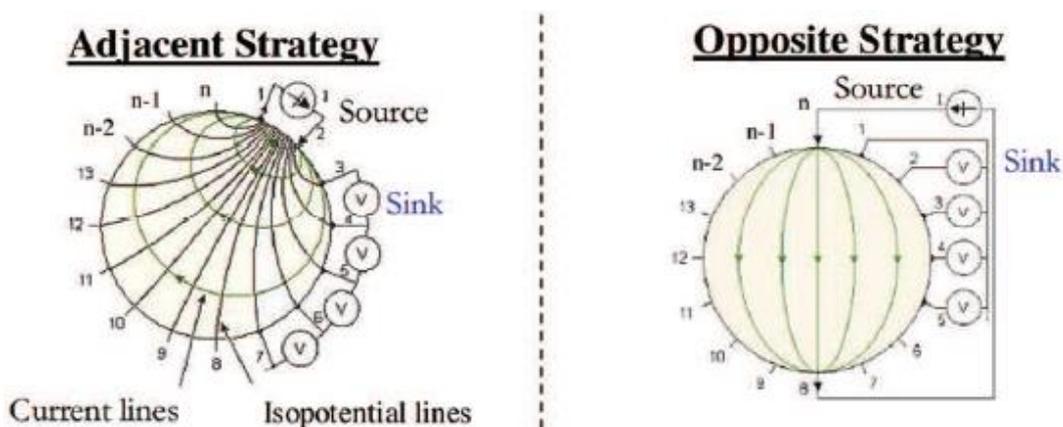
$$M = \frac{N(N-1)}{2} \quad (5.1)$$

Όπου N: ο αριθμός των ηλεκτροδίων



Σχήμα 5.1 Απεικόνιση μεθόδου μέτρησης ηλεκτρικής τομογραφίας. Με  $S$  χαρακτηρίζεται το ηλεκτρόδιο πηγής και με  $D$  το ηλεκτρόδιο δέκτης το οποίο και μετράται

Άλλα πιθανά πρότυπα περιλαμβάνουν την ομαδοποίηση των ηλεκτροδίων και τη μέτρηση ορισμένων ζευγών ανά ομάδα. Μια άλλη ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδος είναι η μέτρηση των ζευγών των απέναντι ηλεκτροδίων τα οποία διαρρέονται από ρεύμα. Στη συνέχεια μετριέται η τάση σε όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια εκτός από το παραπάνω ζεύγος. Μόλις ολοκληρωθεί ένας κύκλος μετρήσεων η διαδικασία συνεχίζει με το γειτονικό ζεύγος. Η παραπάνω μέθοδος δίνει ανακατασκευασμένη εικόνα μικρότερης ανάλυσης σε σχέση με την πρώτη μέθοδο μέτρησης γειτονικών ηλεκτροδίων καθώς ο αριθμός των μετρήσεων είναι μικρότερος. Ωστόσο επιτρέπει μετρήσεις καλύτερης ποιότητας λόγω του γεγονότος πως το ρεύμα είναι ομοιόμορφα κατανομημένο και λιγότερο ευαίσθητο σε θόρυβο.



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση των δύο μεθόδων διεξαγωγής των μετρήσεων. Με τις γραμμές στο εσωτερικό απεικονίζεται το ρεύμα μεταξύ των μετρούμενων ζευγών.

Γενικά, τα διάφορα πρότυπα μέτρησης των ηλεκτροδίων που ομαδοποιούν τις περιοχές των ηλεκτροδίων δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης περισσότερων ανεξάρτητων

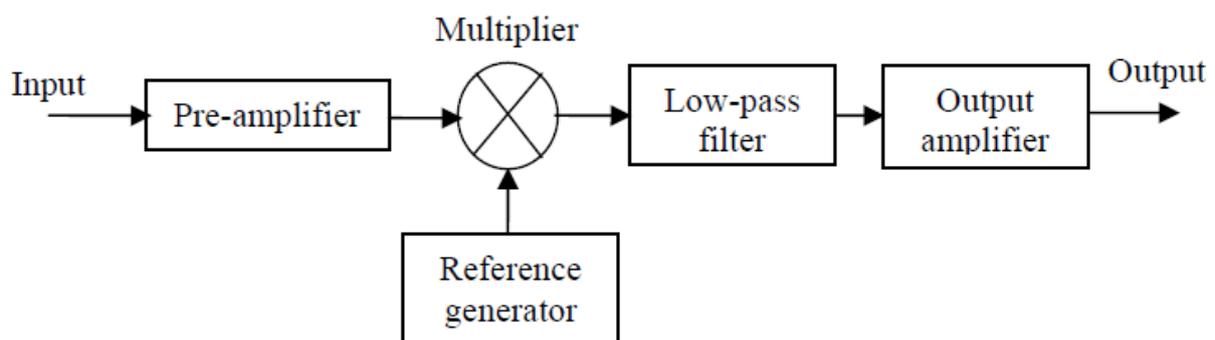
μετρήσεων. Ως εκ τούτου, η εικόνα που ανακατασκευάζεται στη συνέχεια έχει υψηλότερο ρυθμό ανανέωσης (*fps*). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως όσο αυξάνεται το μέγεθος των ομάδων τόσο μειώνεται ο αριθμός των ανεξάρτητων μετρήσεων με αντίστοιχη μείωση της ανάλυσης της εικόνας.

### 5.3 Σχεδίαση μετρητικού συστήματος

Από σχεδιαστικής σκοπιάς μπορεί να είναι απαιτητική η κατασκευή του αισθητήρα και η επίλυση του ανάστροφου προβλήματος για την κατασκευή της εικόνας, εξίσου σημαντική είναι και η διαδικασία μέτρησης των χωρητικότητων. Για οποιαδήποτε πρακτική γεωμετρία, μήκος ηλεκτροδίων και διάμετρο μερικά εκατοστά, η χωρητικότητες και οι μεταβολές τους είναι στη κλίμακα των pF.

Αρκετές μέθοδοι μέτρησης χωρητικότητας έχουν προταθεί και εφαρμοστεί στην ηλεκτρική τομογραφία και αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, με τις κυριότερες να είναι η μέθοδος μεταφοράς φορτίου και η μέθοδος μέτρησης εναλλασσόμενου ρεύματος. Η μέθοδος εναλλασσόμενου ρεύματος (*AC-based*) λόγω της καλύτερης ακρίβειας μέτρησης και της μικρότερης ευαισθησίας σε μεταβολές είναι καλύτερη, παρόλο που απαιτεί σχεδιασμό κυκλωμάτων μεγαλύτερης πολυπλοκότητας [45]. Για τις ανάγκες της εργασίας που ζητούμενο είναι η καλή ακρίβεια των μετρήσεων επιλέχθηκε η παραπάνω μέθοδος.

Η μέθοδος εναλλασσόμενου ρεύματος λειτουργεί εφαρμόζοντας ένα ημιτονοειδές σήμα στον ένα πόλο του μετρούμενου πυκνωτή και υπολογίζει τη χωρητικότητα μέσω της τάσης εξόδου του συστήματος που είναι ανάλογη της μετρούμενης χωρητικότητας [60]. Το μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου μετρητικού κυκλώματος είναι το ακόλουθο [61]:



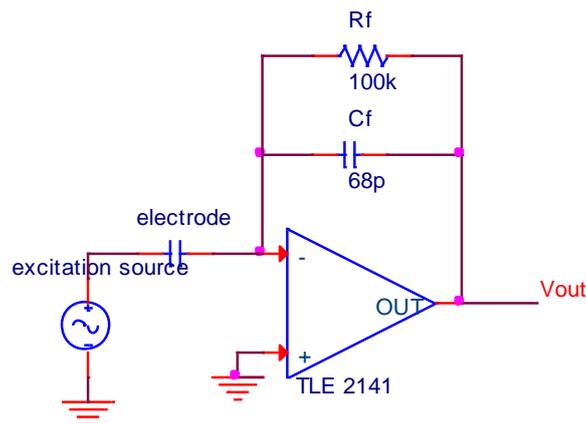
Σχήμα 5.3 Μπλοκ διάγραμμα *AC-based* συστήματος μέτρησης χωρητικότητας

Το παραπάνω σχεδιάγραμμα αναφέρεται και ως ενισχυτής *lock-in*. Ο ενισχυτής *lock-in* αποτελεί μια τυπική διάταξη η οποία είναι κατάλληλη για τον εντοπισμό και ενίσχυση ασθενών σημάτων σε περιβάλλον εξαιρετικά επιβαρυνμένο με θόρυβο. Η λειτουργία του βασίζεται στην επιλεκτική ενίσχυση και το πέρασμα του σήματος από βαθυτερατό φίλτρο. Με τον ενισχυτή *lock-in* περιορίζεται δραστικά κάθε θόρυβος από το περιβάλλον με συχνότητες εκτός της ζώνης ενίσχυσης του συντονισμένου ενισχυτή (λευκός θόρυβος, θόρυβοι

περιβάλλοντος, ολίσθηση). Η λειτουργία του βασίζεται στην ενίσχυση του σήματος εισόδου γύρω από τη συχνότητα του σήματος της γεννήτριας αναφοράς, απορρίπτοντας τις υπόλοιπες ως θόρυβο. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές σε συνδυασμό με τεχνικές διαμόρφωσης για ανίχνευση πολύ ασθενών σημάτων. Όπως παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ο ενισχυτής *lock-in* αποτελείται από τέσσερα μικρότερα κυκλώματα, καθένα από τα οποία θα εξεταστεί και θα σχεδιαστεί στη συνέχεια.

### 5.3.1 Προενισχυτής.

Το στάδιο της προενίσχυσης [62] έχει ως στόχο την ενίσχυση του μικρού σήματος εισόδου πριν την περαιτέρω επεξεργασία. Διαφορετικοί τύποι σημάτων χρειάζονται διαφορετικά στάδια προενίσχυσης. Σε περίπτωση σήματος ρεύματος απαιτείται αρχικά ενισχυτής ρεύματος-τάσης. Στην περίπτωση της ηλεκτρικής τομογραφίας απαιτείται η μέτρηση της χωρητικότητας, οπότε και κατασκευάζεται από ένα τελεστικό ενισχυτή ανάστροφης συνδεσμολογίας με καθορισμένης εμπέδησης κλάδο ανάδρασης όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4 Στάδιο προενισχυτή

Στο κύκλωμα του μετρούμενο ηλεκτρόδιο συνδέεται στην ανάστροφη είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Για την επιλογή των στοιχείων του κλάδου ανάδρασης εξετάζεται συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος

$$V_{ij} = -\frac{j2\pi f_e C_{ij} R_f}{j2\pi f_e C_f R_f + 1} V_e \quad (5.2)$$

Όπου:  $C_{ij}$  είναι η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων  $i, j$

$V_e, f_e$  η τάση και η συχνότητα του AC σήματος εισόδου

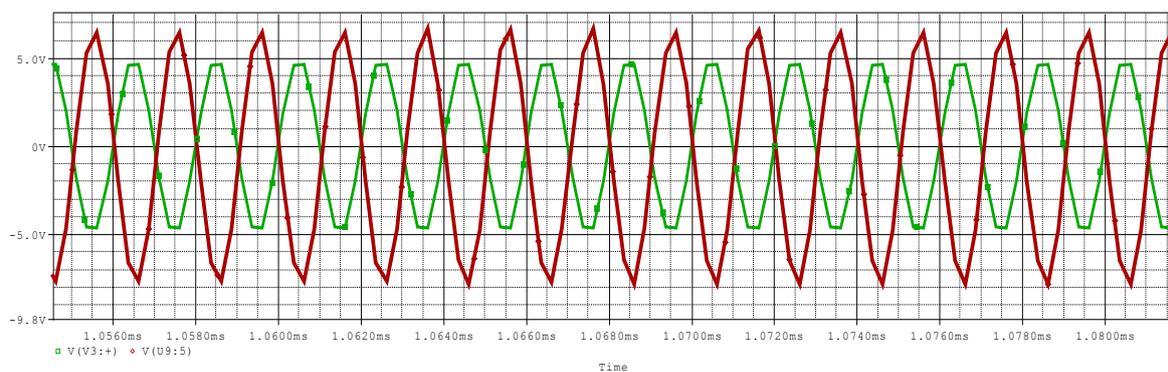
$R_f, C_f$  η αντίσταση και χωρητικότητα του κλάδου ανάδρασης του κυκλώματος προενισχυτή.

Βάσει της σχέσης (5.2), για να προσεγγιστεί η γραμμική λειτουργία του κυκλώματος, ο κλάδος ανάδρασης επιλέγεται ώστε να ικανοποιεί το περιορισμό  $|j2\pi f_e C_f R_f| \gg 1$ . Με δεδομένο

πως η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι  $f_e = 500\text{kHz}$  επιλέγεται για τη χωρητικότητα  $C_f = 68\text{pF}$  και  $R_f = 100\text{kHz}$ . Η τιμή της αντίστασης είναι επιθυμητό να έχει μεγάλη τιμή σε αντίθεση με το πυκνωτή στον κλάδο ανάδρασης ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη σταθερότητα στο κύκλωμα και καλύτερη απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων. Με την παραπάνω παραδοχή η συνάρτηση μεταφοράς απλοποιείται ως εξής:

$$V_{ij} = -\frac{C_{ij}}{C_f} V_e \quad (5.3)$$

Από την απλοποιημένη σχέση (5.3) παρατηρείται πως υπάρχει γραμμικότητα μεταξύ τάσης και χωρητικότητας. Η μέτρηση της  $C_{ij}$  επιτυγχάνεται μετρώντας τη τάση  $V_{ij}$  με γνωστά μεγέθη τα  $V_e, C_f$ . Επιπλέον, σημαντική παρατήρηση είναι πως το σήμα της τάσης εξόδου του προενισχυτή είναι μετατοπισμένο κατά  $180^\circ$  λόγω ανάστροφης συνδεσμολογίας του τελεστικού ενισχυτή. Τέλος, με τη χρήση του προγράμματος *Orcad Pspice* εκτελέστηκε μια προσομοίωση για το στάδιο. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



**Σχήμα 5.5** Στάδιο προενίσχυσης. Με πράσινο απεικονίζεται το σήμα εισόδου ενώ με κόκκινο το σήμα εξόδου. Παρατηρείται μια διαφορά φάσης  $180^\circ$

### 5.3.2 Γεννήτρια σήματος αναφοράς.

Η γεννήτρια σήματος αναφοράς είναι ένα κύκλωμα που παράγει ημιτονοειδές σήμα κατάλληλης συχνότητας που χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη διαμόρφωση της εισόδου. Μπορεί να κατασκευαστεί με τη χρήση οποιουδήποτε ενισχυτή θετικής ανάδρασης με ελεγχόμενο κέρδος. Σε πολλές περιπτώσεις δεν χρειάζεται να καθοριστεί η συχνότητα βάσει κάποιου εξωτερικού σήματος καθώς το ίδιο το σήμα εισόδου ανατροφοδοτείται και χρησιμοποιείται ως σήμα αναφοράς. Αυτό μπορεί να έχει εφαρμογή ενίσχυση ασθενών σημάτων καθορισμένης συχνότητας. Η ανατροφοδότηση γίνεται πριν το στάδιο της προενίσχυσης ώστε να διατηρείται η αρχική φάση του σήματος.

### 5.3.3 Αναλογικός πολλαπλασιαστής

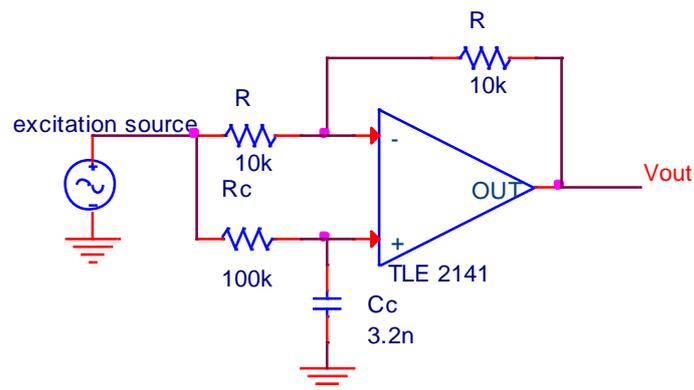
Το βασικό κύκλωμα του *lock-in* ενισχυτή είναι ο αναλογικός πολλαπλασιαστής που πολλαπλασιάζει το σήμα εισόδου με το σήμα αναφοράς. Ο αναλογικός πολλαπλασιαστής

είναι κύκλωμα που χρησιμοποιεί τη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας των *transistors* [61] για να υλοποιήσει τη συνάρτηση

$$V_{out} = V_1 \times V_2$$

Πολύ σημαντική παράμετρος η φάση των δύο σημάτων  $V_1, V_2$  τα οποία θα πρέπει να είναι συμφασικά διαφορετικά η έξοδος δεν θα δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Σε περίπτωση που τα σήματα έχουν διαφορά  $90^\circ$  το κύκλωμα θα έχει μόνιμα  $V_{out} = 0$  καθώς ο ένας όρος του πολλαπλασιαστή θα είναι πάντα μηδενικός για ημιτονοειδές σήμα.

Στην εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας το σήμα εισόδου τροφοδοτείται και στην είσοδο του κυκλώματος και ως σήμα αναφοράς. Το πρόβλημα που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση ωστόσο, είναι πως τα δύο σήματα έχουν διαφορετικές φάσεις, καθώς το ένα περνάει από ένα στάδιο προενίσχυσης που μετατοπίζει τη φάση του κατά  $180^\circ$ . Για να επιλυθεί το πρόβλημα, θα χρειαστεί και το εξωτερικό σήμα να μετατοπιστεί κατ' ανάλογη γωνία. Το κύκλωμα που επιλέγεται σε αυτή την περίπτωση είναι ένα ολοπερατό φίλτρο του οποίου λειτουργία είναι η μετατόπιση φάσης του σήματος αναφοράς [62], [63]. Το κύκλωμα ενός ολοπερατού φίλτρου 1<sup>ης</sup> τάξης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 5.6 Ολοπερατό φίλτρο 1ης τάξης

Για τη σχεδίαση του φίλτρου ελήφθησαν υπόψη οι παρακάτω προδιαγραφές:

- Διατήρηση του πλάτους του σήματος εισόδου.
- Καθυστέρηση φάσης κατά  $180^\circ$ .

Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω κυκλώματος είναι η εξής:

$$H(s) = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} = \frac{1/sC_c - R_c}{1/sC_c + R_c} \quad (5.4)$$

Το πλάτος της παραπάνω συνάρτησης είναι ανεξάρτητο της συχνότητας και ισούται με τη μονάδα.

$$H(s) = 1$$

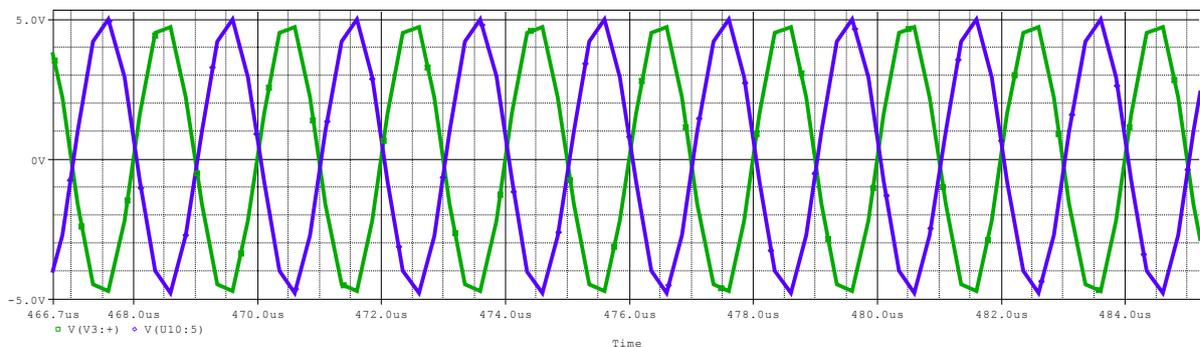
Η καθυστέρηση φάσης υπολογίζεται από το τύπο:

$$\text{Arg}\{H(s)\} = -2\arctan(2\pi f_e R_c C_c)$$

Από την επίλυση της παραπάνω σχέσης για επιθυμητή γωνία  $\text{Arg}\{H(s)\} = 180^\circ$  λαμβάνουμε πως η παράσταση  $2\pi f_e R_c C_c$  θα πρέπει να τείνει στο άπειρο για να ικανοποιηθεί η συνθήκη. Πρακτικά το γινόμενο θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλο. Με δεδομένο πως  $f_e = 500\text{kHz}$  επιλέγεται  $C_c = 3.2\text{nF}$  και  $R_c = 100\text{kHz}$ . Με αυτά τα δεδομένα το φίλτρο έχει καθυστέρηση φάσης:

$$\text{Arg}\{H(s)\} = -179.89^\circ$$

Από τις προσομοιώσεις η έξοδος του φίλτρου σε ημιτονοειδές σήμα εισόδου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα συγκριτικά με την είσοδο όπως απεικονίστηκε στο *OrCAD Pspice*:

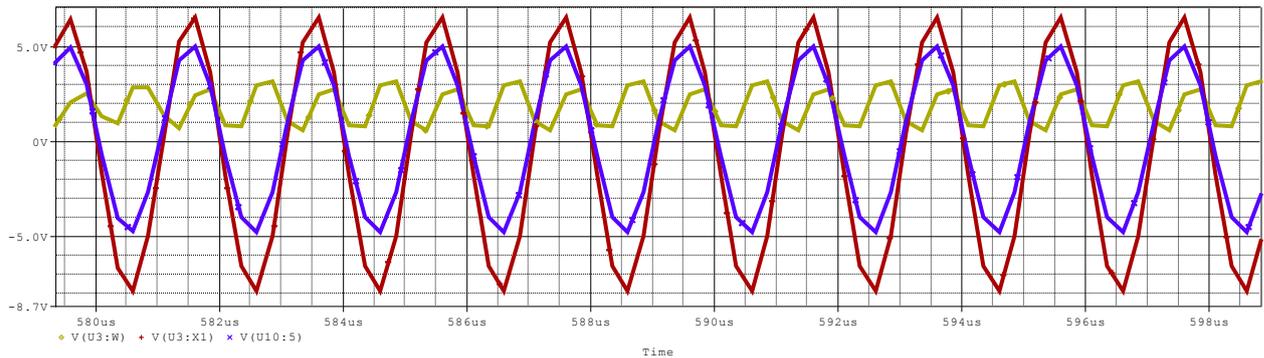


**Σχήμα 5.7** Απόκριση ολοπερατού φίλτρου. Το σήμα εξόδου (μπλε) και το σήμα εισόδου (πράσινο) έχουν διαφορά φάσης  $180^\circ$  σύμφωνα με τη σχεδίαση. Το πλάτος του σήματος εξόδου είναι ελαφρώς αυξημένο κατά  $200\text{mV}$  λόγω μη ιδανικών στοιχείων.

Στη συνέχεια τα δύο συμφασικά σήματα εισάγονται στο κύκλωμα του πολλαπλασιαστή για μίξη. Το ολοκληρωμένο που χρησιμοποιήθηκε για τη κατασκευή είναι ο αναλογικός πολλαπλασιαστής AD 633 της εταιρίας *Analog Devices* η συνάρτηση μεταφοράς του οποίου είναι η εξής:

$$W(s) = \frac{(X1-X2)(Y1-Y2)}{10} + Z \quad (5.5)$$

Όπου  $X, Y$  τα σήματα εισόδου και  $Z$  το άθροισμα των σημάτων που στην περίπτωση της εφαρμογής παραμένει γειωμένο, δηλαδή  $Z = 0$ . Παρατηρείται επιπλέον πως το σήμα εξόδου είναι μειωμένο κατά 10 φορές από τη συνάρτηση μεταφοράς, οπότε κρίνεται αναγκαίο στο τελικό στάδιο να υπάρξει επιπλέον ενίσχυση. Η έξοδος του σταδίου του πολλαπλασιαστή έχει την ακόλουθη μορφή:



**Σχήμα 5.8** Έξοδος αναλογικού πολλαπλασιαστή. Με κόκκινο και μπλε χρώμα είναι οι είσοδοι από το προενισχυτή και το ολοπερατό φίλτρο ενώ με κίτρινο είναι η έξοδος του πολλαπλασιαστή.

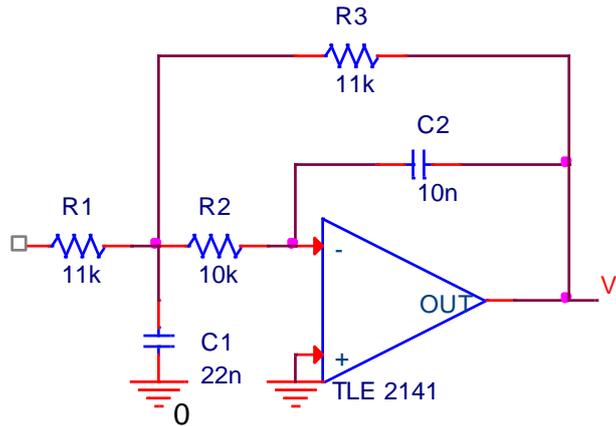
Στη συμπεριφορά του σήματος εξόδου η συχνότητα του τελικού σήματος είναι διπλάσια από αυτή των αρχικών σημάτων. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία του κυκλώματος καθώς ο πολλαπλασιασμός δύο σημάτων ίδιας συχνότητας παράγει σήμα διπλάσιας συχνότητας. Στην εικόνα 5.8 το σήμα εξόδου είναι αισθητά μειωμένο λόγω του υποδεκαπλασιασμού του πλάτους του σήματος. Στη συνέχεια το τελικό σήμα θα περάσει από βαθυπερατό φίλτρο και θα ενισχυθεί στα επιθυμητά επίπεδα για μέτρηση και επεξεργασία.

### 5.3.4 Βαθυπερατό φίλτρο

Η ποιότητα του τελικού σήματος καθορίζεται από το τελικό βαθυπερατό φίλτρο του ενισχυτή. Το βαθυπερατό φίλτρο καθορίζει το εύρος ζώνης του ενισχυτή και εξαλείφει τις αρμονικές 1ης και 2ης τάξης που παράγονται από το πολλαπλασιασμό των σημάτων. Οι δύο απαιτήσεις που χρειάζεται να έχει το φίλτρο είναι:

- Όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιλεκτικότητα στις καθορισμένες συχνότητες αποκοπής.
- Γρήγορη απόκριση.

Για τη καλύτερη μορφή του σήματος εξόδου χρησιμοποιούνται φίλτρα πολλών σταδίων. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό σε αυτή την εφαρμογή καθώς αυξάνει πολύ τη καθυστέρηση του κυκλώματος και κατ' επέκταση το χρόνο μέτρησης. Η λύση είναι η χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρου δεύτερης τάξης πολλαπλής ανάδρασης. Η χρήση αυτής της τοπολογίας επιλέχτηκε καθώς το κύκλωμα έχει καλή απόδοση στο φιλτράρισμα ακόμα και με ένα στάδιο λόγω της πολλαπλής ανάδρασης και η απόκρισή του είναι αρκετά γρήγορη [63], [64].



Σχήμα 5.9 Τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου ενός σταδίου πολλαπλής τοπολογίας

Για τη κατασκευή του κυκλώματος επιλέχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά:

$$f_c = 1kHz$$

$$C_1 = 22nF, C_2 = 10nF$$

Κέρδος μηδενικής συχνότητας

$$K = -1$$

Συντελεστής απόσβεσης

$$\zeta = 1$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος είναι η ακόλουθη:

$$H(s) = \frac{(2\pi f_c)^2 K}{s^2 + 2\zeta(2\pi f_c)s + (2\pi f_c)^2} \quad (5.6)$$

Για τον υπολογισμό των υπολοίπων στοιχείων του κυκλώματος ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$Q = \frac{1}{2\zeta}$$

$$K = -\frac{R_3}{R_1}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

$$\frac{C_2}{C_1} \leq \frac{\zeta^2}{1-K}$$

$$\frac{C_1}{C_2} \geq 4Q^2(1-K)$$

Επιλέγοντας τη τιμή της  $R_1 = 11k\Omega$  υπολογίζονται τα υπόλοιπα στοιχεία καθώς και τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος:

$$R_3 = 11k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

Τέλος, βάσει των τελικών υπολογισμών τα χαρακτηριστικά του φίλτρου είναι τα ακόλουθα:

$$f_c = 1,023kHz$$

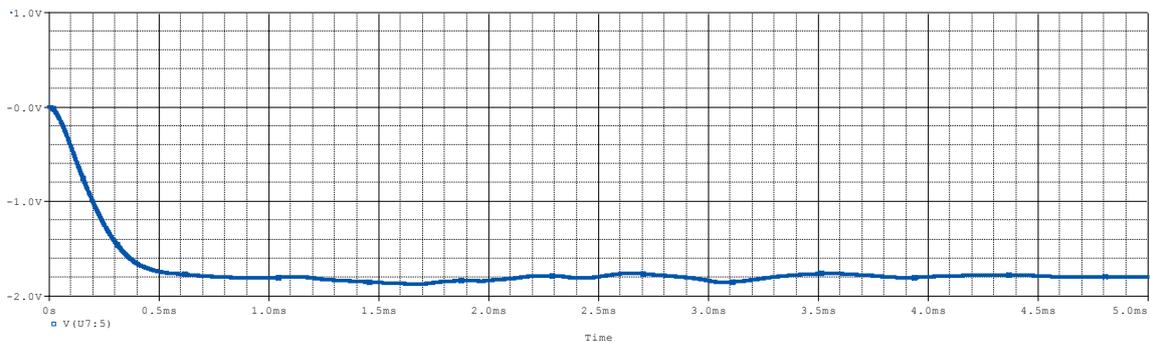
$$K = -1$$

$$Q = 0,5018$$

$$\zeta = 0,99638$$

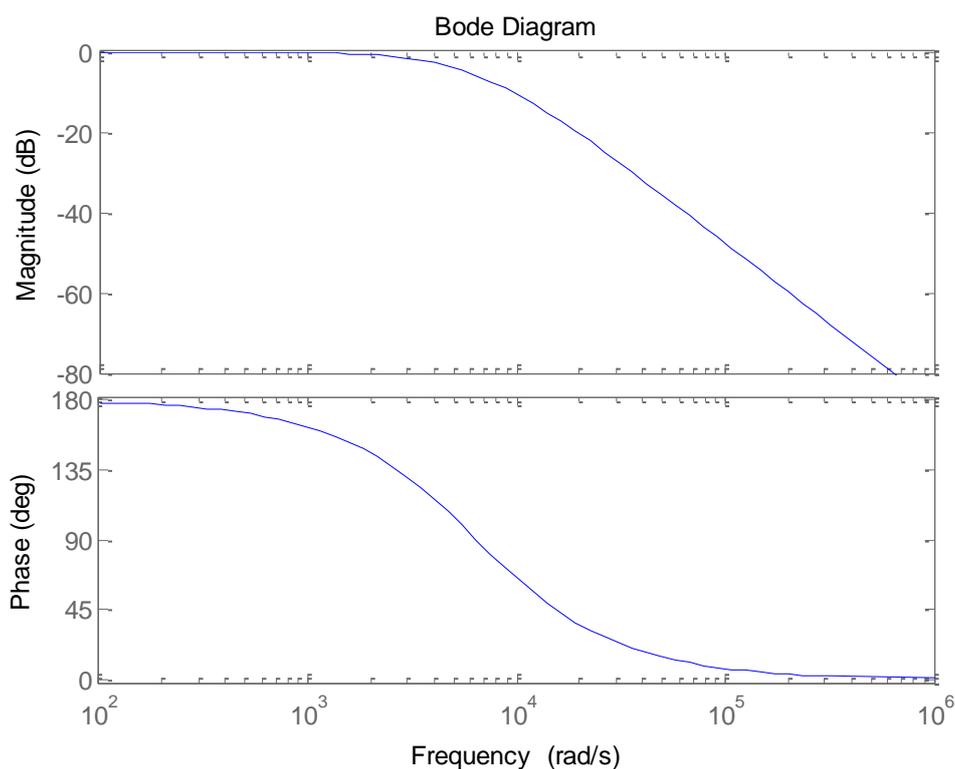
$$H(s) = \frac{-41322314,0496}{s^2 + 12809,9173554s + 41322314,0496}$$

Η απόκριση του φίλτρου είναι η ακόλουθη:



**Σχήμα 5.10** Έξοδος βαθυπερατού φίλτρου Παρατηρείται πως ο χρόνος απόκρισης φτάνει τα  $0,5ms$ . Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος ο χρόνος απόκρισης πρέπει να είναι μικρός ώστε το μετρητικό σύστημα να μπορεί να λαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα *bode* του φίλτρου.

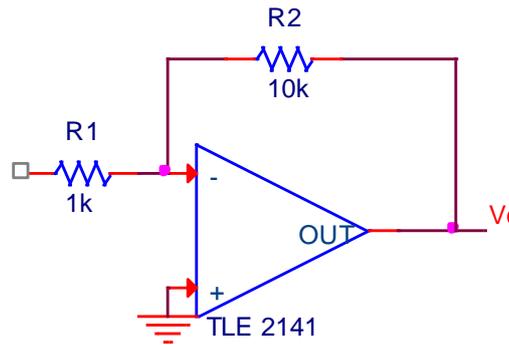


Σχήμα 5.11 Διάγραμμα bode βαθυπερατού φίλτρου

### 5.3.5 Ενισχυτής εξόδου

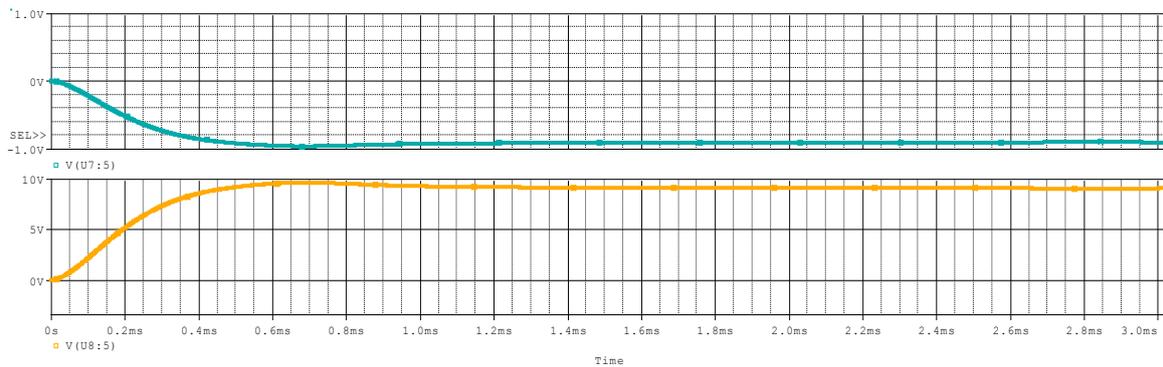
Στο στάδιο αυτό έχει ολοκληρωθεί η επεξεργασία του σήματος και χρειάζεται μόνο η ενίσχυσή του ώστε να είναι δυνατόν να μετρηθεί από το μετρητικό σύστημα. Η ενίσχυση αυτή ολοκληρώνεται στο τελικό στάδιο ώστε να μην διαρρέεται από μεγάλο ρεύμα κάποιο από τα υπόλοιπα στάδια του συστήματος με πιθανό κίνδυνο καταστροφής. Στο στάδιο αυτό συνήθως επιτυγχάνονται υψηλά κέρδη ενίσχυσης. Σημαντικό είναι ωστόσο να μην αλλοιώνεται γραμμική απόκριση διαφορετικά η επεξεργασία του σήματος δεν θα είναι ακριβής και οι μετρήσεις λανθασμένες. Η τελική ενίσχυση επιτυγχάνεται μέσω αναλογικού ενισχυτή ανάστροφης συνδεσμολογίας. Το επιθυμητό κέρδος είναι  $K_G = 10$  ώστε να γίνεται αντιστάθμιση του σήματος με το πολλαπλασιαστή καθώς το σήμα υποβιβάζεται κατά δέκα φορές. Έτσι επιλέγεται:

$$|K_G| = \left| \frac{R_2}{R_1} \right| \quad (5.7)$$



Σχήμα 5.12 Τελικό στάδιο ενισχυτή.

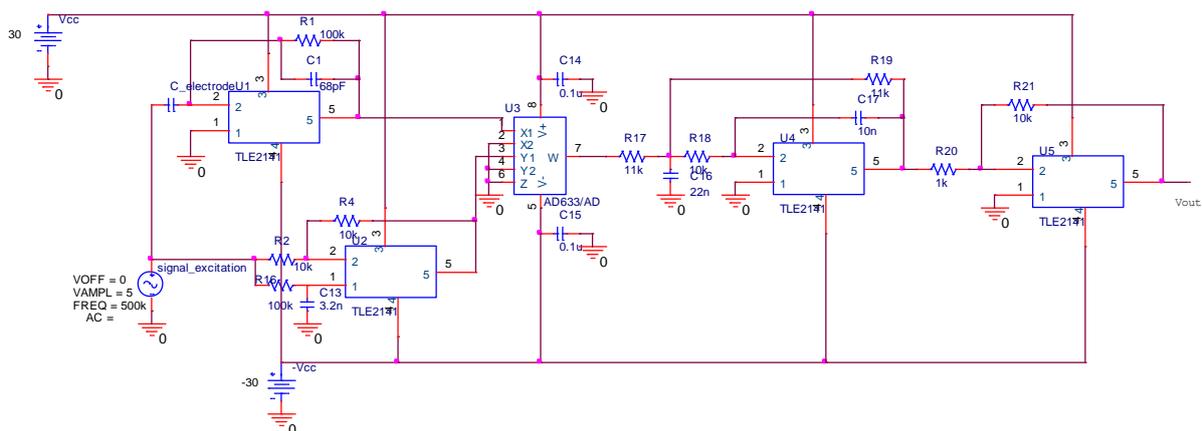
Με  $R_1 = 1k\Omega$  επιλέγεται  $R_2 = 10k\Omega$  η απόκριση του συστήματος είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 5.13 Απόκριση συστήματος. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται το σήμα στην είσοδο του τελικού ενισχυτή ενώ με πορτοκαλί το σήμα εξόδου. Λόγω της ανάστροφης συνδεσμολογίας αλλάζει η πολικότητα της τάσης.

