



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Πειραματική διερεύνηση μαγνητοϋδροδυναμικών ροών με  
χρήση της τεχνικής 2D-PIV**

**Experimental investigation of magnetohydrodynamic flows  
using the 2D-PIV technique**

**Διπλωματική Εργασία**

**Μαθιουλάκη Αντωνίας-Σπυριδούλας**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Σαρρής Ιωάννης**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2021**

## Εξεταστική Επιτροπή

Ιωάννης Σαρρής

Καθηγητής

Εμμανουήλ Προεστάκης

Λέκτορας Εφαρμογών

Ζωή Κανετάκη

Λέκτορας Εφαρμογών

### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαθιουλάκη Αντωνία-Σπυριδούλα τοῦ Δημητρίου με αριθμό μητρώου 46264 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».



Η Δηλούσα

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας μελετήθηκε πειραματικά το πεδίο ροής (χρήση μετρητικής τεχνικής 2D-PIV) ενός ηλεκτρικά αγώγιμου ρευστού υπό την παρουσία ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Το ρευστό ήταν διάλυμα αλατιού σε νερό, με αναλογία 15% κατά βάρος, τοποθετημένο σε δεξαμενή κατασκευασμένη από Plexiglas, με διαστάσεις 45 mm x 55 mm, βάθους 6 mm, με ελεύθερη επιφάνεια. Δυο κατακόρυφες πλάκες αλουμινίου σε απόσταση 45 mm αποτελούσαν τα ηλεκτρόδια της διάταξης, τα οποία με τη βοήθεια πηγής συνεχούς ρεύματος προκαλούσαν ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του ρευστού, έντασης έως 1.2A και μέγιστης τάσης 14V. Κάτω από τη δεξαμενή ήταν τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, μαγνητικής επαγωγής 50 mT σε απόσταση 6 mm από την επιφάνειά τους, για την παραγωγή κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου, χωρικά μεταβαλλόμενου. Χρησιμοποιήθηκε επίσης και ένας τοροειδής μαγνήτης. Υπό τη δράση των δυνάμεων Lorentz, το ρευστό τίθεται σε κίνηση. Κύριο χαρακτηριστικό της ροής ήταν η παρουσία δινών των οποίων ο αριθμός, η θέση και η κυκλοφορία μεταβάλλονταν με τον χρόνο. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις μαγνητών και έγινε μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων στο μέσον του βάθους του ρευστού δηλ. σε απόσταση 3 mm από τον πυθμένα. Βασικά συμπεράσματα:

α) Στη **διάταξη 4 μαγνητών**, αρχικώς το πεδίο αποτελείται από **8 δίνες**, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε δυο παράλληλες γραμμές κάθετες στο ηλεκτρικό ρεύμα, αλλά αργότερα μειώνεται ο αριθμός τους σε **4 μεγάλες δίνες**. Αυξανόμενης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, οι ταχύτητες του ρευστού και οι διαταρχές τους αυξάνουν (μέγιστη ταχύτητα 50 mm/s και τυπική απόκλιση 25 mm/s). Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής (70 έως 500 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>) αυξάνει με γρήγορο ρυθμό αρχικώς, αλλά στη συνέχεια τείνει σε μια τιμή μέσω διακυμάνσεων.

β) Στη **διάταξη των 10 μαγνητών**, αρχικώς το πεδίο αποτελείται από **4 δίνες** με τα κέντρα τους να είναι σε μια ευθεία κάθετη στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Στη συνέχεια, ο αριθμός των δινών μειώνεται σε **2 δίνες** ίδιας φοράς κυκλοφορίας, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε μια ευθεία που σχηματίζει μικρή γωνία με τις πλάκες των ηλεκτροδίων. Αυξανόμενης της τάσης, οι ταχύτητες του ρευστού και οι διαταρχές

τους αυξάνουν, παίρνοντας η κινητική ενέργεια μεγαλύτερες τιμές (ακόμα και διπλάσιες) σε σχέση με την περίπτωση των 4 μαγνητών.

γ) Στη **διάταξη του τοροειδούς μαγνήτη**, το πεδίο ροής αποτελείται από **4 δίνες** με τα κέντρα τους να βρίσκονται κοντά στις 4 γωνίες της ορθογωνικής δεξαμενής από τις οποίες οι δυο δίνες είναι ισχυρότερες. Στην διάταξη αυτή, δεν παρουσιάστηκε μείωση του αριθμού των δινών με τον χρόνο. Αποσυνδέοντας την πηγή ρεύματος, η ροή επιβραδύνεται και οι αρχικά 4 δίνες μετατρέπονται σε 1 λίγο πριν ακινητοποιηθεί το ρευστό.

## Abstract

In the context of the present diploma thesis, the flow field of an electrically conducting fluid was experimentally examined, employing the 2D-PIV technique, under the presence of an electric and a magnetic field. The examined fluid was a sodium chloride-water solution, with a concentration of 15% by weight. The fluid tank was made of Plexiglas with a cross-section 45 mm x 55 mm, 6 mm deep, with a free surface. Two vertical aluminum plates at a distance of 45 mm were connected to a direct electric current source, generating a current through the fluid, up to 1.2A and a maximum voltage of 14V. A number of permanent magnets were installed under the tank with a magnetic flux of 50 mT at a distance of 6 mm from their surface generating a spatially varying vertical magnetic field. A toroidal magnet was also used. Due to the electromagnetic Lorentz forces, the fluid was set into motion. The basic feature of the flow field, which was measured 3 mm far from the tank bottom, was the presence of vortices, the number, place and circulation of which were varying in time. The basic conclusions are as follows:

- a) In the 4 magnet configuration, the flow field initially consists of 8 vortices, with their centers being along two parallel lines, perpendicular to the electric current but eventually there are reduced to 4 big vortices. When the electric current increases, the fluid velocities and fluctuations increase as well, reaching values like 50 mm/s and 25 mm/s, respectively, for a voltage of 14V. The mean kinetic energy of the flow field increases initially with a fast rate, but later it tends to a certain value although fluctuating.
- b) In the 10 magnet configuration, the flow field initially consists of 4 vortices, with their centers being along a line normal to the electric current. Later, the vortices are reduced to two of the same sign of circulation with their centers being on a line which forms a small angle with respect to the electrodes planes. The fluid velocities are greater, compared to the 4 magnet case, the unsteadiness of the flow is more pronounced and the mean kinetic energy of the flow field takes more than two times higher values.
- c) In the case of the toroidal magnet, the flow field consists of 4 vortices with their centers being close to the four edges of the tank and two of them are stronger than the other. The number of the vortices does not seem to be reduced with time. Only in case that the electrodes were disconnected from the current source, the four vortices were transformed to one vortex, before the fluid comes to a rest.