## 5.4 Προσομοιώσεις:

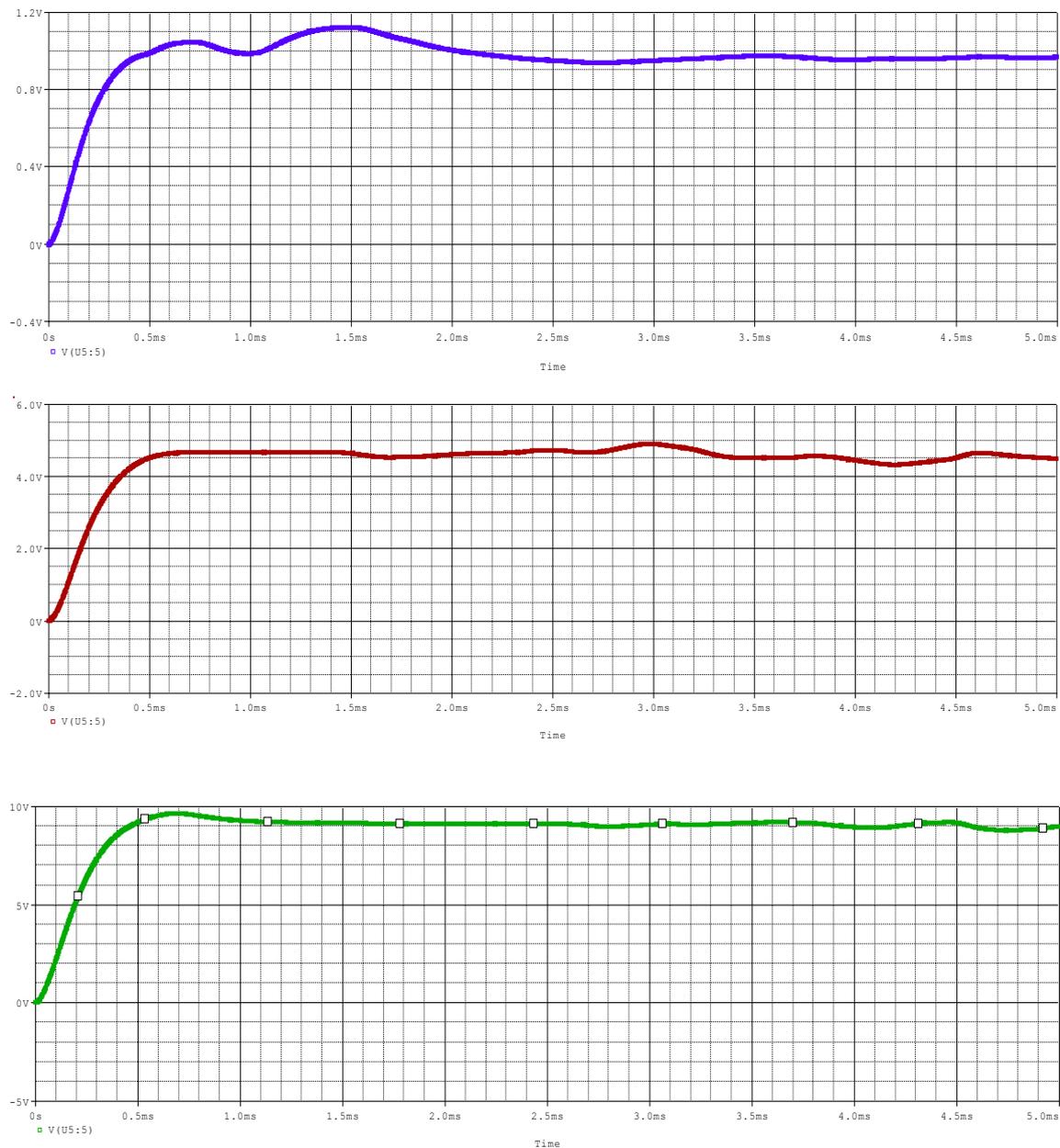
Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα του συστήματος μέτρησης όπως σχεδιάστηκε στο *OrCAD Pspice*.



Σχήμα 5.14 Κύκλωμα *lock-in* ενισχυτή. Η κατασκευή και προσομοίωση εκτελέστηκε στο πρόγραμμα *OrCAD pspice*.

Στη συνέχεια, για να εξακριβωθεί η συμπεριφορά του συστήματος εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές χωρητικότητες εισόδου. Οι παράμετρος που άλλαξε κάθε

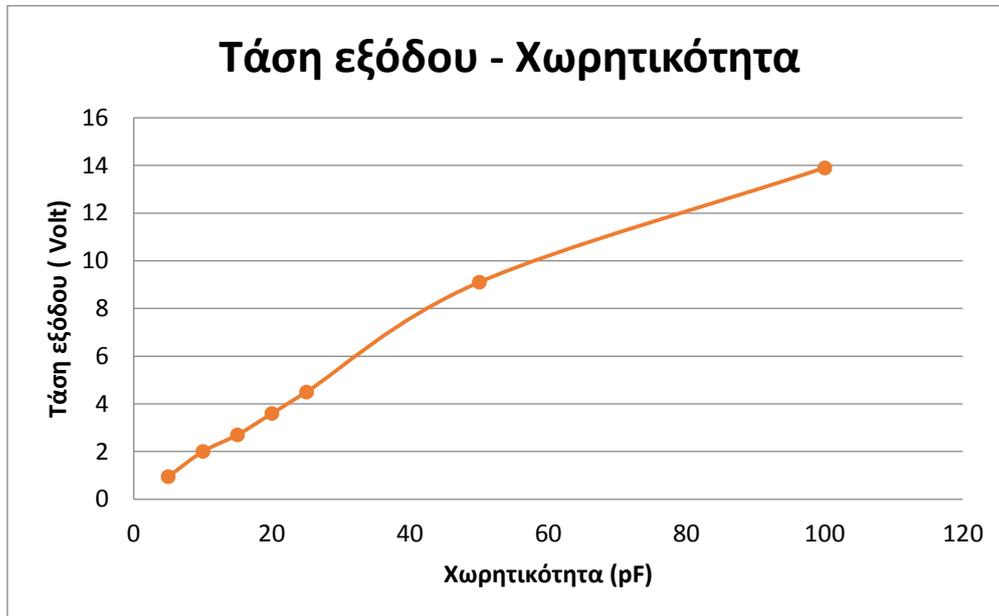
φορά ήταν η μετρούμενη χωρητικότητα και υπολογιζόταν η τάση εξόδου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



**Σχήμα 5.15** Τάση εξόδου *lock-in* ενισχυτή για διαφορετικές τιμές χωρητικότητας.

Τα διαγράμματα απεικονίζουν την απόκριση του συστήματος για διαφορετικές τιμές χωρητικότητας εισόδου. Παρατηρείται πως η συμπεριφορά της απόκρισης του κυκλώματος σε ημιτονοειδές σήμα δεν αλλάζει σημαντικά λόγω της χωρητικότητας εισόδου, ενώ φτάνει στη μόνιμη τιμή της μετά από περίπου 2ms. Επιπλέον, παρατηρείται μια μικρή κυμάτωση στο σήμα εξόδου απόρροια του φίλτρου. Για τη μείωση περαιτέρω της κυμάτωσης απαιτείται μεγαλύτερος συντελεστής απόσβεσης στο σχεδιασμό του φίλτρου είτε ένα φίλτρο περισσότερων σταδίων, με ανάλογη ωστόσο αύξηση του χρόνου απόκρισης. Εδώ είναι και

ένα σημείο της σχεδίασης του συστήματος όπου θα χρειαστεί ένας συμβιβασμός μεταξύ απόκρισης και ποιότητας μετρήσεων, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Τέλος, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα τάσης εξόδου σε σχέση με τη χωρητικότητα εισόδου για τον έλεγχο της γραμμικότητας του κυκλώματος.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα τάσης εξόδου - χωρητικότητας κυκλώματος.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ τάσης εξόδου και χωρητικότητας, η οποία είναι και η επιθυμητή συμπεριφορά για το σύστημα. Για χαμηλές τιμές χωρητικότητας, που ενδιαφέρουν περισσότερο στην εφαρμογή της τομογραφίας, η γραμμική συμπεριφορά δεν αλλοιώνεται. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η τιμή της χωρητικότητας εισόδου η κλίση της ευθείας μειώνεται απόρροια της μη γραμμικής συμπεριφοράς των ολοκληρωμένων. Ακόμα η αύξηση της χωρητικότητας αλλοιώνει τη συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή (5.2) η οποία χάνει τη γραμμικότητά της.

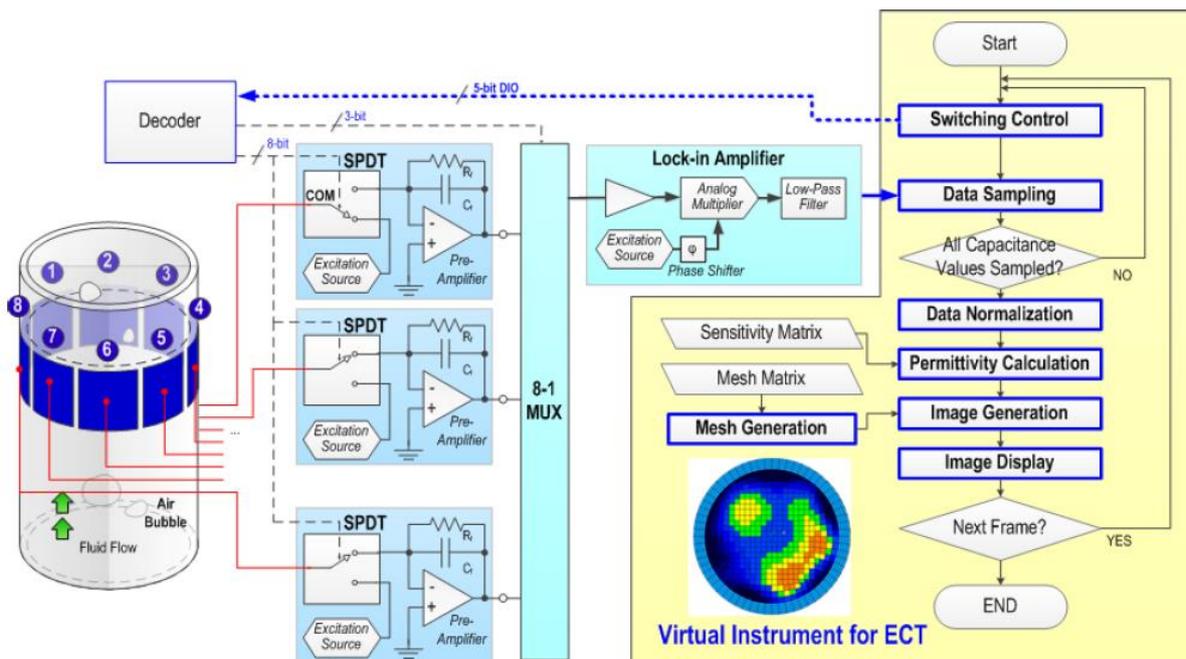
## 6 Σύστημα επεξεργασίας των μετρήσεων

### 6.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και σε παραπάνω κεφάλαιο ένα σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελείται από τρία κύρια υποσυστήματα [60]:

1. Αισθητήρας μέτρησης.
2. Σύστημα ελέγχου και καταγραφής των μετρήσεων.
3. Υπολογιστικό σύστημα για τον έλεγχο της διαδικασίας μέτρησης και κατασκευής της εικόνας.

Τα δύο πρώτα υποσυστήματα έχουν ήδη μελετηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Το παρόν κεφάλαιο θα μελετήσει τη συνολική λειτουργία του υπολογιστικού συστήματος που λαμβάνει τις μετρήσεις, τις μετατρέπει από αναλογικές σε ψηφιακές, ελέγχει τον τρόπο καταγραφής τους καθώς και αναλαμβάνει τη συνολική ανακατασκευή της εικόνας. Το συνολικό σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 6.1 Σύστημα ηλεκτρικής τομογραφίας. Σε μπλε διάγραμμα παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που αποτελούν κομμάτι του υλικού (*hardware*) ενώ σε κίτρινο πλαίσιο είναι τα υποσυστήματα που αποτελούν το λογισμικό (*software*) της διάταξης.

Το υπολογιστικό σύστημα αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα καθένα από το οποίο εκτελεί μια λειτουργία και συντονίζονται συνολικά σύμφωνα με το παραπάνω λειτουργικό διάγραμμα. Οι επιμέρους λειτουργίες που αναλαμβάνει το υποσύστημα καταγραφής είναι

- Δια κοπτικός έλεγχος ηλεκτροδίων
- Διακριτοποίηση μετρήσεων

- Βαθμονόμηση
- Υπολογισμός επιτρεπτότητας
- Κατασκευή και απεικόνιση των αποτελεσμάτων

Οι παραπάνω λειτουργίες εκτελούνται από μια σειρά υπολογιστικών συστημάτων που περιλαμβάνουν τόσο ηλεκτρονικά εξαρτήματα (*hardware*) όσο και λογισμικό (*software*). Η ανάλυση που ακολουθεί εξετάζει ξεχωριστά καθένα από τις παραπάνω λειτουργίες οι οποίες αναπτύχθηκαν με γνώμονα τη μεγαλύτερη δυνατή παραμετροποίηση ώστε να ταιριάζουν σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών.

## 6.2 Διακοπτικό σύστημα ελέγχου ηλεκτροδίων.

Η βασική διαδικασία της μεθόδου μέτρησης εναλλασσόμενων ρευμάτων είναι η εφαρμογή μιας ημιτονοειδούς τάσης σε ένα ηλεκτρόδιο και εν συνεχεία η μέτρηση της τάσης εξόδου και της εξαγωγής της εμπέδησης ή χωρητικότητας. Σε ένα σύστημα  $N$  ηλεκτροδίων η διέγερση και μέτρηση εκτελείται ανά ένα ηλεκτρόδιο τη φορά. Όταν εφαρμόζεται τάση στο ηλεκτρόδιο πηγής, τα υπόλοιπα παραμένουν γειωμένα και δρουν ως ηλεκτρόδια λήψης. Σε φυσικό επίπεδο αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ψηφιακών διακοπών (SPDT) και ενός αναλογικού πολυπλέκτη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1. Η μια είσοδος του διακόπτη συνδέεται πάνω στο ηλεκτρόδιο και η δεύτερη πάνω στην ανάστροφη είσοδο ενός προενισχυτή για τη μέτρηση της χωρητικότητας σύμφωνα με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο διαδικασία μέτρησης των χωρητικοτήτων εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και όπως παρατηρήθηκε υπάρχουν πολλά διαφορετικά πρωτόκολλα ανάλογα με το υλικό και τις ανάγκες της εφαρμογής. Για σύστημα  $N$  ηλεκτροδίων απαιτούνται  $\frac{N(N-1)}{2}$  ανεξάρτητες μετρήσεις για μια πλήρη απεικόνιση οι οποίες αποθηκεύονται σε διαγώνιο πίνακα  $N \times N$ .

$$C = \begin{bmatrix} 0 & C_{1,2} & C_{1,3} & \dots & C_{1,N-1} & C_{1,N} \\ 0 & 0 & C_{2,3} & \dots & C_{2,N-1} & C_{2,N} \\ 0 & 0 & 0 & C_{3,4} & \dots & C_{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{N-1,N} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ο έλεγχος των ψηφιακών διακοπών SPDT ελέγχεται από ένα *bit* ενώ ο πολυπλέκτης χρειάζεται επιπλέον *bits* για τον έλεγχό του, ανάλογα με τις εισόδους που περιλαμβάνει. Οι ψηφιακές εισόδους των διακοπών και του πολυπλέκτη συνδέονται είτε απευθείας πάνω στο σύστημα ελέγχου είτε σε αποκωδικοποιητή για μικρότερη πολυπλοκότητα. Για παράδειγμα, στο σύστημα που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκαν 8 ηλεκτρόδια για τη μέτρηση με αντίστοιχα 8 ψηφιακούς διακόπτες και ένα πολυπλέκτη 8 εισόδων 1 εξόδου. Για αυτό το σύστημα απαιτούνται 1 *bit* ανά ψηφιακό διακόπτη και τρία *bits* για το πολυπλέκτη, συνολικά

δηλαδή  $8 \times 1 + 3 = 11$  bits και 11 ψηφιακές θύρες για τον έλεγχο των μετρήσεων. Για σύστημα 8 ηλεκτροδίων όπου απαιτούνται 28 μετρήσεις για μια πλήρη εικόνα, το σύστημα ελέγχου χρειάζεται το ελάχιστο 5 bits ελάχιστο ώστε να μπορεί να καθορίσει τη μέτρηση. Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 6.1 η 5-bit πρόταση μεταφράζεται από τον αποκωδικοποιητή σε 11-bit σήμα ελέγχου. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο αριθμός που αντιστοιχεί σε κάθε μια διαμόρφωση μετρούμενων ηλεκτροδίων.

Πίνακας 3 Καθορισμός ζευγών ηλεκτροδίων για τη μέτρηση των χωρητικότητων.

Μέτρηση	0	1	2	3	...	5	6	...	9	10	...	20	21	...	27
$C_{ij}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{23}$	$C_{14}$	...	$C_{34}$	$C_{15}$	...	$C_{45}$	$C_{16}$	...	$C_{67}$	$C_{18}$	...	$C_{78}$
EX	1	1	2	1	...	3	1	...	4	1	...	6	1	...	7
DT	2	3	3	4	...	4	5	...	5	6	...	7	8	...	8

Στο παραπάνω πίνακα παρουσιάζεται η δομή του αποκωδικοποιητή. Συγκεκριμένα ο αποκωδικοποιητής κατασκευάζει την αλληλουχία των 28 μετρήσεων σε δυαδική μορφή από  $0 \times 0001$  (αριθμός μέτρησης 0 στο πίνακα) στο  $0 \times 1100$  (αριθμός μέτρησης 27 στο πίνακα).

Μέσω ενός παλμού που δίνεται από το χρονισμό του υπολογιστικού συστήματος αυξάνεται το bit ελέγχου για την επόμενη μέτρηση έως να ολοκληρωθούν και οι 28 μετρήσεις. Ο παραπάνω παλμός είναι το βήμα μέτρησης dt και εξαρτάται από την ικανότητα μέτρησης, επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων των υπολοίπων συστημάτων. Ο χρόνος dt πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από το συνολικό χρόνο μέτρησης και καταγραφής των χωρητικότητων. Επιπλέον, από το χρόνο μέτρησης καθορίζεται και ο αριθμός των εικόνων ανά δευτερόλεπτο που μπορεί να ανακατασκευαστεί. Ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{N(N-1)}{2} \times dt \quad (6.1)$$

Έτσι, ένας επιπλέον λόγος που δεν είναι επιθυμητή μια τοπολογία αισθητήρα με μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων είναι ο μεγάλος αριθμός μετρήσεων που καθυστερεί σημαντικά την εξαγωγή της εικόνας. Για παράδειγμα σε μια τοπολογία 8 ηλεκτροδίων, αν η τιμή  $dt = 4\text{ms}$  απαιτούνται  $28 \times 4 = 112\text{ms}$  για την κατασκευή ενός στιγμιότυπου, δηλαδή 8,9 εικόνες ανά δευτερόλεπτο.

### 6.3 Διακριτοποίηση των μετρήσεων.

Η μέτρηση της χωρητικότητας ενός ζεύγους ηλεκτροδίων εκτελείται μέσω του αναλογικού lock-in ενισχυτή. Για την αποθήκευση και επεξεργασία του σήματος τάσης απαιτείται διακριτοποίηση από μια αναλογική/ψηφιακή κάρτα που βρίσκεται εγκατεστημένη μέσα στο υπολογιστικό σύστημα μέτρησης. Καθώς τα μετρούμενα σήματα είναι πολύ μικρής τιμής και απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, είναι επιθυμητό η κάρτα να έχει μεγάλο ρυθμό

δειγματοληψίας ώστε να μπορεί να μετρηθεί κάθε μεταβολή πολλές φορές και να υπολογιστεί ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων. Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση λαμβάνεται από το διακοπτικό σύστημα ελέγχου ο αριθμός της μέτρησης, όπως παρουσιάστηκε στο παραπάνω πίνακα και μαζί με τη τιμή αποθηκεύονται για να είναι διαθέσιμες για περαιτέρω επεξεργασία.

#### 6.4 Βαθμονόμηση

Για την ανάκτηση της δυναμικής κατανομής της επιτρεπτότητας των υλικών μέσα στο χώρο παρακολούθησης, πρέπει να αφαιρεθεί η επίδραση των υπολοίπων παραγόντων που επηρεάζουν την επιτρεπτότητα. Οι παράγοντες αυτοί προκύπτουν κατασκευαστικές ασυμμετρίες είτε στα ηλεκτρόδια, είτε στις συνδέσεις είτε και στα ίδια τα τοιχώματα των σωληνώσεων που εσωτερικά ρέει το υλικό. Γι' αυτό είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των μετρήσεων που λαμβάνονται από τον αισθητήρα. Η κανονικοποίηση και η βαθμονόμηση ενός αισθητήρα ηλεκτρικής τομογραφίας περιλαμβάνει τη λήψη δύο σειρών μετρήσεων, μια με τον αισθητήρα γεμάτο με το υλικό μεγαλύτερης επιτρεπτότητας και μια με τον αισθητήρα άδειο. Και στις δύο περιπτώσεις μετρώνται οι σχετικές χωρητικότητες μεταξύ των ηλεκτροδίων και αποθηκεύονται σε δύο ξεχωριστούς πίνακες. Στη συνέχεια η κάθε μέτρηση κανονικοποιείται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda_{ij} = \frac{C_{ij} - C_{ij}^e}{C_{ij}^f - C_{ij}^e} \quad (6.2)$$

Όπου  $C_{ij}^f$  και  $C_{ij}^e$  η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων  $i, j$  με το υλικό υψηλής και χαμηλής επιτρεπτότητας αντίστοιχα. Συνήθως στις περισσότερες περιπτώσεις μέτρησης πολυφασικής ροής το υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας είναι ο αέρας και υψηλής το νερό [59], [60].