## Ευχαριστίες

Ήθελα με την ευκαιρία αυτή να ευχαριστήσω θερμά τους Καθηγητές μου κ. Ιωάννη Λεκάκη και κ. Ιωάννη Σαρρή της Σχολής μου για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, τη μελέτη των μαγνητοϋδροδυναμικών ροών. Μου δόθηκε η δυνατότητα να δω από κοντά, έστω στο σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, πως διεξάγεται η έρευνα αλλά και τα οφέλη που μπορεί κανείς να αποκομίσει, οργανώνοντας τη σκέψη, τη μελέτη και τη μεθοδικότητα στον τρόπο δουλειάς.

Επίσης, ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Νικολαΐδη Γεώργιο της Σχολής μου για την πολύτιμη βοήθειά του και τη γνώση του σχετικά με το θέμα των μαγνητών, απαραίτητη για τη διεξαγωγή της μελέτης αυτής.

Πολλές ευχαριστίες, επίσης, απευθύνω στον Δόκτωρα Βασιλόπουλο Κωνσταντίνο, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου ρευστομηχανικής και την ομάδα προπτυχιακών και μεταπτυχιακών φοιτητών του Καθηγητή κ. Ιωάννη Λεκάκη για την υποστήριξή τους κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ τους συναδέλφους μου στη Σχολή για τις ευχάριστες και δύσκολες στιγμές που περάσαμε μαζί καθώς και την οικογένειά μου που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Πρόλογος

Στη διπλωματική αυτή εργασία μελετάται η ροή αγώγιμου ρευστού (αλατόνερο) υπό την παρουσία ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η υπό εξέταση ροή ανήκει στην κατηγορία των λεγόμενων μαγνητοϋδροδυναμικών ροών με πλήθος εφαρμογών όχι μόνον σε πρακτικό επίπεδο αλλά και επιστημονικό, κυρίως σχετιζόμενο με το θέμα της αστάθειας της ροής και της τύρβης.

Η εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια:

α) Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται παραδείγματα μαγνητοϋδροδυναμικών ροών, όπως π.χ. ο ηλιακός άνεμος, η πρόωση πλοίου με θαλασσινό νερό, ο θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας, κ.α.

β) Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι εξισώσεις που διέπουν την κίνηση του ρευστού υπό την παρουσία μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου.

γ) Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζοντας τα βασικά ευρήματα διαφόρων ερευνητών σχετικά με το εξεταζόμενο θέμα.

δ) Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομέρειες της πειραματικής διάταξης και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

ε) Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής, και

στ) Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη των ευρημάτων της εργασίας και διατύπωση βασικών συμπερασμάτων.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract .....	6
Πρόλογος.....	8
Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 1: Παραδείγματα Μαγνητοϋδροδυναμικών Ροών.....	11
1.1 Το μαγνητικό πεδίο της γης.....	11
1.2 Ηλιακός άνεμος και μαγνητικό πεδίο της γης.....	13
1.3 Πρόωση πλοίου μέσω ΜΗΔ διάταξης.....	14
1.4 Θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας.....	15
1.5 Ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο.....	16
1.6 Χημειοθεραπεία για την αντιμετώπιση του καρκίνου.....	16
1.7 Μικρο-αντλία έγχυσης φαρμάκων.....	17
Κεφάλαιο 2: Βασικές Εξισώσεις.....	18
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	22
Κεφάλαιο 4: Πείραμα.....	42
4.1 Πειραματική Διάταξη.....	42
4.2 Μετρητική Τεχνική.....	46
4.3 Διαδικασία Μετρήσεων.....	49
Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα.....	51
Κεφάλαιο 6: Συγκρίσεις-Συμπεράσματα.....	84
Βιβλιογραφία .....	88
Παράρτημα.....	90

## Εισαγωγή

**Μαγνητοϋδροδυναμική** είναι ένας κλάδος της μηχανικής ρευστών που μελετά το πεδίο ροής ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών υπό τη δράση μαγνητικού πεδίου ή συνδυασμού μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου. Ηλεκτρικά αγώγιμα ρευστά αποτελούν τα υγρά μέταλλα, διαλύματα ηλεκτρολυτών και το λεγόμενο πλάσμα δηλ. ιονισμένο αέριο. Ο όρος ‘**μαγνητοϋδροδυναμική**’ (ΜΗΔ) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1942 από τον Σουηδό Νομπελίστα Φυσικό Hannes Alfvén (Βραβείο Νόμπελ Φυσικής, 1970) ο οποίος περιέγραψε τις ταλαντώσεις ιονισμένου αερίου (του λεγόμενου πλάσματος) μέσα σε μαγνητικό πεδίο και τα δημιουργούμενα κύματα, τα οποία προς τιμήν του ονομάστηκαν κύματα Alfvén. Η επίσημη έναρξη όμως της μαγνητοϋδροδυναμικής έγινε το 1936-1937 με τις πρώτες θεωρητικές και πειραματικές μελέτες ροής ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών σε κλειστούς αγωγούς με τη παρουσία μαγνητικού πεδίου από τους ερευνητές Hartmann και Lazarus. Στην εργασία με τίτλο ‘*Theory of the laminar flow of electrically conductive liquid in a homogenous magnetic field*’, ο ερευνητής Hartmann παρουσίασε το 1937 μια αναλυτική λύση του πεδίου ροής ηλεκτρικά αγώγιμου ρευστού το οποίο έρεε μεταξύ δυο παράλληλων πλακών κάθετα στις οποίες είχε επιβληθεί μαγνητικό πεδίο.

Το βασικό χαρακτηριστικό των ροών ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών υπό τη παρουσία μαγνητικού πεδίου, είναι η εμφάνιση ηλεκτρικών ρευμάτων τα οποία δημιουργούν με τη σειρά τους ένα άλλο μαγνητικό πεδίο το οποίο αλληλεπιδρά με το εξωτερικά επιβαλλόμενο. Έτσι το πρόβλημα γίνεται αρκετά πολύπλοκο και για τη μελέτη του απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυση των ρευστομηχανικών εξισώσεων και των εξισώσεων μαγνητισμού.