#### 6.5 Υπολογισμός επιτρεπτότητας

Για τη κατασκευή της τομής στο εσωτερικό του αισθητήρα απαιτείται η εύρεση των υλικών που βρίσκονται στο εσωτερικό. Η διαδικασία υπολογισμού των υλικών γίνεται μέσω την διηλεκτρικής επιτρεπτότητας που χαρακτηρίζει το αντίστοιχο υλικό. Η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω του υπολογισμού των χωρητικοτήτων και την επίλυση της σχέσης

$$\varepsilon(x, y) = f^{-1}(\lambda_{12}, \lambda_{13}, \dots, \lambda_{N-1, N}) \quad (6.3)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί το ανάστροφο πρόβλημα της ηλεκτρικής τομογραφίας, δηλαδή η εύρεση της συνάρτησης που υπολογίζει τη κατανομή της επιτρεπτότητας  $\varepsilon(x, y)$  με δοσμένες τις κανονικοποιημένες χωρητικότητες [60], [65]. Το παραπάνω πρόβλημα ωστόσο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν έχει κλειστή αναλυτική λύση για την αντίστροφη συνάρτηση. Έτσι, η επίλυση επιτυγχάνεται μέσω αριθμητικών μεθόδων που χωρίζουν το μετρούμενο χώρο σε ακέραιο αριθμό εικονοστοιχείων και στη συνέχεια υπολογίζεται σε

καθένα από αυτά η επιτρεπτότητα. Στον κάθε στοιχειώδη χώρο η επιτρεπτότητα θεωρείται ότι παραμένει σταθερή και ομογενής.

Από το ορθό πρόβλημα έχουμε την παρακάτω σχέση μεταξύ των χωρητικότητων και της επιτρεπτότητας:

$$\{\lambda_{ij}\} = S \cdot \{\varepsilon_k\} \quad (6.4)$$

Με  $S$  χαρακτηρίζεται ο πίνακας ευαισθησίας του αισθητήρα και  $\{\varepsilon_k\}$  το διάνυσμα της επιτρεπτότητας των εικονοστοιχείων με  $\varepsilon_k$  την επιτρεπτότητα του  $k$  – οστου εικονοστοιχείου ( $1 \leq k \leq K$ ). Ο υπολογισμός του κάθε εικονοστοιχείου γίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_k^e}{\varepsilon_k^f - \varepsilon_k^e} \quad (6.5)$$

Όπου  $\varepsilon_k$  η υπολογιζόμενη επιτρεπτότητα του  $k$  – οστου εικονοστοιχείου και  $\varepsilon_k^e$  και  $\varepsilon_k^f$  η επιτρεπτότητα του ίδιου στοιχείου όταν υπάρχει το υλικό χαμηλής και υψηλής επιτρεπτότητας αντίστοιχα. Παρατηρείται πως και η επιτρεπτότητα υπολογίζεται σε κανονικές τιμές καθώς η χωρητικότητα είναι ήδη κανονικοποιημένη. Ο υπολογισμός του πίνακα ευαισθησίας γίνεται βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που προκύπτει κατά τη διαδικασία επίλυσης του ανάστροφου προβλήματος είναι ο μικρός αριθμός των μετρούμενων χωρητικότητων. Εξ' αιτίας του θορύβου που παράγεται από το σύστημα τα ηλεκτρόδια χρειάζεται να έχουν επαρκή επιφάνεια επαφής για την ελάττωση του φαινομένου και τη καλύτερη λήψη μετρήσεων. Γι' αυτό ο αριθμός τους είναι περιορισμένος και κατ' επέκταση οι μετρούμενες χωρητικότητες είναι πολύ λιγότερες από τα εικονοστοιχεία που πρέπει να κατασκευαστούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η παραπάνω σχέση μεταξύ χωρητικότητας και επιτρεπτότητας να μην έχει μοναδική λύση. Επειδή δεν υπάρχει γενική λύση του προβλήματος ανακατασκευής έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις άμεσες όπου η διαδικασία ανακατασκευής χρησιμοποιεί τους πίνακες των κανονικοποιημένων μετρήσεων της χωρητικότητας και στη συνέχεια μέσω ενός μέσω μαθηματικού μοντέλου υπολογίζεται η κατανομή και κατασκευάζεται η εικόνα και οι επαναληπτικές μέθοδοι στις οποίες μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας γίνεται ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας ή περισσότερων αντικειμενικών συναρτήσεων.

### 6.5.1 Γραμμική μέθοδος πίσω προβολής

Η γραμμική μέθοδος πίσω προβολής (*linear back projection*) είναι η πρώτη χρονικά μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του ανάστροφου προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας [60], [65]. Στη μέθοδο αυτή θεωρείται πως η χωρητικότητα αποτελεί άθροισμα των επιμέρους εικονοστοιχείων. Η συνάρτηση που εκφράζει τη μέθοδο και αποτελεί μια γραμμική απεικόνιση της κατανομής της επιτρεπτότητας είναι η ανάστροφη της 6.4 δηλαδή:

$$\{\varepsilon_k\} = S^T \cdot \{\lambda_{ij}\} \quad (6.6)$$

Φυσιολογικά ο πίνακας ευαισθησίας  $S$  είναι υπολογισμένος από την αρχή καθώς είναι χαρακτηριστικό του αισθητήρα και εισάγεται στον αλγόριθμο. Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στην παραπάνω σχέση είναι πως ο πίνακας  $S^T$  αποτελεί προσέγγιση του πίνακα  $S^{-1}$  ο οποίος δεν μπορεί να υπολογιστεί καθώς ο  $S$  δεν είναι πάντα τετραγωνικός. Επιπλέον, επειδή η μη γραμμική αλληλεπίδραση των γειτονικών εικονοστοιχείων δεν υπολογίζεται, η μέθοδος τείνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα σε υλικά που έχουν μικρότερη διαφορά επιτρεπτότητας μεταξύ τους. Με βάση τα παραπάνω, η εικόνα που ανακατασκευάζεται τείνει να έχει θολά σημεία.

### 6.5.2 Κανονικοποίηση Tikhonov

Ο μέθοδος κανονικοποίησης *Tikhonov* χρησιμοποιείται για την επίλυση του ανάστροφου προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας [66]. Στη μέθοδο, γίνεται μια προσέγγιση του ανάστροφου πίνακα ευαισθησίας εισάγοντας έναν επιπλέον όρο κανονικοποίησης.

Από τη σχέση 6.6 υπολογίζονται οι παρακάτω:

$$\begin{aligned} S^T S \{\varepsilon_k\} &= S^T \cdot \{\lambda_{ij}\} \\ \{\varepsilon_k\} &= (S^T S)^{-1} S^T \cdot \{\lambda_{ij}\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Στην παραπάνω σχέση ο πίνακας  $S^T S$  δεν είναι αντιστρέψιμος. Για να μετατραπεί σε αντιστρέψιμη μορφή εισάγεται ένας όρος κανονικοποίησης  $\mu$  και η σχέση 6.7 μετατρέπεται:

$$\{\varepsilon_k\} = (S^T S + \mu I)^{-1} S^T \cdot \{\lambda_{ij}\} \quad (6.8)$$

Ενώ σε κανονικοποιημένη μορφή:

$$\{\hat{\varepsilon}_k\} = \frac{S_{TR}^T \cdot \{\lambda_{ij}\}}{S_{TR}^T \cdot u_\lambda} \quad (6.9)$$

$$\text{όπου } S_{TR}^T = (S^T \cdot S + \mu I)^{-1} \cdot S^T$$

Όπου  $\mu$  σταθερά κανονικοποίησης και  $I$  ο μοναδιαίος πίνακας.

Από την παραπάνω ανάλυση υπολογίζεται ο πίνακας  $S_{TR}$  ο οποίος αντικαθιστά τον ανάστροφο πίνακα ευαισθησίας. Η τιμή της μεταβλητής  $\mu$  επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου. Μικρή τιμή μειώνει το σφάλμα προσέγγισης αλλά το αποτέλεσμα είναι πολύ ευαίσθητο σε σφάλματα μέτρησης. Αντίθετα, μεγάλη τιμή του δείκτη  $\mu$  παράγει ορισμένα εικονοστοιχεία παραμορφωμένα στα όρια των επιφανειών. Στις περισσότερες εφαρμογές η τιμή του  $\mu$  κυμαίνεται από  $10^{-2}$  ως  $10^{-4}$ . Η κανονικοποίηση *Tikhonov* χρησιμοποιείται συμπληρωματικά στη μέθοδο LBP.

### 6.5.3 Ανάλυση σε ιδιάζουσες τιμές

Η μέθοδος ανάλυσης σε ιδιάζουσες τιμές είναι μια παραγοντοποίηση πίνακα με πραγματικά ή μιγαδικά στοιχεία και είναι της μορφής:

$$S = U\Sigma V^T \quad (6.10)$$

Όπου οι στήλες του πίνακα  $U$  είναι τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα  $SS^T$  οι στήλες του  $V$  τα ιδιοδιανύσματα του  $S^TS$  και  $\Sigma$  ο διαγώνιος πίνακας ίδιου μεγέθους με τον  $S$  τα διαγώνια στοιχεία του οποίου αποτελούνται από τις ρίζες των μη μηδενικών ιδιοτιμών των πινάκων  $SS^T$  και  $S^TS$ . Ο ψευδοαντίστροφος του πίνακα  $S$  βάσει της σχέσης 6.10 είναι:

$$S^+ = V\Sigma^{-1}U^T$$

Και η συνάρτηση ανακατασκευής είναι η εξής:

$$\varepsilon_k = \frac{S^+ \cdot \{\lambda_{ij}\}}{S^+ \cdot u_\lambda} \quad (6.11)$$

### 6.5.4 Επαναληπτικές μέθοδοι ανακατασκευής εικόνας

Η μη γραμμική φύση του ανάστροφου προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας περιορίζει την ακρίβεια στην απεικόνιση των άμεσων μεθόδων. Η βελτίωση της εικόνας μπορεί να επιτευχθεί μέσω επαναληπτικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην αρχική μέτρηση των χωρητικότητων και τη κατασκευή μιας αρχικής εικόνας και στη συνέχεια η βελτιωμένη εικόνα παράγεται μέσω της διαφοράς μεταξύ μετρούμενης και υπολογιζόμενης χωρητικότητας επαναληπτικά. Οι επαναληπτικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες [67] τις αλγεβρικές [68] και τις μεθόδους βελτιστοποίησης [69].

Οι αλγεβρικές μέθοδοι βασίζονται στην επίλυση της παρακάτω σχέσης επαναληπτικά για την εκτίμηση του διανύσματος της εικόνας:

$$G^{k+1} = G^k + \beta^k S^T (C^m - y(G^k)) \quad (6.12)$$

Όπου  $k$  ο αριθμός της επανάληψης,  $C^m$  η μετρούμενη χωρητικότητα,  $\beta^k$  παράγοντας της μέτρησης και  $y(G^k)$  η ορθή επίλυση του προβλήματος του διανύσματος εικόνας  $G^k$ . Οι διαφορές σε κάθε αλγεβρική μέθοδο εντοπίζονται στη τιμή του παράγοντα  $\beta$  και στην επίλυση του ορθού προβλήματος. Η συνηθέστερη αλγεβρική επαναληπτική μέθοδος είναι η ILBP (*iterative linear back projection*) στην οποία η επίλυση του ορθού προβλήματος γίνεται μέσω της σχέσης  $c = s \cdot g$ . Μια άλλη συνήθης μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανανέωση της εικόνας είναι η χρήση όλων των χωρητικότητων σε ένα βήμα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ταχύτητας και αναφέρεται ως SIRT (*simultaneous image reconstruction technique*).

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης βασίζονται στην ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση ενός αριθμού αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι τείνουν να έχουν καλύτερα αποτελέσματα από τις αλγεβρικές για δύο λόγους:

- Λόγω της μη γραμμικής φύσης του προβλήματος ανακατασκευής η παραπάνω σχέση δεν αποτελεί μοναδική λύση του προβλήματος. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης δίνουν την πιθανότερη εικόνα βάσει μιας αντικειμενικής συνάρτησης.
- Οι αλγεβρικές μέθοδοι ελαχιστοποιούν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα το οποίο δεν περιέχει πληροφορία για τη φύση της εικόνας.

Ένα δύσκολο κομμάτι της μεθόδου είναι η επιλογή των αντικειμενικών συναρτήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για βελτιστοποίηση. Μια ανεπτυγμένη μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος ονομάζεται πολυκριτική βελτιστοποίηση με χρήση νευρωνικών δικτύων η οποία χρησιμοποιεί τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις [70], [71]:

- το μέσο τετραγωνικό σφάλμα

$$f_1(G) = \frac{1}{2} \omega_1 \|y(G) - C^m\|^2 \quad (6.13)$$

Όπου  $y(G)$  η λύση του ορθού προβλήματος και  $C^m$  το διάνυσμα των μετρούμενων χωρητικότητων.

- Τη συνάρτηση εντροπίας

$$f_2(G) = \omega_2 \sum_{j=1}^N G_j \ln(G_j) \quad (6.14)$$

- Τη συνάρτηση ομαλότητας

$$f_3(G) = \frac{1}{2} \omega_3 (G^T X G + G^T G) \quad (6.15)$$

Όπου  $0 \leq \omega_1, \omega_2, \omega_3 \leq 1$  είναι σταθμισμένες σταθερές, και  $X$  πίνακας υπεραποφίλτρου.

Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται η συνάρτηση ενέργειας :

$$E(G) = \sum_{i=1}^3 f_i(G) \quad (6.16)$$

Η σχέση 6.16 αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, η βελτιστοποίηση της οποίας θα γίνει με τη χρήση νευρωνικού δικτύου *Hopfield*. Ακολουθεί μια ανάλυση της μεθόδου:

Η συνάρτηση ενεργοποίησης του νευρώνα δίνεται από τη σχέση:

$$f_{\Sigma}(u_j) = \begin{cases} 0 & u_j \leq -\xi/\beta \\ \beta u_j + \xi & -\xi/\beta < u_j < 1 - \xi/\beta \\ 1 & 1 - \xi/\beta \leq u_j \end{cases} \quad (6.17)$$

Όπου  $\beta, \xi$  σταθερές που προσδιορίζουν τη κλίση της γραμμικής συνάρτησης.

Η έξοδος λαμβάνεται μέσω γραμμικής απεικόνισης της κατάστασης του νευρώνα δηλαδή:

$$G_j = u_j = f_{\Sigma}(u_j)$$

Βάσει των παραπάνω η συνάρτηση ενέργειας 6.16 σε ένα νευρωνικό δίκτυο *Hopfield* μετατρέπεται σε:

$$E(G) = \sum_{i=1}^3 w_i f_i(G) + \sum_{j=1}^N \Psi(z_j) + \sum_{l=1}^M \int_0^{G_l} f_{\Sigma}^{-1} dG \quad (6.18)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των ανεξάρτητων χωρητικότητων,  $M$  ο αριθμός των εικονοστοιχείων του διανύσματος εικόνας,  $\Psi$  μια αύξουσα συνάρτηση για  $z_i > 0$  διαφορετικά είναι μηδενική. Στη σχέση 6.18 ο πρώτος όρος είναι η αντικειμενική συνάρτηση, ο δεύτερος είναι περιορισμός που εξαναγκάζει τη μεταβλητή  $z(t) \leq 0$  όπου  $z_i$  ορίζεται στη σχέση 6.19 και ο τελευταίος όρος διαμορφώνει την έξοδο ώστε να βρίσκεται στην περιοχή  $0 \leq G_j \leq 1$ .

$$z(t) = \sum_{l=1}^M (y_l(G(t)) - C^m) \quad (6.19)$$

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση ολοκληρώνεται στη διαφορική εξίσωση ενός δικτύου *Hopfield* και η εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned} u'(t) &= -\frac{1}{C_0} \nabla G \\ &= -[\omega_1(1 + \ln(G(t))) + \omega_2 y'(G(t))z(t) + \omega_3(XG(t) + G(t) + y'(G(t))\delta(z(t)))] \\ &\quad - \frac{u(t)}{\tau} \end{aligned} \quad (6.20)$$

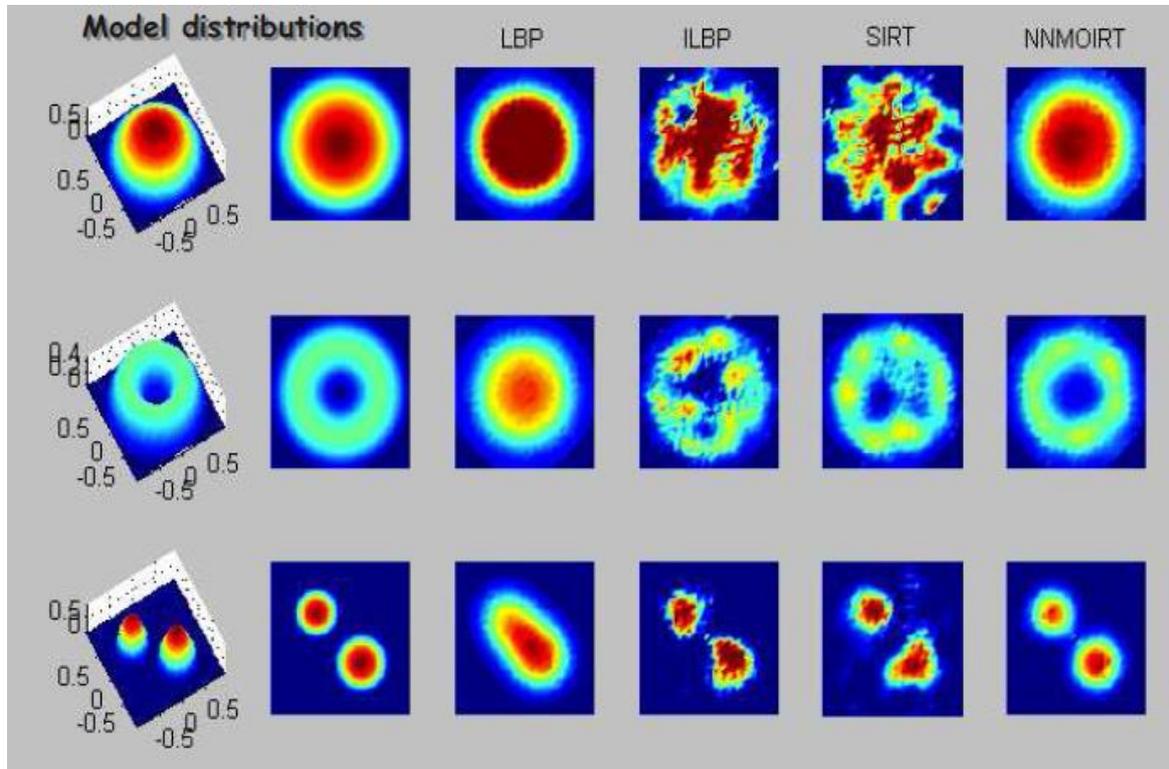
$$\text{Όπου: } \delta(z(t)) = \begin{cases} 0 & z(t) < 0 \\ \alpha z(t) & z(t) > 0 \end{cases}$$

Με χρήση της σχέσης 6.17 για τη συνάρτηση μεταφοράς, η εξίσωση μετατρέπεται

$$G_j(t + \Delta t) = G_j(t) + \beta u'_j \Delta t \quad (6.21)$$

Η παραπάνω μέθοδος παρόλο που έχει αρκετά μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα θεωρείται η πρώτη που μπορεί να ανακατασκευάσει τρισδιάστατη εικόνα απευθείας από τις μετρήσεις της χωρητικότητας. Είναι μια μέθοδος που είναι ικανή και για μέτρηση πολυφασικής ροής.

Στη εικόνα 6.2 συγκρίνονται οι διαφορετικές μέθοδοι αλγορίθμων ανακατασκευής. Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ανάστροφου προβλήματος. Από τα αποτελέσματα, η μέθοδος βελτιστοποίησης με τη χρήση νευρωνικού δικτύου (NN-MOIRT) είναι αυτή που δίνει τη καλύτερη απεικόνιση ως προς τη λεπτομέρεια της εικόνας.



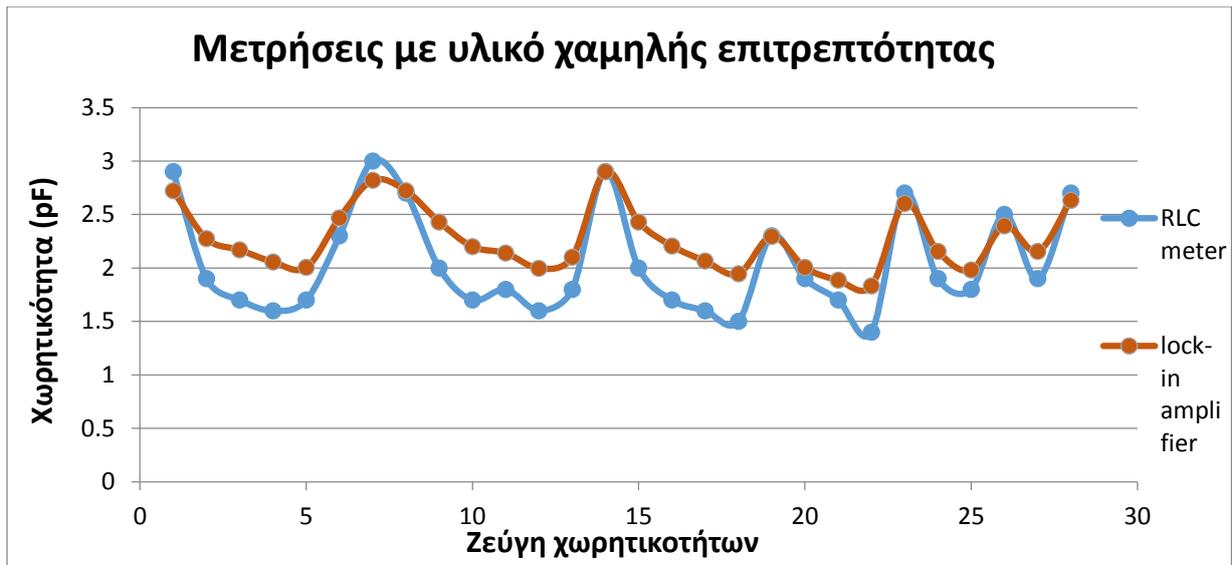
Σχήμα 6.2 Συγκριτικό διάγραμμα των μεθόδων ανακατασκευής εικόνας για συγκεκριμένες τοπολογίες

## 7 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Η διεξαγωγή του πειράματος έγινε σε στατική τοπολογία επιτρεπτότητας. Αυτό σημαίνει πως η κατανομή της επιτρεπτότητας διατηρούνταν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Εν συνεχεία οι χωρητικότητες των ζευγών των ηλεκτροδίων μετρήθηκαν και επεξεργάστηκαν για τη κατασκευή της εικόνας. Το εργαστηριακό σύστημα μέτρησης δεν έχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο καθώς δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τα διακοπτικά κυκλώματα που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 6.2. Αυτού του τύπου μέτρηση έχει το πλεονέκτημα της ευκολίας στη διάταξη χωρίς να απαιτείται σύστημα ελέγχου διακοπών και μεγάλη επεξεργαστική ισχύ για την άμεση εξαγωγή της εικόνας. Στη συνέχεια τα ζεύγη των μετρήσεων αποθηκεύτηκαν σε διανύσματα και δόθηκαν ως είσοδος στον αλγόριθμο ανακατασκευής της εικόνας για την ολοκλήρωση της ψηφιακής απεικόνισης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η συμπεριφορά του αισθητήρα ως σύστημα δισδιάστατης τομογραφίας οπότε κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων τα δύο από τα τρία επίπεδα του αισθητήρα παρέμειναν γειωμένα για να μην επιδρούν στη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Εκτός από τον αισθητήρα έγινε χρήση δύο οργάνων, ενός ψηφιακού οργάνου μέτρησης χωρητικότητας (*LCR meter*) και του *lock-in* ενισχυτή που η κατασκευή του αναπτύχθηκε ειδικά για αυτό το σκοπό.

### 7.1 Σύγκριση *lock-in* ενισχυτή και μετρητή εμπέδησης

Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του κυκλώματος του *lock-in* ενισχυτή που κατασκευάστηκε εκτελέστηκαν δύο σειρές μετρήσεων χωρητικότητας για τον αισθητήρα μια με τη χρήση του ενισχυτή και μια δεύτερη με το μετρητικό σύστημα εμπέδησης η για την εξακρίβωση της λειτουργίας των ηλεκτρονικών. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων και αποθήκευση τους. Οι μετρήσεις που εκτελέστηκαν για την εξακρίβωση του ενισχυτή θα γίνουν σε αισθητήρα γεμάτο με το υλικό χαμηλής και υψηλής επιτρεπτότητας με διαφορετικό υλικό κάθε φορά. Μέσω αυτής της διαδικασίας εκτός από εξακρίβωση θα γίνει παράλληλα και βαθμονόμηση του αισθητήρα. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν όταν ο αισθητήρας είναι γεμάτος με το υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας (αέρας).



Σχήμα 7.1 Σύγκριση μετρήσεων lock-in ενισχυτή και LCR meter. Υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τιμές των χωρητικότητων με τη χρήση των δύο μεθόδων. Το κυριότερο χαρακτηριστικό που εξάγεται είναι πως οι μετρήσεις ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά καθώς αυξάνονται και μειώνονται με παρόμοιο τρόπο ανά ζεύγος. Το κυριότερο σημείο διαφοράς είναι στις χαμηλές τιμές χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις του *lock-in* ενισχυτή δίνουν ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή καθώς στην εργαστηριακή διάταξη χρησιμοποιήθηκαν καλώδια με ακροδέκτες οι οποίοι εισάγουν επιπλέον παρασιτικές χωρητικότητες λόγω μη ιδανικών επαφών. Το φαινόμενο αυτό σε συνδυασμό με την πολύ μικρή τιμή της μετρούμενης χωρητικότητας προκαλεί μια αυξημένη τιμή στη μέτρηση. Επιπλέον λόγω της γεωμετρίας του αισθητήρα μεταξύ των ηλεκτροδίων που είχαν μεγάλη απόσταση μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκαν μεγαλύτερου μήκους καλώδια με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες και θόρυβος.

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν άλλες δύο σειρές μετρήσεων με τον αισθητήρα γεμάτο με υλικό υψηλής επιτρεπτότητας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 7.2 Σύγκριση μετρήσεων lock-in ενισχυτή και LCR meter. Υλικό υψηλής επιτρεπτότητας

Στο διάγραμμα 7.2 παρατηρείται καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τον άδειο αισθητήρα. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός πως οι τιμές των μετρούμενων χωρητικότητων είναι υψηλότερες και τα πλάτη των μετρούμενων σημάτων μεγαλύτερα. Ως εκ τούτου οι μετρήσεις επηρεάζονται λιγότερο σε σχέση με την προηγούμενη σειρά. Αντίστοιχα η συμπεριφορά δεν αλλάζει και αυξάνεται ή μειώνεται με παρόμοιο τρόπο.

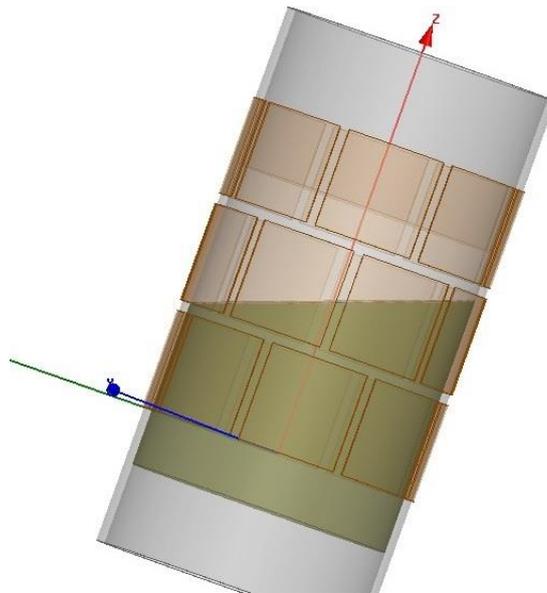
Γενικά και στις δύο σειρές μετρήσεων φαίνεται μια μικρή διαφοροποίηση στα επίπεδα των τιμών των χωρητικότητων κυρίως στις μικρότερες τιμές. Ωστόσο, η συμπεριφορά των μετρήσεων είναι παρόμοια ποιοτικά γεγονός που καταδεικνύει τη σωστή λειτουργία του ενισχυτή *lock-in*. Η διαφοροποίηση στις απόλυτες τιμές μπορεί να εξαλειφθεί καθώς στο τέλος γίνεται κανονικοποίηση στις μετρήσεις.

## 7.2 Αποτελέσματα – Προσομοιώσεις

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία βαθμονόμησης, διεξήχθησαν ορισμένες σειρές μετρήσεων για συγκεκριμένες κατανομές υλικών ώστε να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία του αισθητήρα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μέτρηση, μέσω του *lock-in* ενισχυτή, των χωρητικότητων σε πραγματικές τιμές (*raw capacitances*) και στη συνέχεια εξάγονται οι κανονικοποιημένες τιμές. Οι τιμές αυτές μελετώνται και συγκρίνονται με τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για τις ίδιες κατανομές επιτρεπτότητας ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του αισθητήρα και να εξεταστεί η καλή λειτουργία του. Τέλος, βάσει των αποτελεσμάτων και με τη βοήθεια του *Matlab* εισήχθησαν τα κανονικοποιημένα δεδομένα και έγινε ανακατασκευή της εικόνας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:

### 7.2.1 Κατανομή πετρελαίου – αέρα

Στην πρώτη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν δύο υλικά χαμηλής επιτρεπτότητας. Για τις ανάγκες της βαθμονόμησης του αισθητήρα θεωρήθηκε ως υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας ο ατμοσφαιρικός αέρας του οποίου η σταθερά είναι ίση με τη μονάδα ( $\epsilon_r = 1$ ). Ως δεύτερο υλικό χρησιμοποιήθηκε καθαρό πετρέλαιο με σταθερά επιτρεπτότητας  $\epsilon_r = 2,3$ . Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο τρισδιάστατος αισθητήρας που κατασκευάστηκε στον οποίο τα ακραία επίπεδα παρέμειναν γειωμένα και το ενδιάμεσο χρησιμοποιήθηκε ως το επίπεδο της τομής. Για τη καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της τομογραφίας δόθηκε μια κλίση στον αισθητήρα, περίπου  $20^\circ$ , ώστε να υπάρχει μια ανομοιομορφία στο επίπεδο της τομής. Μέσω αυτής της κλίσης τα ηλεκτρόδια 1 και 2 βρίσκονται σε χώρο που είναι πλήρης με το υλικό υψηλότερης επιτρεπτότητας (πετρέλαιο) ενώ τα ηλεκτρόδια 5 και 6 είναι εξ ολοκλήρου στο υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας (αέρας) με τα υπόλοιπα να βρίσκονται σε ένα ποσοστό εντός και σε ένα άλλο εκτός. Μια εικόνα της διάταξης που μετρήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1 όπως κατασκευάστηκε στην προσομοίωση.



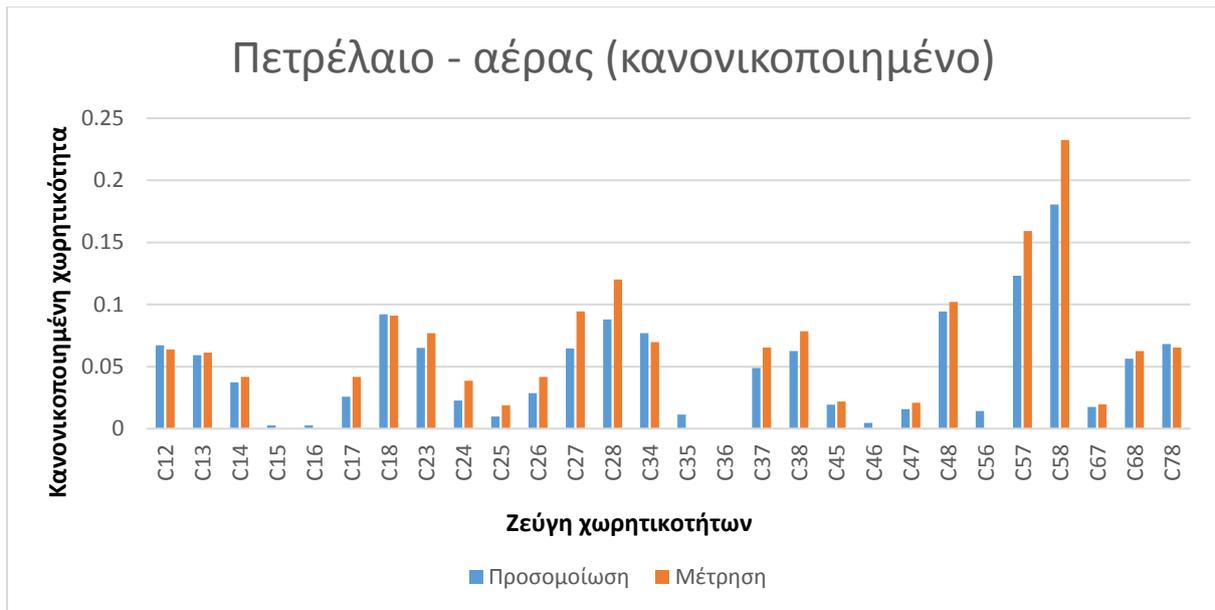
Σχήμα 7.3 Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή πετρελαίου - αέρα

Στη συνέχεια με τη χρήση του *lock-in* ενισχυτή μετρήθηκαν οι τάσεις και υπολογίστηκαν οι χωρητικότητες των ζευγών των ηλεκτροδίων. Επίσης με τη χρήση του προγράμματος ANSYS MAXWELL εκτελέστηκαν και οι προσομοιώσεις για την ίδια διάταξη και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα. Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε σε απόλυτες και κανονικοποιημένες τιμές καθώς και το σφάλμα μεταξύ μέτρησης και προσομοίωσης.

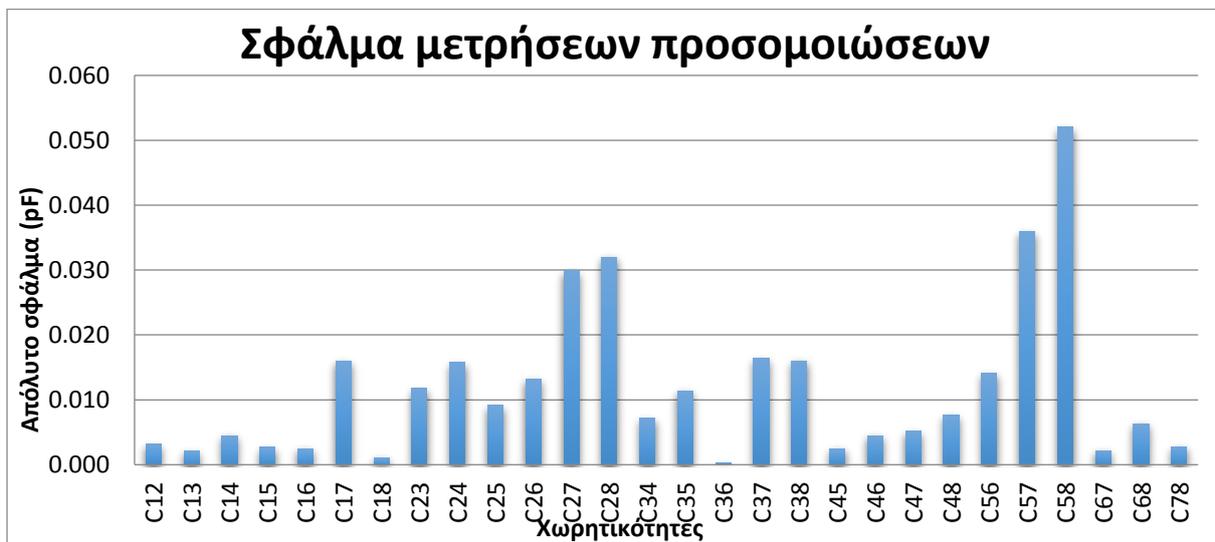


Σχήμα 7.4 Χωρητικότητες αισθητήρα για μέτρηση πετρελαίου – αέρα

Από τις μετρήσεις παρατηρείται αρχικά πως τα ζεύγη των ηλεκτροδίων με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα είναι αυτά που περιλαμβάνονται στην περιοχή με το υλικό υψηλότερης επιτρεπτότητας ( πετρέλαιο). Φαίνεται η χωρητικότητα μεταξύ των ηλεκτροδίων 1,2 ,3 και 8 μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα δίνοντας μια ποιοτική επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Επίσης, σημαντική είναι η διαφορά των χωρητικότητων μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Στις μετρήσεις οι χωρητικότητες είναι αισθητά υψηλότερες γεγονός που οφείλεται στη μη ιδανική κατασκευή του αισθητήρα και στις συνδέσεις μεταξύ των οργάνων μέτρησης. Η κόλλα που συγκρατεί τα ηλεκτρόδια στην περιφέρεια του σωλήνα καθώς και ο αέρας που βρίσκεται εγκλωβισμένος στο εσωτερικό αυξάνουν κατά πολύ τη μετρούμενη χωρητικότητα. Επιπλέον οι ακροδέκτες που χρησιμοποιήθηκαν στα όργανα μέτρησης έχουν επιπλέον παρασιτικές χωρητικότητες με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να είναι κατά πολύ μεγαλύτερες. Για να εξαλειφθεί το φαινόμενο ο αισθητήρας χρειάζεται να βαθμονομηθεί και να εξαχθούν οι κανονικοποιημένες μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των κανονικοποιημένων μετρήσεων μέσω της προσομοίωσης και μέσω των μετρήσεων υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στο σχήμα 7.5. Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό πως οι χωρητικότητες ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά και σε επίπεδο τιμών γεγονός που καταδεικνύει και επαληθεύει τη σωστή λειτουργία του αισθητήρα. Τέλος στο σχήμα 7.6 όπου απεικονίζεται το απόλυτο σφάλμα, η τιμή του είναι ιδιαίτερα μικρή και μειοτοποιείται λίγο πάνω από τα 0.05pF. Επιπλέον τα ζεύγη που παρουσιάζουν μεγαλύτερο σφάλμα μέτρησης είναι αυτά με υψηλότερες τιμές χωρητικότητας, παρατηρείται δηλαδή μια κατανομή σφάλματος ανάλογη με το μέγεθος της μέτρησης.