Μερικές εφαρμογές της ΜΗΔ σχετίζονται με:

- Την αστροφυσική και γεωφυσική
- Την μεταλλουργία
- Την πρόωση πλοίων και διαστημικών οχημάτων
- Τον έλεγχο της ροής π.χ. την μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης
- Ηλεκτρομαγνητικά παροχόμετρα
- Αντλίες και γεννήτριες χωρίς κινούμενα μέρη
- Πυρηνική σύντηξη
- Εφαρμογές της Βιοϊατρικής

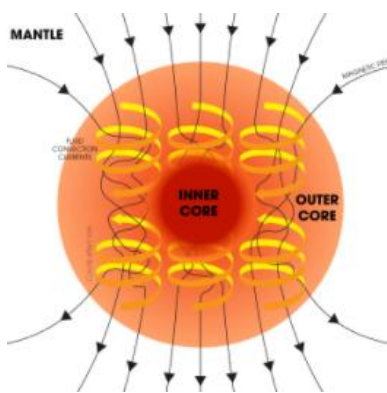
Μερικές από τις παραπάνω εφαρμογές αναπτύσσονται στη συνέχεια.

# Κεφάλαιο 1

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται μερικά παραδείγματα μαγνητοϋδροδυναμικών εφαρμογών.

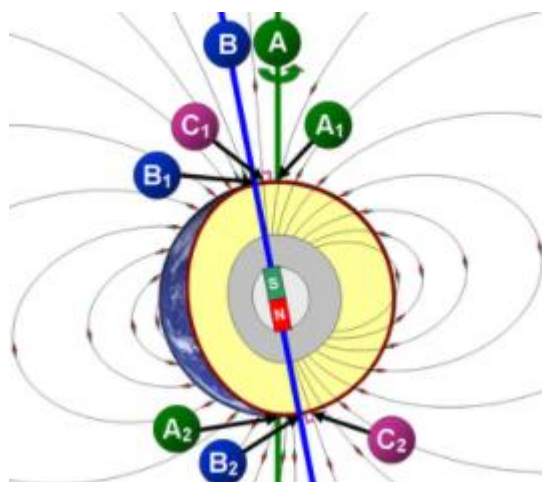
## 1.1 Το μαγνητικό πεδίο της γης

**Το μαγνητικό πεδίο της γης** οφείλεται στη ροή υγρών μετάλλων, κυρίως σιδήρου και νικελίου, στον εξωτερικό πυρήνα της γης των οποίων η κίνηση οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του πυρήνα της γης που επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 6000 K και του εξωτερικού πυρήνα που οι θερμοκρασίες κοντά στον μανδύα της γης είναι χαμηλότερες δηλ. περίπου 3800K. Σε συνδυασμό με τις δυνάμεις Coriolis που εμφανίζονται λόγω της περιστροφικής κίνησης της γης, τα υγρά μέταλλα ακολουθούν κυκλικές τροχιές με άξονες παράλληλους προς τον άξονα περιστροφής της γης, όπως δείχνονται στο σχήμα 1.1.1 με κίτρινες γραμμές, δημιουργώντας ηλεκτρικά ρεύματα υπό την παρουσία ενός προϋπάρχοντος μαγνητικού πεδίου, το οποίο ενισχύεται από το μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα ηλεκτρικά ρεύματα των υγρών μετάλλων.



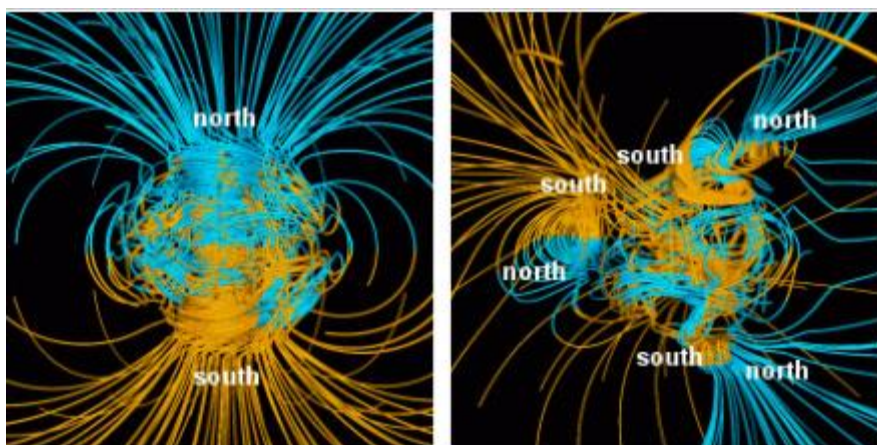
Σχ.1.1.1 Ροή υγρών μετάλλων στον εξωτερικό πυρήνα της γης

Στην επιφάνεια της γης η μαγνητική επαγωγή παίρνει τιμές μεταξύ 25 έως 65  $\mu\text{T}$  ενώ στον εξωτερικό πυρήνα της γης υπολογίζεται ότι είναι 50 φορές μεγαλύτερη. Το μαγνητικό πεδίο της γης αντιπροσωπεύεται από ένα μαγνητικό δίπολο του οποίου ο άξονας σχηματίζει με τον άξονα περιστροφής της γης μια γωνία  $11^\circ$ . Στο σχ. 1.1.2 δείχνεται ο άξονας περιστροφής της γης (με πράσινο χρώμα) και ο μαγνητικός άξονας (με μπλε χρώμα). Υπενθυμίζεται ότι ο βόρειος μαγνητικός πόλος της γης βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο και ο νότιος μαγνητικός πόλος στο βόρειο ημισφαίριο.



Σχ.1.1.2 Ο άξονας περιστροφής της γης (πράσινο χρώμα) και ο μαγνητικός άξονας (μπλε χρώμα)

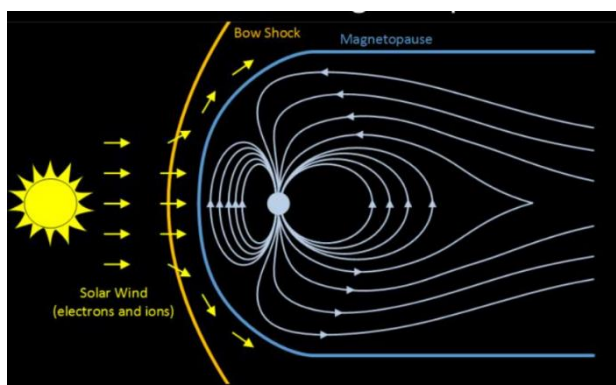
Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της ΜΗΔ, το 1995 οι ερευνητές Glatzmaier και Paul Roberts του πανεπιστημίου Santa Cruz στην Καλιφόρνια, προσομοίωσαν την αλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου (η οποία έχει αποτυπωθεί σε πετρώματα). Υπολογίζεται ότι κατά μέσον όρο η αλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου της γης συμβαίνει κάθε περίπου 200000 χρόνια αλλά η τελευταία συνέβη πριν περίπου 780000 χρόνια. Στο σχ. 1.1.3 δείχνονται οι μαγνητικές γραμμές της γης σήμερα (αριστερό σχήμα) καθώς και κατά τη διαδικασία αλλαγής της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου (δεξί σχήμα).



Σχ.1.1.3 Το μαγνητικό πεδίο της γης σήμερα (αριστερά) και κατά τη διαδικασία αλλαγής της πολικότητας (δεξιά)

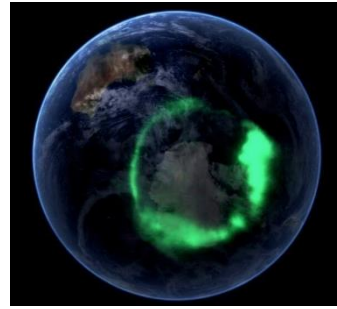
## 1.2 Ηλιακός άνεμος και Μαγνητικό Πεδίο της Γης

Το μαγνητικό πεδίο της γης αλληλεπιδρά με τον λεγόμενο ηλιακό άνεμο, ο οποίος αποτελείται κυρίως από θετικά και αρνητικά φορτισμένα σωματίδια (ιονισμένο αέριο) τα οποία εκτοξεύονται από την εξωτερική επιφάνεια του ήλιου και κινούνται με ταχύτητες 350 με 700 km/sec. Λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου της γης, τα σωματίδια του ηλιακού ανέμου σχεδόν στο σύνολό τους δεν μπορούν να πλησιάσουν την επιφάνεια της γης λόγω των ασκούμενων σε αυτά δυνάμεων Lorentz, προστατεύοντας έτσι την γη. Όπως φαίνεται στο σχ.1.2.1, το μαγνητικό πεδίο της γης αλλάζει την πορεία των σωματιδίων και επιπλέον η εμφάνιση ενός κρουστικού κύματος (με κίτρινη γραμμή στο σχήμα) μειώνει την ταχύτητά τους.



Σχ.1.2.1 Ηλιακός άνεμος και γήινο μαγνητικό πεδίο

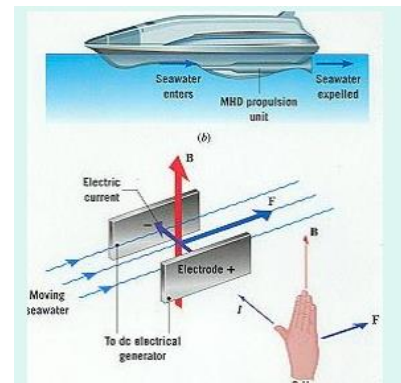
Κάποια ποσότητα των σωματιδίων μπαίνει στην γήινη ατμόσφαιρα διεγείροντας κυρίως άτομα οξυγόνου και αζώτου δηλ. μετατοπίζοντας τα ηλεκτρόνια των ατόμων σε ανώτερες ενεργειακές στοιβάδες. Επειδή τα ηλεκτρόνια δεν παραμένουν στην κατάσταση αυτή για πολύ χρόνο, επανέρχονται στην προηγούμενη κατάστασή τους εκπέμποντας ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Σέλας**. Στο σχ.1.2.2 δείχνονται εικόνες από τον βόρειο πόλο (Βόρειο Σέλας) και από τον νότιο πόλο (Νότιο Σέλας), αντίστοιχα.



Σχ.1.2.2 Βόρειο Σέλας (αριστερά) και Νότιο Σέλας (δεξιά)

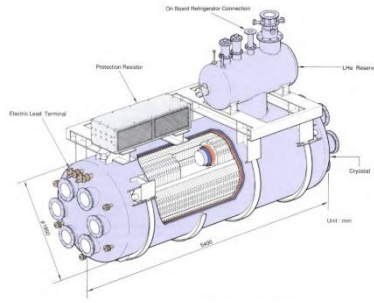
### 1.3 Πρόωση πλοίου μέσω ΜΗΔ διάταξης

Το 1995 κατασκευάστηκε στην Ιαπωνία ένα πλοίο (σχ.1.3.1) που ονομάστηκε YAMATO-1, μήκους 30m, πλάτους 10m και μέγιστης ταχύτητας 8 km/h. Ως προωθητικός μηχανισμός χρησιμοποιήθηκε η εκτόξευση θαλασσινού νερού στο πίσω μέρος του πλοίου με τη βοήθεια ηλεκτροδίων τα οποία διαρρέοντο από συνεχές ρεύμα (παραγόμενο από ντιζελογεννήτρια) και μαγνητικό πεδίο (κάθετο στο ηλεκτρικό ρεύμα των ηλεκτροδίων) μαγνητικής επαγωγής 4T παραγόμενο από πηνία τα οποία ψύχονταν μέσω υγρού ηλίου σε θερμοκρασία 4.2K (σχ.1.3.1).

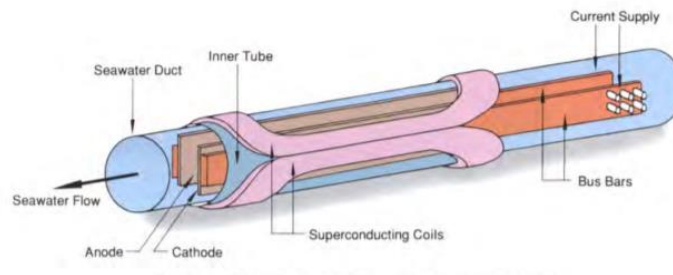


Σχ. 1.3.1 Πλοίο προωθούμενο μέσω ΜΗΔ διάταξης

Στο σχ.1.3.2 φαίνεται ένας από τους δυο προωθητικούς μηχανισμούς που ο καθένας τους περιλάμβανε 6 σωλήνες εκτόξευσης θαλασσινού νερού (σχ.1.3.3).