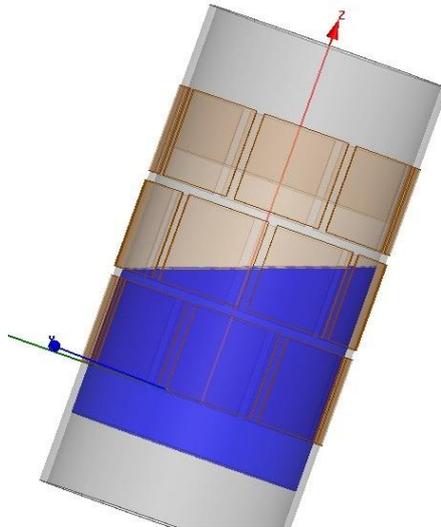
Σχήμα 7.5 Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα (raw capacitances). Μέτρηση πετρέλαιο - αέρας



Σχήμα 7.6 Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση πετρέλαιο - αέρας

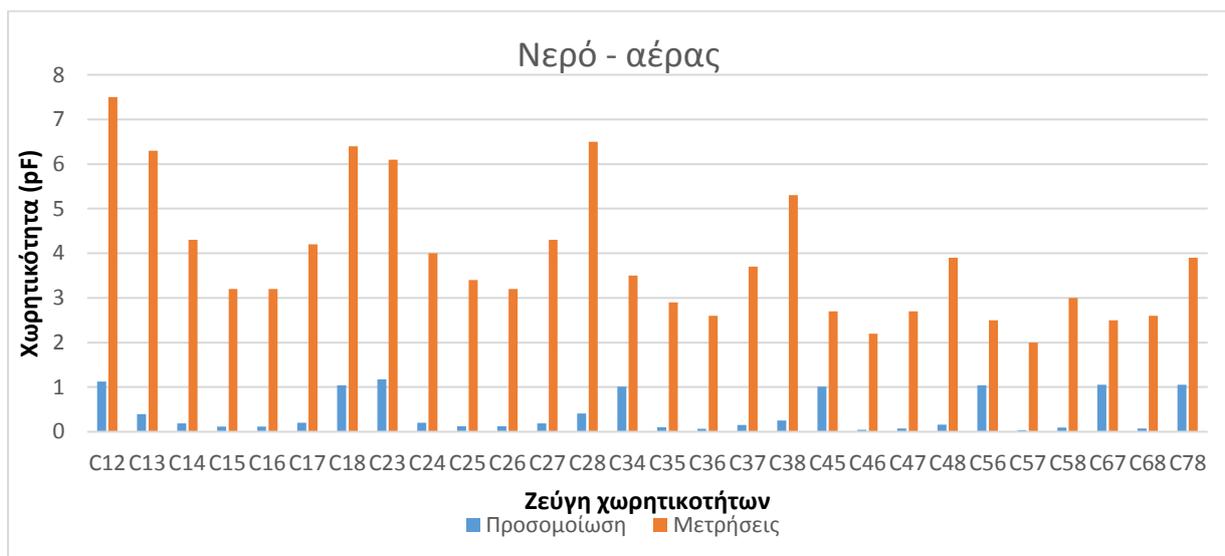
#### 7.2.2 Κατανομή νερό – αέρας

Στην επόμενη μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά το υλικό χαμηλότερης επιτρεπτότητας (αέρας) και το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας (νερό) με σταθερά  $\epsilon_r = 80$ . Η μέτρηση αυτή εκτελέστηκε για να μελετηθεί η συμπεριφορά του αισθητήρα όταν βρίσκονται στο εσωτερικό του τα υλικά με τις ακραίες τιμές επιτρεπτότητας. Η μέτρηση εκτελέστηκε στην ίδια διάταξη όπως και στην περίπτωση αέρα – πετρελαίου δηλαδή ο αισθητήρας είχε κλίση περίπου  $20^\circ$  μέσω της οποίας τα ηλεκτρόδια 1 και 2 βρίσκονται σε χώρο που είναι πλήρης με το υλικό υψηλότερης επιτρεπτότητας (νερό) ενώ τα ηλεκτρόδια 5 και 6 είναι εξ' ολοκλήρου στο υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας (αέρας) με τα υπόλοιπα να βρίσκονται σε ένα ποσοστό εντός και σε ένα άλλο εκτός. Η εικόνα του μοντέλου προσομοίωσης είναι η ακόλουθη:



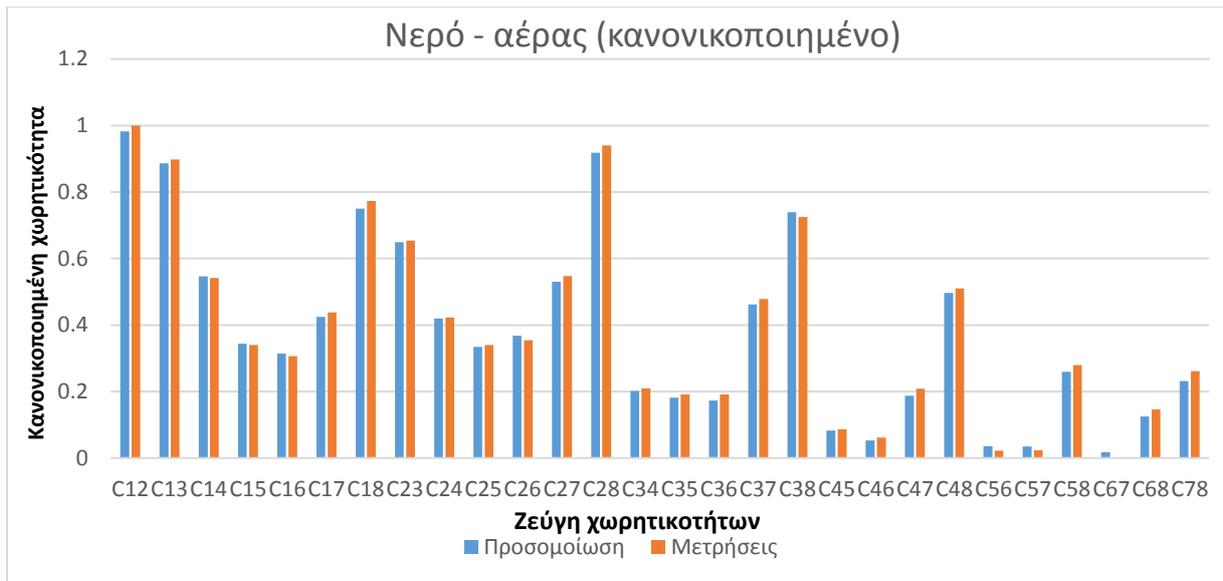
Σχήμα 7.7 Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή νερού - αέρα

Με τον ίδιο τρόπο εκτελέστηκαν οι σειρές μετρήσεων και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με εκείνα των προσομοιώσεων. Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:



Σχήμα 7.8 Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα (raw capacitances). Μέτρηση νερό - αέρας

Και σε αυτή την περίπτωση τα ζεύγη των ηλεκτροδίων που βρίσκονται στο όριο του χώρου με το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας. Η μεγαλύτερη χωρητικότητα παρατηρείται μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 2 ( $C_{12}$ ) ενώ αυξημένες είναι και οι χωρητικότητες μεταξύ των ηλεκτροδίων 1,2,3 και 8 τα οποία καλύπτουν περιοχή με υλικό υψηλής επιτρεπτότητας. Συγκριτικά με τις προσομοιώσεις παρατηρείται παρόμοια εικόνα με το προηγούμενο πείραμα, οι μετρούμενες χωρητικότητες είναι κατά πολύ μεγαλύτερες λόγω του νερού. Κανονικοποιώντας τις μετρήσεις εξάγονται τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 7.9 Κανονικοποιημένες χωρητικότητες νερό - αέρα



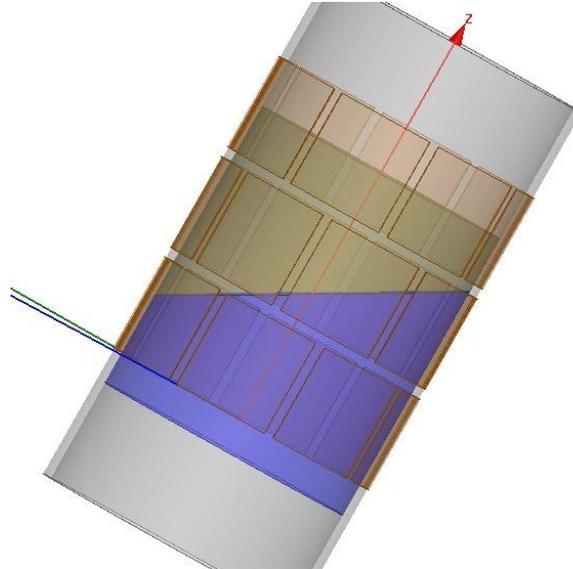
Σχήμα 7.10 Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση νερό – αέρας

Οι κανονικοποιημένες μετρήσεις παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά και στις προσομοιώσεις και στις μετρήσεις. Αντίστοιχα το μέγιστο σφάλμα δεν αυξάνεται πάνω από 0,03pF που είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερο από τις τιμές των χωρητικότητας. Τέλος παρατηρείται πως το σφάλμα δεν ακολουθεί κάποια συμπεριφορά ανάλογη του μεγέθους των χωρητικότητας όπως στην προηγούμενη μέτρηση. Ωστόσο, λόγω μικρού απόλυτου μεγέθους δεν αλλοιώνει τα αποτελέσματα.

### 7.2.3 Κατανομή νερό – πετρέλαιο

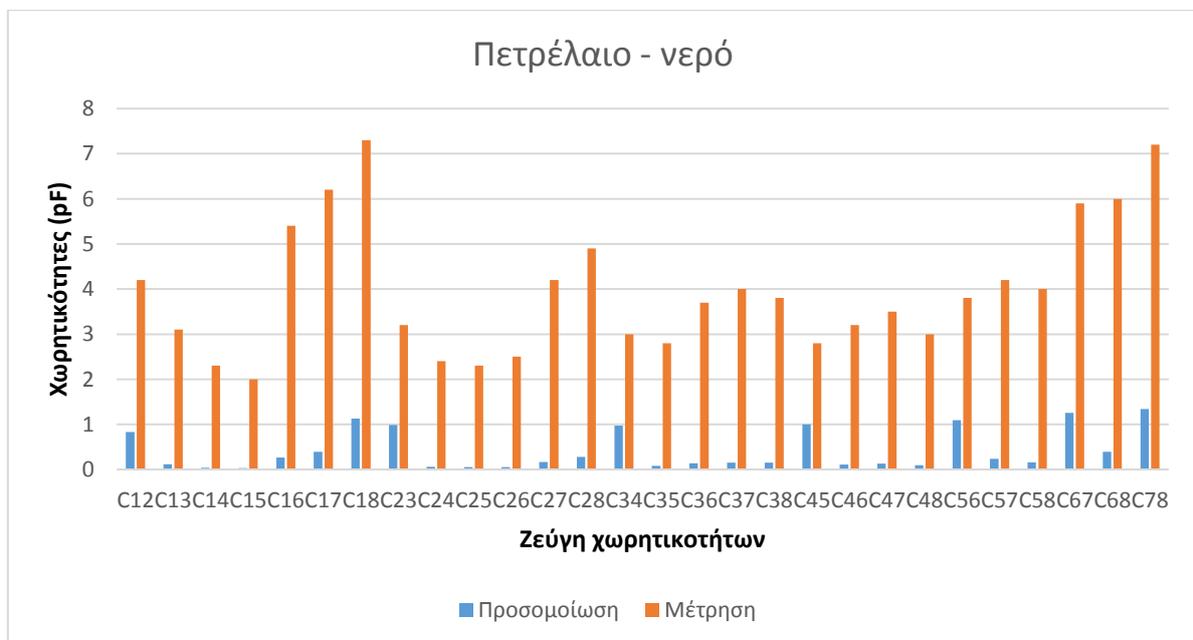
Στη τελευταία κατανομή εκτελέστηκε μια σειρά μετρήσεων μεταξύ των υλικών υψηλότερης επιτρεπτότητας που επιλέχθηκαν, ώστε να ελεγχθεί η λειτουργία του αισθητήρα με τη χρήση δύο υγρών υλικών. Η κλίση που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου 25° με το νερό

ως βαρύτερο υλικό να είναι κάτω και το πετρέλαιο στο πάνω μέρος. Βάσει της κατανομής τα ηλεκτρόδια 2 ως 5 βρίσκονται στο υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας (πετρέλαιο) ενώ τα ηλεκτρόδια 7 και 8 βρίσκονται στην περιοχή με υλικό υψηλής επιτρεπτότητας (νερό). Η κατανομή όπως σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 7.11 Διάταξη μέτρησης αισθητήρα με κατανομή πετρελαίου - νερού

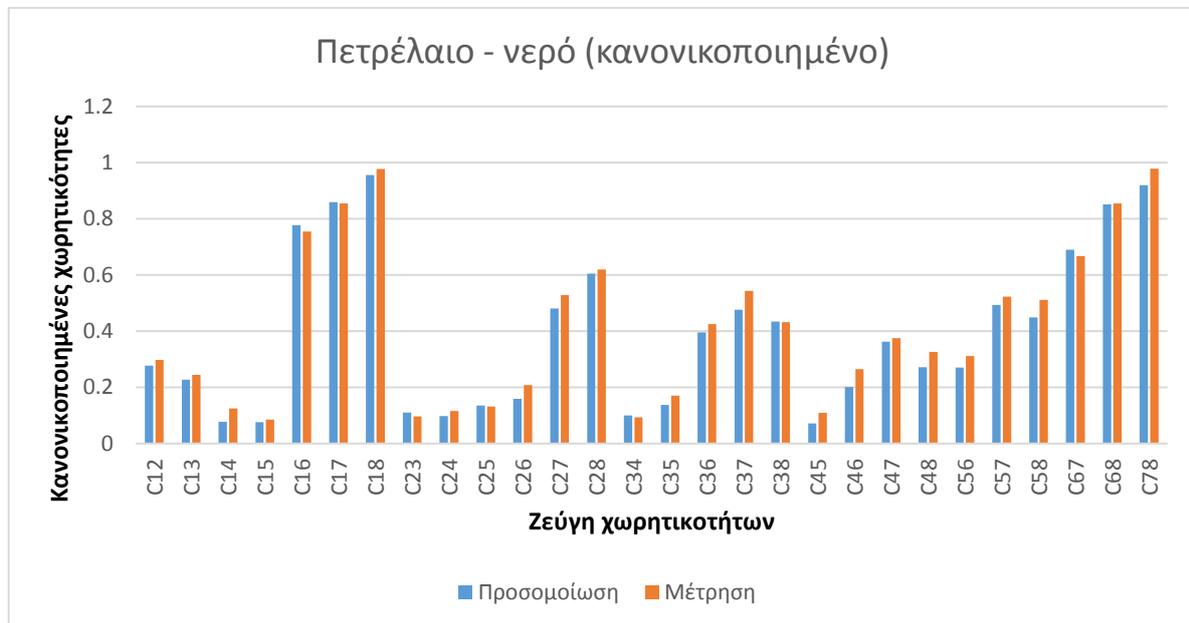
Στη συνέχεια, όπως και στις προηγούμενες σειρές μετρήθηκαν οι χωρητικότητες μέσω του *lock-in* ενισχυτή και έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπως παρουσιάζεται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 7.12 Μετρούμενες χωρητικότητες αισθητήρα (raw capacitances). Μέτρηση νερό – πετρέλαιο

Και σε αυτή τη μέτρηση παρατηρείται πως οι χωρητικότητες που περιλαμβάνουν τα ηλεκτρόδια 7 και 8 παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές λόγω του γεγονότος πως σε εκείνη την

περιοχή βρίσκεται το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας. Οι κανονικοποιημένες μετρήσεις αντίστοιχα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και φαίνεται πως οι χωρητικότητες που περιλαμβάνουν τα ηλεκτρόδια 6,7,8 είναι τέσσερις ως πέντε φορές μεγαλύτερες σε σχέση με τα υπόλοιπα γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη διαφορά της επιτρεπτότητας των υλικών.



Σχήμα 7.13 Κανονικοποιημένες χωρητικότητες πετρέλαιο - νερό

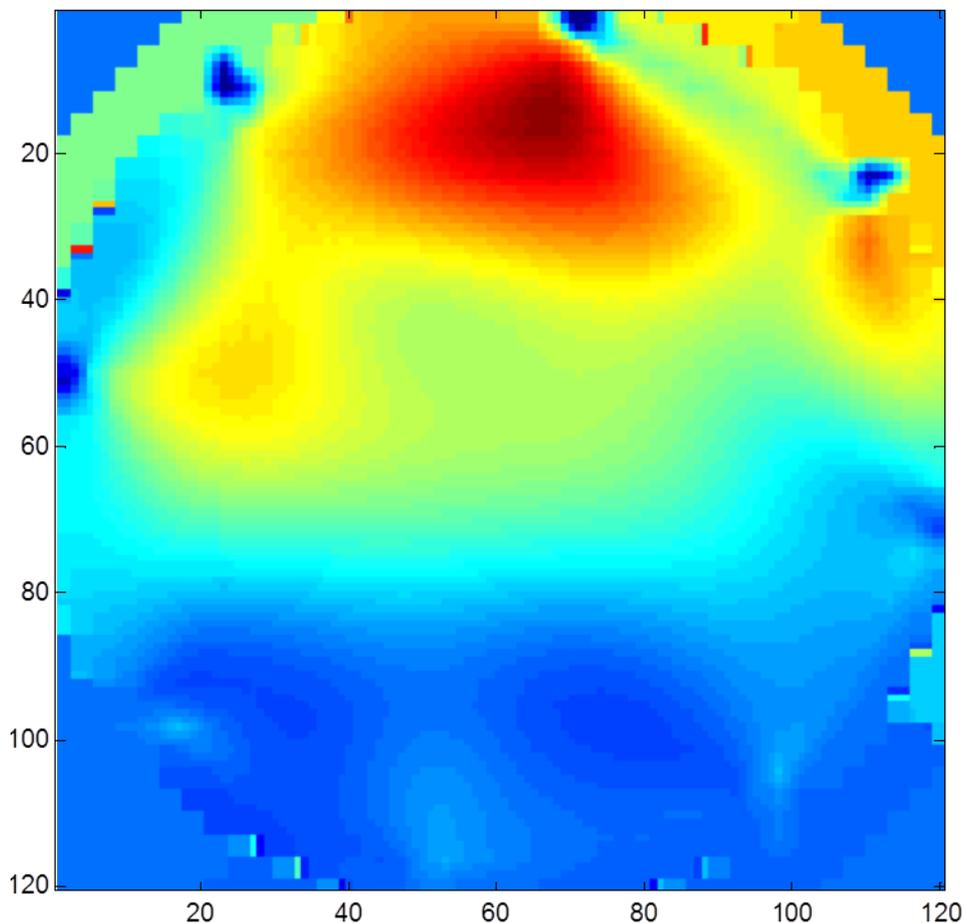
Σε ότι αφορά το σφάλμα μέτρησης η μέγιστη τιμή του δεν ξεπερνά τα 0,03pF τιμή που είναι πολύ μικρότερη από τις τιμές των χωρητικότητας. Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως στα ζεύγη χαμηλής χωρητικότητας το σχετικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο γεγονός που οφείλεται στο ασθενές ηλεκτρικό πεδίο στα υλικά χαμηλής επιτρεπτότητας καθώς το μετρούμενο σήμα είναι ασθενέστερο και περισσότερο ευαίσθητο στο θόρυβο.