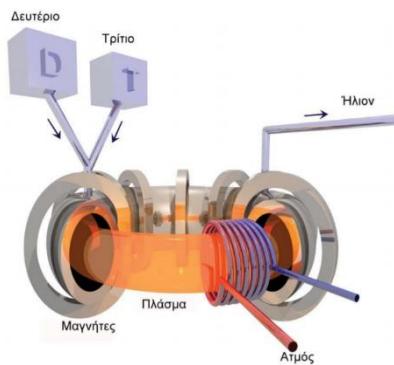
Σχ. 1.3.2 Προωθητικός μηχανισμός ΜΗΔ με έξι σωλήνες εκτόξευσης του νερού



Σχ. 1.3.3 Ένας από τους έξι σωλήνες εκτόξευσης νερού με τα ηλεκτρόδια και τα πηνία παραγωγής του μαγνητικού πεδίου

#### 1.4 Θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας

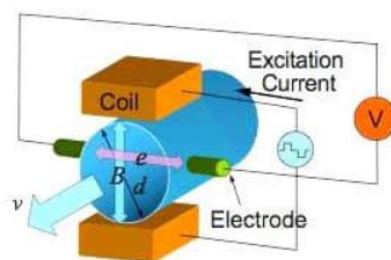
Θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας είναι μια διάταξη παραγωγής θερμικής ενέργειας μέσω ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης κατά την οποία γίνεται συνένωση ελαφρών πυρήνων Δευτερίου  $^2\text{H}$  και Τρίτιου  $^3\text{H}$  σε βαρύτερους πυρήνες (Ηλιο  $^4\text{He}$ ) εκλύοντας θερμότητα. Η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την ατμοποίηση νερού το οποίο περνώντας μέσα από ατμοστροβίλους παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Το Δευτέριο υπάρχει άφθονο στο νερό (π.χ. 35g ανά 1000g νερού) ενώ από το Λίθιο που επίσης είναι ελαφρύ μέταλλο άφθονο στη φύση μπορεί να παραχθεί Τρίτιο. Στο σχ.1.4.1 δείχνονται οι κύριες υπομονάδες ενός θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα όπου η σύντηξη παραγματοποιείται σε έναν καμπύλο σωλήνα υπό την παρουσία ισχυρού μαγνητικού πεδίου (π.χ. 4T) και ηλεκτρικού πεδίου για τη θέρμανση των αντιδρώντων στοιχείων τα οποία πρέπει να βρίσκονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Εξωτερικώς του σωλήνα βρίσκεται Λίθιο σε υγρή μορφή το οποίο ρέει με τη βοήθεια αντλίας απάγοντας την παραγόμενη ενέργεια την οποία αποδίδει σε εναλλάκτη θερμότητας για τη θέρμανση του νερού. Αναφορικά με τη ροή του Λιθίου, απαιτείται ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης, ο οποίος βασίζεται στις εξισώσεις της ΜΗΔ δεδομένου ότι υπάρχει στην ροή αυτή η παρουσία μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου.



Σχ. 1.4.1 Κύριες υπομονάδες θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα

### 1.5 Ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο

Το ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο είναι ένα όργανο μέτρησης της παροχής όγκου ηλεκτρικά αγώγιμου ρευστού το οποίο ρέει μέσα σε σωλήνα. Περιλαμβάνει δυο πηνία για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου με κατεύθυνση κάθετη στον διαμήκη άξονα του σωλήνα και δυο ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε αντιδιαμετρικά σημεία ώστε η διάμετρος που τα συνδέει να είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο. Μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων αναπτύσσεται μια ηλεκτρική τάση λόγω των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που ασκούνται στα κινούμενα φορτία του ρευστού, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας του ρευστού και επομένως της παροχής. Μετρώντας την τάση αυτή, υπολογίζεται η παροχή του ρευστού (βλ.σχ.1.5.1).



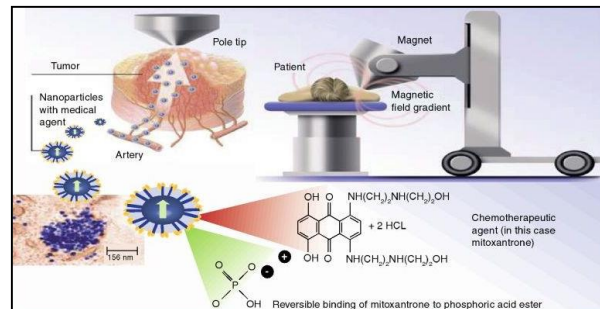
Σχ.1.5.1 Ηλεκτρομαγνητικό παροχόμετρο

### 1.6 Χημειοθεραπεία για την αντιμετώπιση του καρκίνου

Στην περίπτωση που απαιτείται η μεταφορά φάρμακου σε συγκεκριμένη περιοχή του σώματος ασθενούς που έχει προσβληθεί από καρκίνο, εφαρμόζεται στην συγκεκριμένη περιοχή εξωτερικώς του σώματος ένα μαγνητικό πεδίο. Παράλληλα, εισάγεται το κατάλληλο φάρμακο ενδοφλέβια που είναι τοποθετημένο στην επιφάνεια μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία υπό την επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου



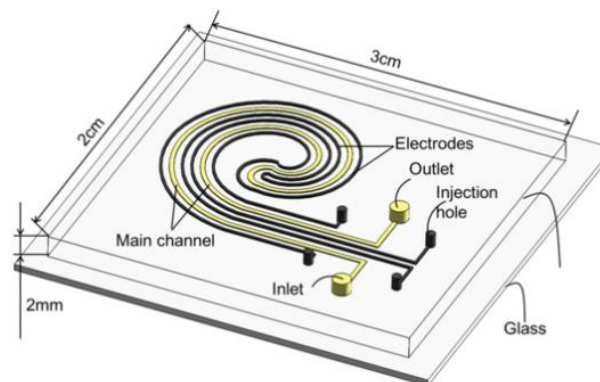
οδεύουν στην περιοχή και ασκούν την θεραπευτική τους δράση χωρίς να προσβάλλουν άλλα ιγίή όργανα του ασθενούς (βλ. σχ.1.6).



Σχ. 1.6. Χρήση μαγνητικών σωματιδίων για τη στοχευμένη μεταφορά φάρμακου στον οργανισμό ασθενούς

### 1.7 Μικρο-αντλία έγχυσης φαρμάκων

Στο σχ.1.7 δείχνεται μια ΜΥΔ μικροαντλία έγχυσης φαρμάκων διαστάσεων 2 x 3 cm. Ο αγωγός μεταφοράς του φάρμακου είναι σπειροειδής για την μείωση των διαστάσεων της αντλίας ενώ δυο ζεύγη ηλεκτροδίων παράλληλα προς τον αγωγό παράγουν το αναγκαίο για την κίνηση του ρευστού ηλεκτρικό ρεύμα. Δυο ζεύγη μαγνητών τοποθετούνται πάνω και κάτω από τον αγωγό μαγνητικής επαγωγής 400mT.



Σχ. 1.7 ΜΥΔ μικροαντλία έγχυσης φαρμάκων

## Κεφάλαιο 2

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές εξισώσεις της μαγνητοϋδροδυναμικής και οι εμπλεκόμενοι αδιάστατοι αριθμοί.

### Βασικές Εξισώσεις

Σύμφωνα με την πρώτη εξίσωση του **Maxwell** καθώς και την εξίσωση του **Gauss** για τον ηλεκτρισμό, ηλεκτρικά φορτία πυκνότητας  $\rho_e$  παράγουν ηλεκτρικό πεδίο  $E$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$\nabla \cdot E = \rho_e / \epsilon_0 \quad (1)$$

όπου  $\epsilon_0$  είναι η λεγόμενη διηλεκτρική σταθερά του κενού ίση με  $8,854 \times 10^{-12}$  Farad/m. Η σταθερά αυτή συνδέεται με την μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu_0$  μέσω της σχέσης:

$$\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1} \quad (2)$$

όπου  $c$ , η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Επομένως,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (Vs/Am).

Ένας ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής (ή πυκνότητας μαγνητικής ροής)  $B$  που εκφράζεται σε μονάδες Tesla (T) όπου  $T = N/(Am)$ .

Για να γίνει πιο κατανοητή η μονάδα Tesla αναφέρονται μερικές περιπτώσεις μαγνητικών πεδίων:

-Μαγνητικό πεδίο της Γης: 50  $\mu T$

-Μαγνητικό πεδίο του Ήλιου: 100 $\mu T$  έως 400mT

• Μαγνητικό πεδίου του πλανήτη Δία (το ισχυρότερο του ηλιακού μας συστήματος): 10mT

• Μόνιμοι μαγνήτες εργαστηρίων: 1-2 T

• Ηλεκτρομαγνήτες: 25-50 T

• Θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας (ARIES RS): 12 T

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ , εκφράζεται σε μονάδες (A/m) και συνδέεται με την μαγνητική επαγωγή μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

όπου  $\mu$ , η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου.

Σύμφωνα με τον νόμο του **Gauss** για τον μαγνητισμό ισχύει:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

Αποτέλεσμα του νόμου αυτού είναι ότι κάθε μαγνήτης έχει δυο πόλους (δηλ. δεν υπάρχουν μονοπολικοί μαγνήτες) και οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές, σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές γραμμές που είναι ανοικτές καθώς συνδέουν θετικά με αρνητικά ηλεκτρικά φορτία.

Σύμφωνα με τον νόμο του **Faraday**, ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να εμφανιστεί σε έναν αγωγό είτε στην περίπτωση που ο αγωγός βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο του οποίου η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται χρονικά είτε όταν ο αγωγός κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ο νόμος του Faraday διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

Σύμφωνα με τον **νόμο του Ampere**, η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος  $\mathbf{J}$  ( $\text{A/m}^2$ ) μέσω της σχέσης:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (6)$$

Σύμφωνα με τον **νόμο του Ohm**, η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος ( $\text{A/m}^2$ ) είναι αποτέλεσμα δυο παραγόντων: α) της έντασης του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$ , και β) της κίνησης του αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο. Επομένως, ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (7)$$

όπου  $\sigma$ , η ηλεκτρική αγωγιμότητα ( $\text{S/m}$ ) του αγωγού και  $\mathbf{u}$  η ταχύτητά του.

Σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα διαφόρων μέσων οι τιμές κυμαίνονται ως εξής:

- ασθενείς ηλεκτρολύτες:  $10^{-4}$  έως  $10^{-2} \text{ S/m}$
- ισχυροί ηλεκτρολύτες: 10 έως 100  $\text{ S/m}$
- λυωμένα άλατα: 150  $\text{ S/m}$
- υγρά μέταλλα:  $10^6$  με  $10^7 \text{ S/m}$ . (π.χ. του υδραργύρου είναι  $10^6 \text{ S/m}$ ).

Υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ο αγωγός δέχεται την λεγόμενη **δύναμη Lorentz**  $\mathbf{F}$ , η οποία είναι κάθετη στις ηλεκτρικές και μαγνητικές γραμμές και ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (8)$$

Στις μαγνητοϋδροδυναμικές εφαρμογές υγρών μετάλλων η δύναμη Lorentz είναι η επικρατούσα δύναμη δεδομένου ότι η δύναμη Coulomb που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο είναι αμελητέα.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις **Ohm, Ampere και Faraday**, προκύπτει μια εξίσωση που συνδέει την ταχύτητα  $u$  του κινούμενου αγωγού με την μαγνητική επαγωγή  $B$ :

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \lambda \nabla^2 B \quad (9)$$

όπου  $\lambda = (\mu_0 \sigma)^{-1}$  είναι η μαγνητική διαχυσιμότητα (magnetic diffusivity). Αδιαστατοποιώντας την ταχύτητα  $u$  με μια χαρακτηριστική ταχύτητα  $U$ , τον χρόνο με την χρονική σταθερά  $U/L$  όπου  $L$  ένα χαρακτηριστικό μήκος, και την μαγνητική επαγωγή με μια χαρακτηριστική τιμή της μαγνητητικής επαγωγής του πεδίου, η παραπάνω εξίσωση γράφεται με τα αντίστοιχα αδιάστατα μεγέθη ως:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \nabla^2 B / R_m \quad (10)$$

όπου  $R_m = UL/\lambda = UL\sigma\mu_0$  και ονομάζεται **μαγνητικός αριθμός Reynolds**. Ο αδιάστατος αυτός αριθμός εκφράζει τον λόγο της μαγνητικής επαγωγής που προκαλεί η κίνηση του αγωγού προς την μαγνητική επαγωγή του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου.