Σχήμα 7.14 Απόλυτο σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Μέτρηση πετρέλαιο - νερό

### 7.3 Ανακατασκευή εικόνας – ψηφιακή απεικόνιση

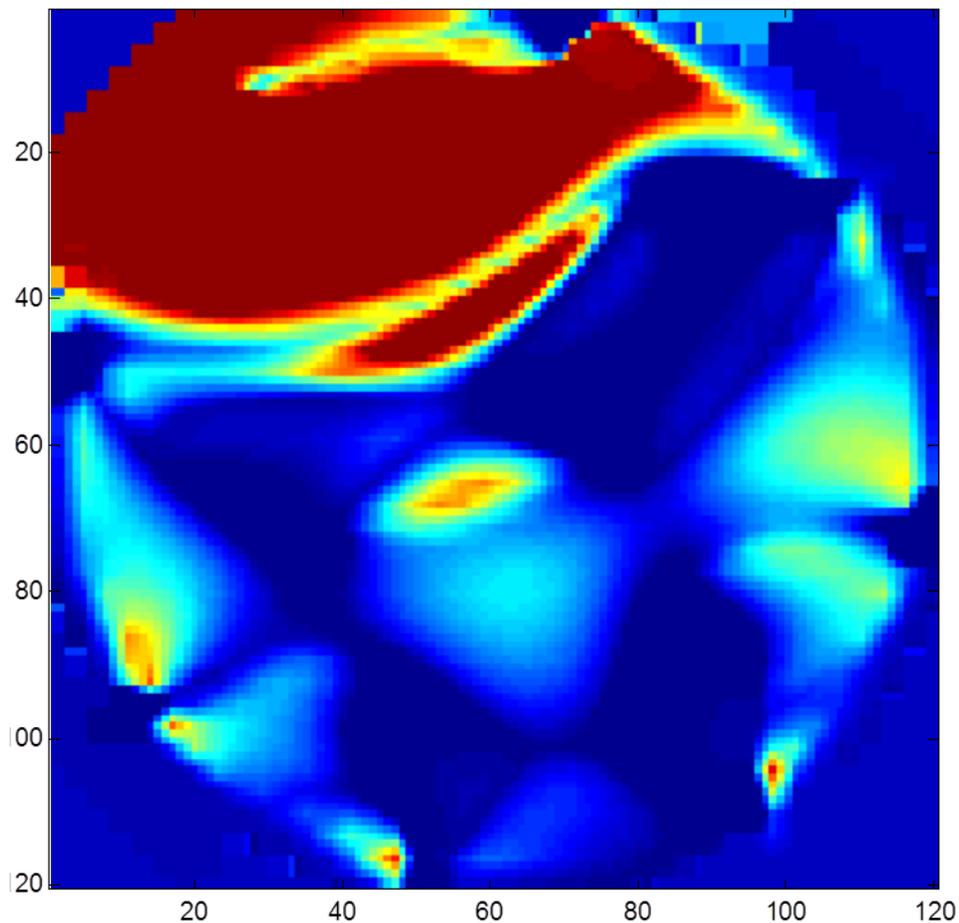
Η διαδικασία της ηλεκτρικής τομογραφίας στο τελικό στάδιο περιλαμβάνει την ψηφιακή απεικόνιση της τομής σε υπολογιστή. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος σε αλγόριθμο ψηφιακής απεικόνισης για την ανακατασκευή της εικόνας. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στο πακέτο του *matlab* “ECT2sim” το οποίο δίνει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης κατασκευής του μοντέλου για κυλινδρικές τοπολογίες αισθητήρα, έχει τη δυνατότητα εξαγωγής του πίνακα ευαισθησίας και προσφέρει όλα τα εργαλεία επεξεργασίας και απεικόνισης σε υπολογιστή χωρίς τη χρήση τρίτου λογισμικού. Η μέθοδος ανακατασκευής που επιλέχτηκε είναι η γραμμική μέθοδος πίσω προβολής (*Linear Back Projection*) και για τη γραμμικοποίηση του πίνακα ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *Tikhonov* που εξηγήθηκε στην παράγραφο 6.5.2. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα για τις τρεις παραπάνω σειρές μετρήσεων.



Σχήμα 7.15 Απεικόνιση τομής Μέτρηση πετρέλαιο – αέρας

Η εικόνα 7.16 αναφέρεται στη τοπολογία πετρελαίου και αέρα στο εσωτερικό του αισθητήρα. Από την εικόνα φαίνεται πως το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας (πετρέλαιο) βρίσκεται εντοπισμένο μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 2 και απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Αντίστοιχα στην περιοχή υψηλής ευαισθησίας των ηλεκτροδίων 7 και 8 που είναι γεμάτη με

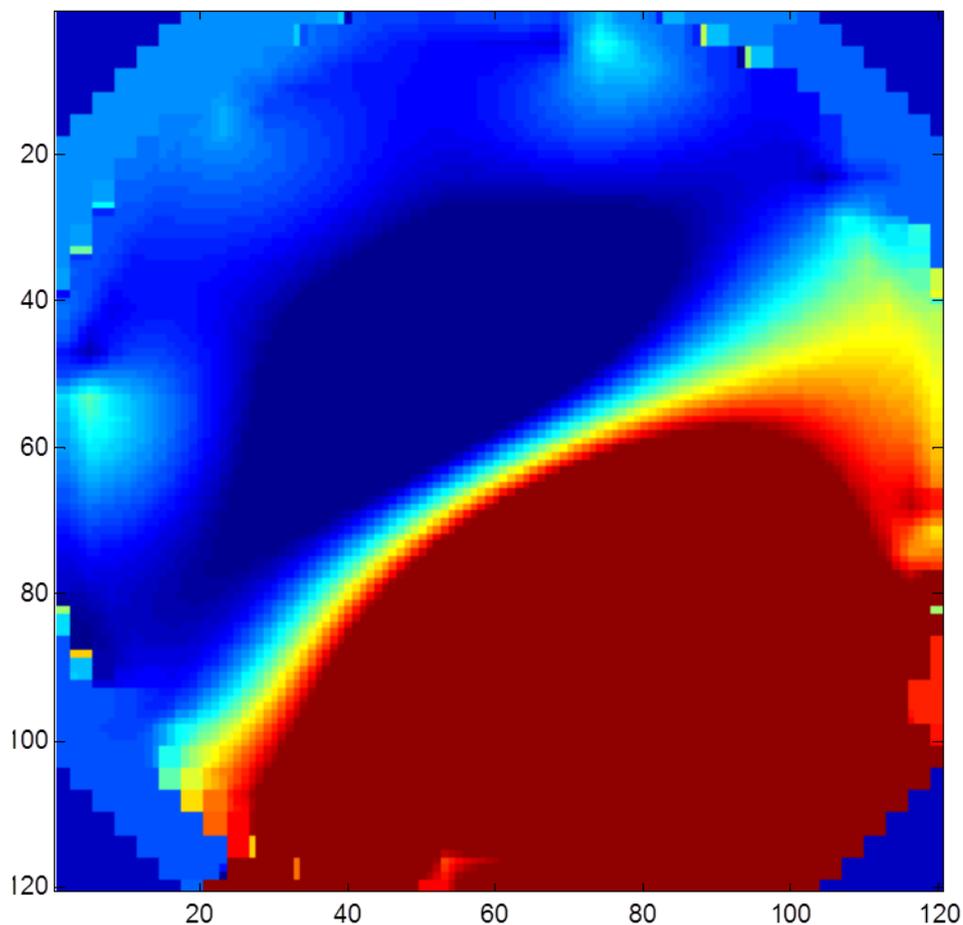
αέρα (χαμηλή επιτρεπτότητα) δεν παρατηρείται κάποια αλλοίωση. Στις ενδιάμεσες καταστάσεις φαίνεται πως το χρώμα ακολουθεί μια ομοιόμορφη προσαρμογή από κόκκινο σε μπλε χρώμα. Στις περιοχές κοντά στα ηλεκτρόδια 3 και 8 εμφανίζεται λίγο μεγαλύτερη συγκέντρωση ενώ στις περιοχές των ηλεκτροδίων 4 και 7 είναι μικρότερη. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η μικρή διαφορά της επιτρεπτότητας μεταξύ των δύο υλικών  $\epsilon_{r,αέρα} = 1$  και  $\epsilon_{r,πετρελαίου} = 2,3$ . Η μικρή αυτή διαφορά σε σημεία χαμηλότερης ευαισθησίας δεν είναι τόσο αισθητή με αποτέλεσμα να δίνει πιο θολές εικόνες. Επιπλέον, λόγω του γεγονότος πως τα ηλεκτρόδια έχουν πεπερασμένο μήκος στη κάθετη διάσταση του επιπέδου, υπάρχει μια αξονική συνιστώσα που επηρεάζει τις μετρήσεις η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στη μέθοδο ανακατασκευής.



Σχήμα 7.16 Απεικόνιση τομής. Μέτρηση νερό - αέρας

Η απεικόνιση που παρουσιάζεται στη 7.17 αναφέρεται στη μέτρηση νερού με αέρα στο χώρο της τομής. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται πως στην περιοχή των ηλεκτροδίων 1 και 2 το κόκκινο χρώμα είναι πολύ έντονο και είναι η περιοχή με το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας (νερό). Αντίστοιχα στην περιοχή χαμηλής επιτρεπτότητας (αέρας) παρατηρείται πως το χρώμα είναι βαθύ μπλε που καταδεικνύει περιοχή χαμηλής επιτρεπτότητας. Δύο συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι πως η μετάβαση από

το ένα υλικό στο δεύτερο είναι πολύ πιο διακριτή σε αυτή την περίπτωση καθώς η διαφορά του συντελεστή επιτρεπτότητας των υλικών είναι μεγάλη ( $\epsilon_{r,αέρα} = 1, \epsilon_{r,νερου} = 80$ ) με αποτέλεσμα να λαμβάνονται πιο ακριβή αποτελέσματα καθώς ο διαχωρισμός είναι πλέον πιο διακριτός. Επιπλέον, παρατηρούνται ορισμένες μικρές περιοχές υψηλής επιτρεπτότητας στον υπόλοιπο χώρο του αισθητήρα, κυρίως κοντά στα όρια του αισθητήρα όπου η ευαισθησία μέτρησης είναι πολύ μεγαλύτερη. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο πεπερασμένο μήκος των ηλεκτροδίων στην αξονική συνιστώσα, καθώς τα ηλεκτρόδια, πλην των 1 και 2, βρίσκονται σε ένα ποσοστό εντός του υλικού χαμηλής επιτρεπτότητας και εντός του υλικού υψηλής επιτρεπτότητας. Αυτό το φαινόμενο, με το γεγονός πως η επιτρεπτότητα μεταξύ των υλικών παρουσιάζει μεγάλη διαφορά, προκαλεί αυξημένη τιμή στις μετρήσεις κοντά στα όρια όπου και η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη.

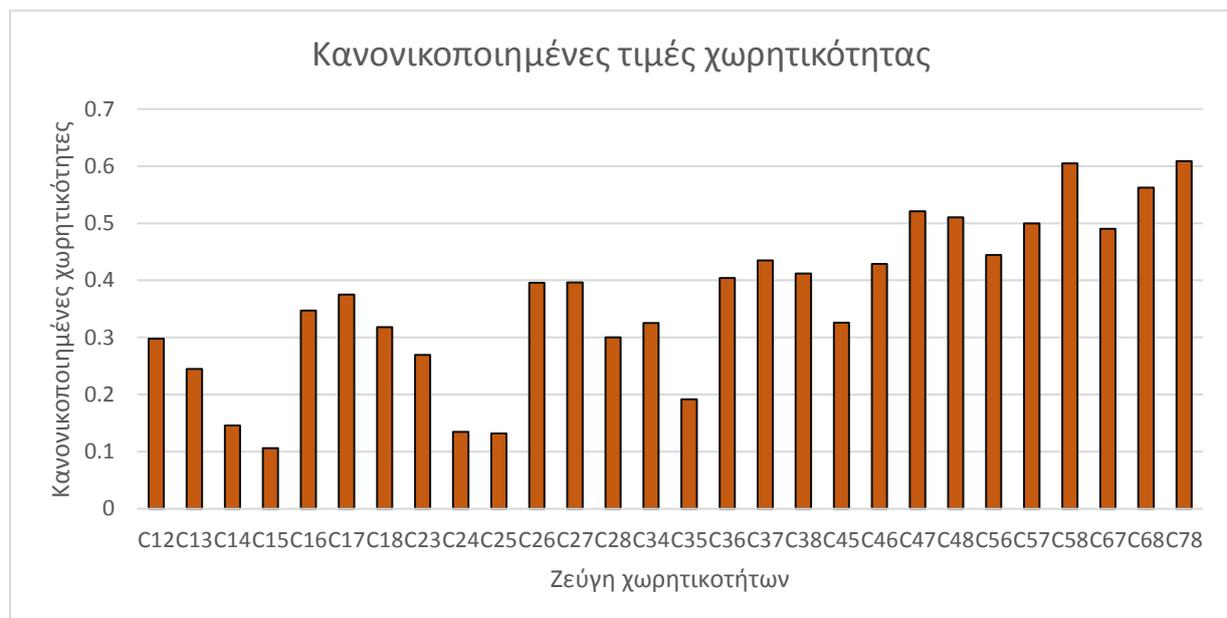


Σχήμα 7.17 Απεικόνιση τομής. Μέτρηση νερό – πετρέλαιο

Στη τελευταία απεικόνιση 7.18 μεταξύ πετρελαίου και νερού παρουσιάζεται μια παρόμοια εικόνα όπως σε αυτή μεταξύ νερού και αέρα. Υπάρχει μια περιοχή με έντονο κόκκινο μεταξύ των ηλεκτροδίων 7 και 8 όπου βρίσκεται το υλικό υψηλής επιτρεπτότητας. Ωστόσο παρατηρείται πως στην περιοχή του ορίου που βρίσκεται στην περιοχή ευαισθησίας των ηλεκτροδίων 1 και 6 εμφανίζεται με έντονο κόκκινο ενώ δεν είναι όλη η περιοχή γεμάτη με

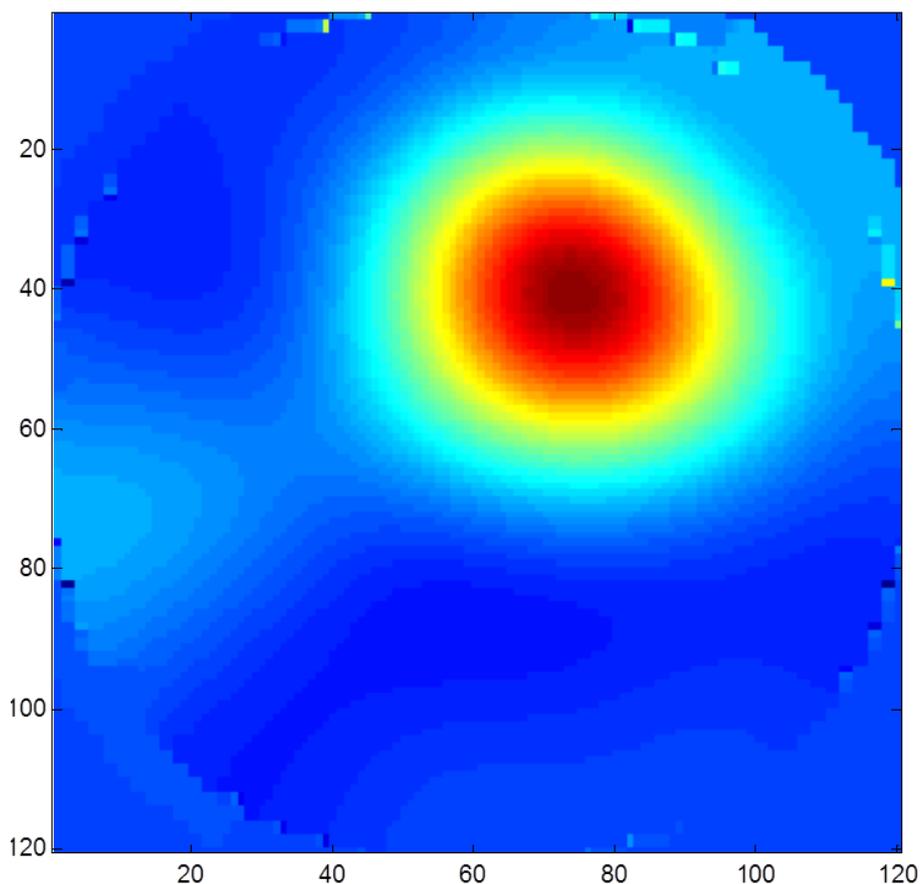
νερό. Αυτό οφείλεται στη αξονική συνιστώσα του πεδίου η οποία όπως και παραπάνω επηρεάζει την απεικόνιση. Συγκεκριμένα επειδή τα ηλεκτρόδια 1 και 6 βρίσκονται κατά το ήμισυ στο ένα υλικό και κατά το ήμισυ στο άλλο, υπερισχύει το υλικό υψηλότερης επιτρεπτότητας που επηρεάζει τις μετρήσεις. Στην περιοχή κοντά στα ηλεκτρόδια φαίνεται πως το χρώμα αλλάζει γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη ευαισθησία της περιοχής που προσφέρει καλύτερες μετρήσεις και πιο λεπτομερή απεικόνιση.

Τέλος εκτελέστηκε μια σειρά μέτρησης για την εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας της μεθόδου σε περίπτωση που υπάρχει ένα μικρό αντικείμενο υλικού υψηλής επιτρεπτότητας μέσα στο υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας. Για τη μέτρηση που εκτελέστηκε χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός πετρελαίου και νερού, με το πετρέλαιο να γεμίζει την περιοχή της τομής και το νερό να βρίσκεται με τη μορφή πάγου σε ένα σταθερό σημείο στην περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων 6 και 7. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν με τον ίδιο τρόπο με τις προηγούμενες και τα αποτελέσματα τους παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:



**Σχήμα 7.18** Κανονικοποιημένες τιμές χωρητικότητας. Μέτρηση με μικρό αντικείμενο υψηλής επιτρεπτότητας σε περιοχή με υλικό χαμηλής επιτρεπτότητας.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρείται μια αυξημένη τιμή στα ζεύγη που περιλαμβάνουν τα ηλεκτρόδια 6 και 7. Γενικά οι κανονικοποιημένες χωρητικότητες όλων των υπόλοιπων ηλεκτροδίων με τα 6 και 7 έχει την υψηλότερη τιμή που καταδεικνύει την ύπαρξη υλικού υψηλής επιτρεπτότητας. Να σημειωθεί πως οι τελευταίες μετρήσεις δεν έδωσαν ιδανικά αποτελέσματα καθώς ο όγκος του πάγου μειωνόταν λόγω θερμοκρασίας. Η απεικόνιση της τομής που έγινε στο *Matlab* είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 7.19 Απεικόνιση τομής. Μέτρηση κομμάτι πάγου μέσα σε φάση πετρελαίου

Στην παραπάνω τομή το αντικείμενο με υλικό υψηλής επιτρεπτότητας απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ το πετρέλαιο με μπλε. Παρατηρείται πως το σχήμα του υλικού δεν καθορίζεται από τη τομή γεγονός που οφείλεται στη μέτρια χωρική ανάλυση της μεθόδου, στον αλγόριθμο απεικόνισης (LBP) καθώς και στο σφάλμα των μετρήσεων λόγω της μετατροπής του πάγου σε νερό κατά τη διάρκεια λήψης των μετρήσεων. Παρόλα αυτά η απεικόνιση είναι ακριβής ως προς τη θέση και το μέγεθος του αντικειμένου. Σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου τα παραπάνω προβλήματα θα είχαν σημαντικά μειωθεί καθώς ο χρόνος μετρήσεων είναι πολύ μικρότερος.



## 8 Θέματα για περαιτέρω μελέτη

Η παρούσα εργασία είχε ως σκοπό τη μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συνολική απόδοση ενός συστήματος ηλεκτρικής τομογραφίας. Κατά τη διάρκεια της εργασίας εξετάστηκαν όλες εκείνες οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην απόδοση της μεθόδου όπως η επίλυση των ορθών και ανάστροφων μοντέλων, η μέθοδος ανακατασκευής της εικόνας, τα ηλεκτρονικά μετρητικά συστήματα και η τοπολογία των ηλεκτροδίων περιμετρικά του αισθητήρα. Σε κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους επιλέχθηκαν λύσεις οι οποίες βελτιστοποιούν την απόδοση χωρίς ωστόσο να προσφέρουν ολοκληρωτική επίλυση των ζητημάτων που ανακύπτουν από τη χρήση της τεχνολογίας της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η έρευνα σε όλους τους τομείς είναι συνεχόμενη και εξετάζονται νέες μέθοδοι που λύνουν ορισμένα από τα προβλήματα απόδοσης εισάγοντας αντίστοιχα κάποια άλλα. Παρόλο που η έρευνα στη βελτίωση και της υπάρχουσας τεχνολογίας πρέπει να συνεχιστεί σε όλους τους τομείς, τα κύρια σημεία που χρήζουν μεγαλύτερης βαρύτητας παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 8.1 Επίλυση ορθού προβλήματος με τη χρήση νευρωνικών δικτύων στο τρισδιάστατο χώρο

Η μη γραμμική και μη καλώς ορισμένη φύση του προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας σήμερα επιλύεται με επαναληπτικές μεθόδους. Ως σήμερα οι έρευνες επικεντρώνονται κυρίως σε δισδιάστατες τοπολογίες για την επίλυση του ορθού και ανάστροφου προβλήματος. Στην εργασία παρουσιάστηκε η μέθοδος που βασίζεται στη χρήση του πίνακα ευαισθησίας για την επαναληπτική επίλυση του ορθού προβλήματος. Ως ένα βαθμό είναι επιτυχής, ωστόσο η μη γραμμική φύση του προβλήματος όταν χρειαστεί να επεκταθεί σε τρισδιάστατο χώρο επιδεινώνεται γεγονός που μειώνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του συστήματος. Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη τρισδιάστατη απεικόνιση είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός αγνώστων μεταβλητών για τον ίδιο αριθμό μετρήσεων, συγκριτικά με τη δισδιάστατη απεικόνιση. Το πρόβλημα της τρισδιάστατης απεικόνισης γίνεται ακόμα πολυπλοκότερο εισάγοντας και την αξονική συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου η οποία θεωρείται ομοιογενής στη δισδιάστατη απεικόνιση.