Οι εξισώσεις που διέπουν την ισοθερμοκρασιακή ροή του ρευστού είναι:

α) η εξίσωση της συνέχειας:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

β) η εξίσωση ορμής:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{\rho} \quad (12)$$

Παρατηρούμε ότι στο δεξί μέλος της εξίσωσης ορμής εισάγεται ένας επιπλέον όρος, που είναι η δύναμη Lorentz ανά μονάδα μάζας ρευστού (γι' αυτό η δύναμη  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  είναι διαιρεμένη με την πυκνότητα του ρευστού).

Εκτός από τον **αριθμό Reynolds**  $Re$  που αποτελεί τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας:

$$Re=UL/\nu \quad (13)$$

, ένας άλλος αδιάστατος αριθμός που χρησιμοποιείται στις μαγνητοϋδροδυναμικές ροές είναι ο **αριθμός Hartmann** που εκφράζει τη σχέση της δύναμης Lorentz προς τη δύναμη λόγω συνεκτικότητας και δίνεται από τη σχέση:

$$Ha=LB(\sigma/\nu\rho)^{1/2} \quad (14)$$

καθώς και ο **αριθμός Stuart (N ή St)** που είναι ο λόγος των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων προς τις αδρανειακές δυνάμεις και δίνεται από τη σχέση:

$$N=St=\sigma B_o^2 L / \rho U_0 \quad (15)$$

Επίσης, ο λόγος του μαγνητικού αριθμού Reynolds προς τον αριθμό Reynolds λέγεται αριθμός **Batchelor (Bi)** ή **μαγνητικός αριθμός Prandtl (Pr<sub>m</sub>)**:

$$Bi=Pr_m=\mu_0\sigma\nu \quad (16)$$

### 3. Κεφάλαιο 3- Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά ευρήματα διαφόρων εργασιών σχετικών με μαγνητοϋδραυλικές εφαρμογές.

#### 3.1 A. Schafelner. Introduction to Magnetohydrodynamics, (2016). Bachelor thesis, Johannes Kepler Universitat Linz, Αυστρία.

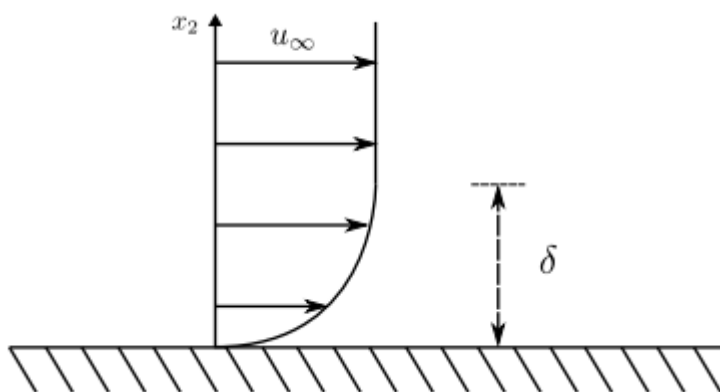
Αναφέρονται δυο περιπτώσεις μαγνητοϋδροδυναμικής ροής

α) Σε διδιάστατη ροή ρευστού (ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , πυκνότητας  $\rho$  και κινηματικής συνεκτικότητας  $\nu$ ) παράλληλη προς επίπεδη πλάκα και ταχύτητας  $U_\infty$  μακριά από την πλάκα, επιβάλλεται μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής  $B$  κάθετο στην πλάκα (σχ.3.1.1.). Αποτέλεσμα είναι να προκαλείται ηλεκτρικό ρεύμα, του οποίου η πυκνότητα είναι  $J=\sigma(u \times B)$  άρα είναι παράλληλη προς τον άξονα  $x_3$ , δηλ. είναι κάθετο στο πεδίο ροής. Η δύναμη Lorentz ανά μονάδα όγκου ρευστού είναι  $J \times B = -\sigma u B^2$  και είναι αντίθετη προς την κατεύθυνση της ροής. Επιλύοντας την εξίσωση της ορμής, προκύπτει ότι η κατανομή της ταχύτητας είναι:

$$u = U_\infty(1 - e^{-x_2/\delta}) \quad (3.1.1)$$

$$\text{όπου } \delta = \sqrt{\frac{\rho \nu}{\sigma}} / B \quad (3.1.2)$$

Επομένως, το μήκος  $\delta$  αποτελεί το πάχος του οριακού στρώματος το οποίο ελαττώνεται όσο αυξάνουν η μαγνητική επαγωγή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ρευστού και μειώνεται το ιξώδες ( $\rho\nu$ ) του ρευστού.



Σχ. 3.1.1 Ροή με επιβολή μαγνητικού πεδίου παράλληλα προς  $x_2$

β) Αγώγιμο ρευστό (ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , πυκνότητας  $\rho$  και κινηματικής συνεκτικότητας  $\nu$ ) ρέει μεταξύ δυο παραλλήλων πλακών που βρίσκονται στις θέσεις  $x_2 = \pm h$ . Επιβάλλεται ηλεκτρικό πεδίο  $E_0$  κατά την κατεύθυνση  $x_3$ , μαγνητικό πεδίο  $B$  κατά την κατεύθυνση  $x_2$  κάθετα στις δυο πλάκες, και μια σταθερή κλίση πίεσης  $dp/dx_1$  κατά την κατεύθυνση της ροής (σχ.3.1.2). Η δύναμη Lorentz ανά μονάδα όγκου είναι ίση με  $-E_0B - uB^2$  δηλ. αντίθετη προς την κατεύθυνση της ροής. Επιλύοντας την εξίσωση της ορμής προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας:

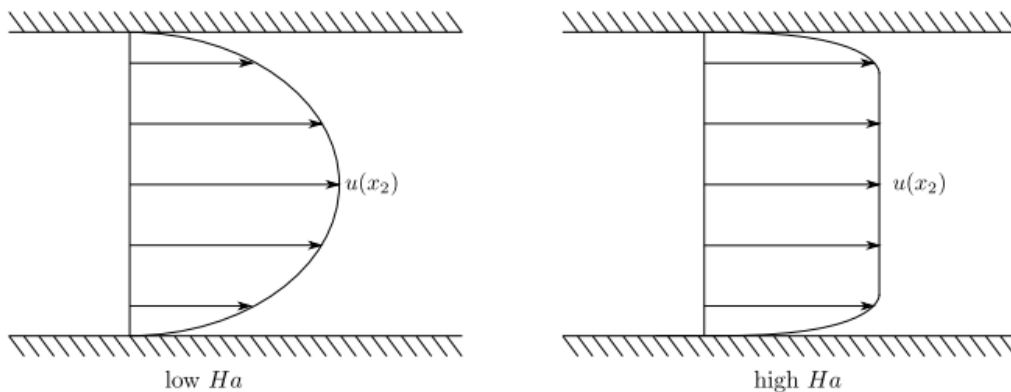
$$u = u_0 \left( 1 - \frac{\cosh\left(\frac{x_2}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{h}{\delta}\right)} \right) \quad (3.1.3)$$