Από τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει ανάγκη για μια μέθοδο τρισδιάστατης απεικόνισης η οποία θα είναι γρήγορη στην επίλυση και μη γραμμική. Γι' αυτό το λόγο τα νευρωνικά δίκτυα προσοτροφodότησης πρέπει να εξεταστούν για την απλότητα και τη ταχύτητα που προσφέρουν. Να σημειωθεί πως για να είναι εφαρμόσιμα τα νευρωνικά δίκτυα σε τρισδιάστατες τοπολογίες θα πρέπει να μελετηθούν οι παράμετροι βελτιστοποίησης για τη καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση της μεθόδου.

## 8.2 Σχεδίαση τρισδιάστατου αισθητήρα

Στη τρισδιάστατη απεικόνιση τα υλικά μέρη του συστήματος παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο. Στην παρούσα εργασία έγινε αναφορά σε ορισμένες τοπολογίες ηλεκτροδίων και εξετάστηκαν ορισμένες κατασκευαστικές παράμετροι όπως το μήκος και το πλάτος των ηλεκτροδίων, το σχήμα και η επιμέρους απόσταση του ενός από του άλλου. Παρ' όλα αυτά η εύρεση της κατάλληλης τοπολογίας αισθητήρα για την κάθε εφαρμογή είναι μια επίπονη και δύσκολη διαδικασία και απαιτεί τη μελέτη πολλών και διαφορετικών τοπολογιών για τη κατανόηση του προβλήματος. Ο απλούστερος τρόπος για την επίλυση ενός τέτοιου ζητήματος είναι η εισαγωγή προσαρμοστικών αισθητήρων ικανών να αλλάζουν τη τοπολογία τους ανάλογα με την εφαρμογή. Ο ευκολότερος τρόπος είναι η εισαγωγή ενός μεταβλητού πεδίου στην αξονική συνιστώσα αλλάζοντας κάθε φορά τον αριθμό των ενεργών επιπέδων ηλεκτροδίων στον αισθητήρα. Άλλη μέθοδος είναι η χρήση προσαρμοστικών αισθητήρων τρισδιάστατης τομογραφίας οι οποίοι έχουν την ικανότητα να αλλάζουν το σχήμα των ηλεκτροδίων και τον αριθμό των ενεργών επιπέδων ηλεκτρονικά. Ένας τέτοιος αισθητήρας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 8.1 Σχέδιο προσαρμοστικού αισθητήρα

Καθένα από τα ηλεκτρόδια αποτελεί ένα στοιχειώδες ηλεκτρόδιο τα οποία ηλεκτρονικά συνδέονται σχηματίζοντας τοπολογίες και μεταφέρουν συνδυαστικά το σήμα. Σημαντικό είναι το γεγονός πως κάθε τοπολογία θα έχει και το δικό της πίνακα ευαισθησίας. Έτσι ένα επιπλέον πρόβλημα είναι η εύρεση κάθε φορά του κατάλληλου πίνακα ευαισθησίας. Το παραπάνω ζήτημα επιλύεται με το συνδυασμό των πινάκων μεταξύ απλούστερων τοπολογιών.

### 8.3 Ηλεκτρική τομογραφία με χρήση πολλαπλών μεθόδων.

Η κλασική μέθοδος ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιεί για την απεικόνιση την επιτρεπτικότητα των υλικών μέσω μέτρησης της χωρητικότητας. Η ποιότητα της ανακατασκευασμένης εικόνας επηρεάζεται από πολλές διαφορετικές παραμέτρους με αποτέλεσμα να εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Μια άλλη προσέγγιση που μπορεί να ακολουθήσει η παραπάνω τεχνολογία βασίζεται στη χρήση πολλαπλών μεθόδων τομογραφίας παράλληλα με σκοπό την παρακολούθηση πολύπλοκων βιομηχανικών διαδικασιών που περιλαμβάνουν πολλά διαφορετικά υλικά (*multi-modal tomography*). Μια κλασική περίπτωση εφαρμογής είναι η παρακολούθηση ροής πετρελαίου σε πηγάδι εξόρυξης. Το μίγμα που εξάγεται περιέχει αέρια, υγρά και στερεά υλικά με αποτέλεσμα η ηλεκτρική τομογραφία από μόνη της ως μέθοδος να μην είναι επαρκής για τις ανάγκες της εφαρμογής. Σήμερα έχουν προταθεί τρεις προσεγγίσεις παράλληλης τομογραφίας σε συστήματα πολυφασικής ροής:

1. Με τη χρήση δύο διαφορετικών αισθητήρων ενός ηλεκτρικού και ενός αισθητήρα ακτινών γ. Ο ηλεκτρικός τομογράφος χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της κατανομής του νερού που έχει πολύ μεγάλη επιτρεπτικότητα συγκριτικά με το πετρέλαιο ενώ ο αισθητήρας ακτινών γ χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ πετρελαίου και αερίου. Η μέθοδος υποφέρει από μεγάλη πολυπλοκότητα, κόστος και ταχύτητα στην απεικόνιση καθώς τα ηλεκτρονικά των αισθητήρων θα πρέπει να συνεργάζονται και τα δεδομένα, τα οποία είναι αρκετά μεγάλα σε αριθμό, να τροφοδοτούνται στο σύστημα ανακατασκευής της εικόνας σε πραγματικό χρόνο.
2. Με τη χρήση ενός εκ φύσεως πολλαπλού συστήματος τομογραφίας, όπως η χρήση ενός αισθητήρα ηλεκτρικής εμπέδησης που έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης επιτρεπτικότητας και αγωγιμότητας.
3. Με χρήση πολύπλοκου συστήματος ανακατασκευής της εικόνας όπως αυτό που αναλύθηκε στην παράγραφο 5.5.4 μέσω της χρήσης νευρωνικών δικτύων μέσω της πολυκριπιακής τεχνικής ανακατασκευής. Ωστόσο αυτή η προσέγγιση περιορίζει την ικανότητα του αισθητήρα μόνο στο μετρούμενο σήμα.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται σε αυτού του τύπου προσέγγιση είναι κυρίως στο σύστημα μέτρησης των αισθητήρων. Ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός για αυτή τη τεχνολογία είναι η ανάπτυξη ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης ικανών για παράλληλη μέτρηση των αισθητήρων όπως για παράδειγμα την παράλληλη μέτρηση χωρητικότητας και ισχύος ή πυκνότητας του υλικού.

Επιπλέον, για την ανακατασκευή της εικόνας θα χρειαστεί να κατασκευαστούν συνδυαστικοί πίνακες ευαισθησίας για καθένα από τα μετρούμενα μεγέθη βασισμένοι στις υπάρχουσες μεθόδους για καθεμιά από τις τυπικές τοπολογίες. Επίσης λόγω του γεγονότος πως ορισμένα από τα μεγέθη που μετρώνται είναι συσχετισμένα μεταξύ τους, όπως η ηλεκτρική ισχύς και η χωρητικότητα δίνεται η δυνατότητα για πιθανές νέες μη γραμμικές μεθόδους ανακατασκευής με καλύτερα πιθανά αποτελέσματα.

## Βιβλιογραφία

- [1] Jose da Silva M., M.S.E.E, Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging, Electrical and Computer Engineering Department at the Technische Universität Dresden, May 2008.
- [2] Kjærsgaard-Rasmussen J., Inside-out electrical capacitance tomography for downhole multiphase flow evaluation, Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark, April 2010.
- [3] Hewitt G.F. 1999 Introduction and basic models, p. 197-203. In: Handbook of Phase Change, Boiling and Condensation, S.G. Kandlikar, M. Shoji and V.K. Dhir (eds), Philadelphia: Taylor & Francis.
- [4] Hewitt G.F. 2005 Three-phase gas–liquid–liquid flows in the steady and transient states. Nuclear Engineering and Design 235 1303–1316.
- [5] Wörner M. 2003 A compact introduction to the numerical modeling of multiphase flows. Report Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6932.
- [6] Crowe C.T. (ed) 2006 Multiphase Flow Handbook. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.
- [7] Ghajar A.J. 2005 Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes: a tutorial. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 27 46-73.
- [8] Delhay J.M., Giot M., and Riethmuller M.L. 1981 Thermohydraulics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering. New York: McGraw Hill.
- [10] Cartellier A. and Achard J.L. 1990 Local phase detection probes in fluid/fluid two phase flows. Review of Scientific Instruments 62 279-303.
- [11] Kim S. and Ishii M. 2001 Micro four-sensor probe measurement of interfacial area transport for bubbly flow in round pipes. Nuclear Engineering and Design 205 123–131.
- [12] Ceccio S.L. and D.L. George 1996 A review of electrical impedance techniques for the measurement of multiphase flows. Journal Fluids Engineering 118 391-399.
- [13] Tsochatzidis N.A., Karapantios T.D., Kostoglou M.V., and Karabelas A.J. 1992 A conductance method for measuring liquid fraction in pipes and packed beds. International Journal of Multiphase Flow 5 653–667.
- [14] Fossa M. 1998 Design and performance of a conductance probe for measuring liquid fraction in two-phase gas-liquid flow. Flow Measurement and Instrumentation 9 103-109.
- [15] Corneliussen S., Couput J.-P., Dahl E., Dykesteen E., Frøysa K.-E., Malde E., Moestue . Moksnes P., Scheers L., and Tunheim H. 2005 Handbook of Multiphase Flow Metering, Rev.2, The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement and The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals.
- [16] Baker R.C. 2000 Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- [17] Babelli I.M.M. In search of an ideal multiphase flow meter for the oil industry. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2002, 27 113-126.
- [18] Falcone G., Hewitt G.F., Alimonti C., and Harrison B. 2002 Multiphase flow metering: Current trends and future developments. *Journal of Petroleum Technology* 54 77–84.
- [19] Yeung H. 2007 Multiphase flow measurement - the holy grail. In: *SENSOR Conference 2007 Proceedings I*, May 2007, Nurnberg, Germany, p. 193-197.
- [20] Dyakowski T., Jeanmeure L.F.C., and Jaworski A.J. 2000 Applications of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows - a review. *Powder Technology* 112 174-192.
- [21] Chaouki J., Larachi F., and Dudukovic M.P. 1997 Noninvasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 36 4476-4503.
- [22] Williams R.A. and Jia X. 2003 Tomographic imaging of particulate systems. *Advanced Powder Technology* 14 1-16.
- [23] Heindel T.J., Gray J.N., and Jensen T.C. 2008 An X-ray system for visualizing fluid flows. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- [24] Hampel U., Bieberle A., Hoppe D., Kronenberg J., Schleicher E., Suhnel T., Zimmermann F., and Zippe C. 2007 High resolution gamma ray tomography scanner for flow measurement and non-destructive testing applications. *Review of Scientific Instruments* 78 103704.
- [25] Hori K., Fujimoto T., and Kawanishi K. 1998 Development of ultra-fast X-ray computed tomography scanner system. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 45 2089-2094.
- [26] Hussein E.M.A., Meneley D.A., and Banerjee S. 1986 Single exposure neutron tomography of two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow* 12 1-36.
- [27] Mantle M.D. and Sederman A.J. 2003 Dynamic MRI in chemical process and reaction engineering. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 43 3-60.
- [28] Parker D.J. and McNeil P.A. 1996 Positron emission tomography for process applications. *Measurement Science and Technology* 7 287–296.
- [29] Rzasa M.R. and Plaskowski A. 2003 Application of optical tomography for measurements of aeration parameters in large water tanks. *Measurement Science and Technology* 14 199-204.
- [30] Ruzairi A.R. and Chan K.S. 2004 Optical tomography system for process measurement using light emitting diodes as a light source. *Optical Engineering* 43 1251-1257.
- [31] Hindle F.P., Carey S.J., Ozanyan K., Winterbone D.E., Clough E., and McCann H. 2001 Measurement of gaseous hydrocarbon distribution by a near-infrared absorption tomography system. *Journal of Electronic Imaging* 10 593-600.
- [32] Hoyle B.S. 1996 Process tomography using ultrasonic sensors. *Measurement Science and Technology* 7 272–280.

- [33] Yang M., Schlaberg H.I., Hoyle B.S., Beck M.S., and Lenn C. Real-time ultrasound process tomography for two-phase flow imaging using a reduced number of transducers IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1999, 6 492-501.
- [34] Rahiman M.H.F., Rahim R.A., Rahiman M.H.F., and Tajjudin M. 2006 Ultrasonic transmission-mode tomography imaging for liquid/gas two-phase flow. IEEE Sensors Journal 6 1706 - 1715.
- [35] Prasser H.-M., Böttger A., and Zschau J. 1998 A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. Flow Measurement and Instrumentation 9 111-119.
- [36] Prasser H-M. 2008 Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation Nuclear Engineering and Design 238 744-770.
- [37] Dorf R.C. (ed) 2000 The Electrical Engineering Handbook Boca Raton: CRC Press LLC.
- [38] Macdonald J.R. 1987 Impedance Spectroscopy. New York: John Wiley & Sons.
- [39] Buckley F. and Maryott A.A. 1958 Tables of Dielectric Dispersion Data for Pure Liquids and Dilute Solutions. U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Circular 589, 1958, USA.
- [40] Folgerø K. 1998 Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 47 881-885.
- [41] R.Wajman, R. Banasiak, L. Mazurkiewicz, T. Dyakowski, and D. Sankowski. Spatial imaging with 3D capacitance measurements. MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY, 17(8):2113–2118, AUG 2006.
- [42] M.A. Nurge. Electrical capacitance volume tomography with high contrast dielectrics using a cuboid sensor geometry. MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY, 18(5):1511–1520, MAY 2007.
- [43] S.M. Huang, A.B. Plaskowski, C.G. Xie, and M.S. Beck. Capacitance-based tomographic flow imaging system. Electronics Letters, 24(7):418–419, 1988.
- [44] C.G. Xie, A. Plaskowski, and M.S. Beck. 8-electrode capacitance system for 2-component flow identification .1. Tomographic flow imaging. IEEE PROCEEDINGS-A-SCIENCE MEASUREMENT AND TECHNOLOGY, 136(4):173 – 183, JUL 1989.
- [45] S.M. Huang, C.G. Xie, R. Thorn, D. Snowden, and M.S. Beck. Design of Sensor Electronics for Electrical Capacitance Tomography. IEE PROCEEDINGS-G CIRCUITS DEVICES AND SYSTEMS, 139(1):83–88, FEB 1992.
- [46] S.M. Huang, R.G. Green, A. Plaskowski, and M.S. Beck. A High-Frequency Stray-Immune Capacitance Transducer Based on The Charge-Transfer Principle. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, 37(3):368 – 373, SEP 1988.
- [47] W.Q. Yang. Further developments in an ac-based capacitance tomography system. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 72(10):3902–3907, OCT 2001.

- [48] K.J. Alme and S. Mylvaganarn. Electrical capacitance tomography - Sensor models, design, simulations, and experimental verification. IEEE SENSORS JOURNAL, 6(5):1256–1266, OCT 2006.
- [49] W.Q. Yang and L Peng. Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography. Measurement Science and Technology, 14(1):R1–R13, 2003.
- [50] Jing Lei, Shi Liu, Zhihong Li, and Meng Sun. An image reconstruction algorithm based on the extended Tikhonov regularization method for electrical capacitance tomography. MEASUREMENT, 42(3):368–376, APR 2009.
- [51] J.D. Jang, S.H. Lee, K.Y. Kim, and B.Y. Choi. Modified iterative Landweber method in electrical capacitance tomography. MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY, 17(7):1909–1917, JUL 2006.
- [52] G. Lu, L. Peng, B. Zhang, and Y. Liao. Preconditioned landweber iteration algorithm for electrical capacitance tomography. Flow Measurement and Instrumentation, 16(2 - 3):163 – 167, 2005. Tomographic Techniques for Multiphase Flow Measurements.
- [53] Manucher Soleimani. Numerical modelling and analysis of the forward and inverse problem sin electrical capacitance tomography. International journal of information and system sciences 2005 Institute for Scientific Computing and Information Computing and Information. June 22, 2005.
- [54] Jérôme Lucas, Cédric Margo, Yacine Oussar and Stéphane Holé. Spatial Resolution in Electrical Capacitance Tomography. Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (LPEM). PSL Research University, ESPCI - ParisTech – Sorbonne Universités, March 5, 2015.
- [55] Fei Wang, Qussai Marashdeh, Liang-Shih Fan, Warsito Warsito. Electrical Capacitance Volume Tomography: Design and Applications. William G. Lowrie Department of Chemical and Biomolecular Engineering, the Ohio State University, 140 West 19th Avenue, Columbus, OH 43210, USA. ISSN 1424-8220. 9 March 2010
- [56] Williams, R.A.; Beck, M.S. Process tomography: principles, techniques, and applications. Butterworth-Heinemann: Boston, MA, USA, 1995; pp. 581-588.
- [57] Warsito, W.; Marashdeh, Q.; Fan, L.S. Electrical Capacitance Volume Tomography (ECVT). IEEE Sens. J. 2007, 7, 525-535.
- [58] Du, B.; Warsito, W.; Fan, L.S. Bed Nonhomogeneity in Turbulent Gas-Solid Fluidization. AIChE J. 2003, 49, 1109-1126.
- [59] Process tomography Ltd. Electrical capacitance tomography system type TFL R5000 Operating Manual. Issue 1 Volume 1 fundamentals of ECT. December 2009.
- [60] Silviu Folea. Practical Applications and Solutions Using LabVIEW Software July, 2011
- [61] Building a lock-in amplifier, Princeton University.  
<https://www.princeton.edu/~romalis/PHYS312/Lock-in%20amplifier.pdf>
- [62] Ηλεκτρονικά Φίλτρα. Ενεργά – παθητικά, θεωρία, σύνθεση και σχεδίαση. Ηρακλής Δ. Δημόπουλος, 2009 ISBN 978-960-92405-1-2.
- [63] Thomas Kugelstadt, Active Filter design Techniques. Literature Number SLOD006A.

- [64] Jim Kark, Active Low-pass filter design. Application repost SLOA049B – Σεπτέμβριος 2002.
- [65] Qussai Marashdeh, Advanced in electrical capacitance tomography. Ohio state university 2006.
- [66] A. N. Tikhonov and V. Y. Arsenin. Solutions of Ill-posed problems. Washington, DC: Winston, First edition, 1977.
- [67] W.; Warsito and L-S Fan. “Neural network based multi-criterion optimization image reconstruction technique for imaging two- and three-phase flow systems using electrical capacitance tomography”. Meas. Sci. Technol., 12:2198–2210, (2001).
- [68] N. Reinecke and D. Mewes. “Resolution enhancement for multi-electrode capacitance sensors”. Proc, 1st ECAPT conf., March:Manchester, (1992).
- [69] O. Isaksen and J. Nordtvedt. “Capacitance tomography: reconstruction based on optimization theory”. Proc, 1st ECAPT conf., March:Manchester, (1992).
- [70] J. Hopfield. “Neurons with graded response have collective computation properties like those of two-state neurons”. Proc. Natl. Acad., 81:3088–3092, (1984).
- [71] J. Hopfield and D. Tank. “Neural computation of decisions in optimization problem”. Biol. Cybern., 52:141–152, (1985).