όπου η ταχύτητα  $u_0$  προκύπτει από τη σχέση:

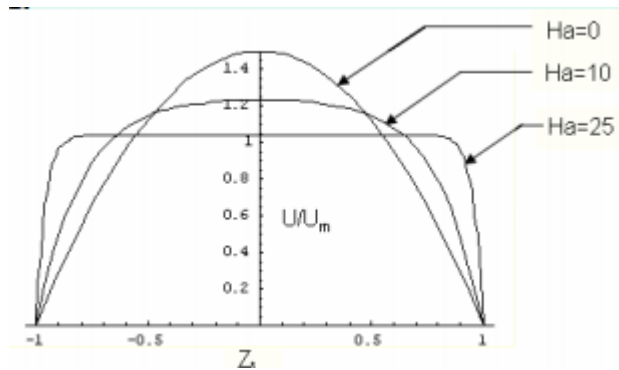
$$\sigma B^2 u_0 = -\frac{dp}{dx_1} - \sigma E_0 B \quad (3.1.4)$$

και  $\delta = \sqrt{\frac{\rho\nu}{\sigma}}/B$ .

Ο αριθμός Hartmann ορίζεται ως:  $Ha = LB(\sigma/\nu\rho)^{1/2}$ , όπου  $L=h$ , στην εφαρμογή αυτή, και άρα  $Ha = h/\delta$ . Επομένως, αυξάνοντας την μαγνητική επαγωγή, το πάχος  $\delta$  μειώνεται (δηλ. αυξάνει ο αριθμός  $Ha$ ) οπότε αυξάνεται η ταχύτητα κοντά στις πλάκες και μειώνεται μακριά από αυτές (βλ. σχ.3.1.3).



Σχ.3.1.2 Επιβολή μαγνητικού πεδίου κάθετα στις δυο πλάκες, και ηλεκτρικού πεδίου παράλληλα προς τις πλάκες και κάθετα στην κατεύθυνση της ροής

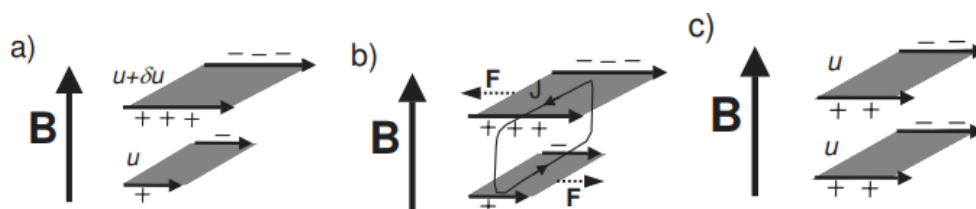


Σχ.3.1.3 Κατανομή της ταχύτητας ρευστού μεταξύ δυο πλακών για διάφορες τιμές του αριθμού Hartmann

### 3.2 Klein, R. (2010) MHD experiments on quasi two-dimensional and three-dimensional liquid metal flows. Coventry University.

#### Επίδραση της δύναμης Lorentz στο πεδίο ρευστού

Εάν το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $B$  είναι κάθετο στην κύρια κατεύθυνση της ροής και υπάρχει μια μεταβολή της ταχύτητας παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο (περίπτωση (a) στο παρακάτω σχήμα), οι δυνάμεις Lorentz τείνουν να κάνουν την κατανομή της ταχύτητας πιο ομοιόμορφη. Συγκεκριμένα, το κινούμενο ρευστό παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο του οποίου η ένταση είναι μεγαλύτερη στην περιοχή που η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη. Επομένως, η χωρική μεταβολή της έντασης του δημιουργούμενου ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί μια κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων δηλ ένα ρεύμα πυκνότητας  $J$  όπως στο (b) του παρακάτω σχήματος 3.2.1. Αυτό έχει ως συνέπεια στην περιοχή μεγαλύτερων ταχυτήτων ρευστού, η εφαρμοζόμενη δύναμη Lorentz να τείνει να επιβραδύνει το ρευστό ενώ στην περιοχή μικρότερων ταχυτήτων τείνει να το επιταχύνει. Επομένως, τελικά η κατανομή της ταχύτητας και του ηλεκτρικού πεδίου τείνουν να γίνουν ομοιόμορφες.

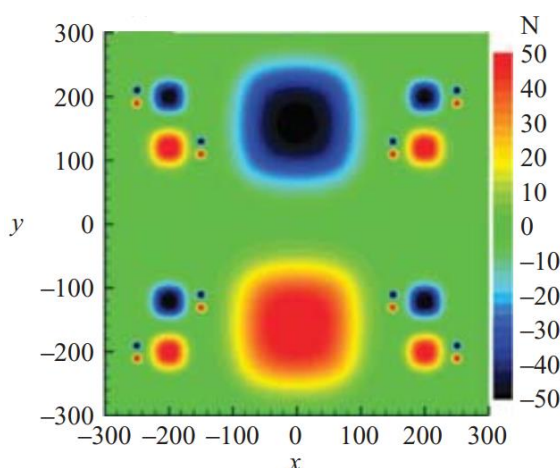


Σχ. 3.2.1 Η δύναμη Lorentz σε ανομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας



**3.3 L. Rossi, J. C. Vassilicos and Y. Hardalupas, J. 2006. ‘Electromagnetically controlled multi-scale flows’, J. Fluid Mech, 558, pp. 207–242.**

Σκοπός της πειραματικής αυτής εργασίας ήταν η μελέτη ενός ελεγχόμενου διδιάστατου τυρβώδους πεδίου ροής αποτελούμενου από δίνες διαφόρων διαστάσεων και η μέτρηση του ενεργειακού φάσματος της ροής. Η ροή προκλήθηκε από τρία διαφορετικά ζεύγη μόνιμων μαγνητών (Bonded NdFeB, 0.68 T) με κατακόρυφες μαγνητικές γραμμές, οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο και ρέον μέσον αλατόνερο. Οι διαστάσεις των μαγνητών ήταν 160mm x 160mm, 40mm x 40mm και 10mm x 10mm πάχους 60mm, 40mm και 10mm, αντίστοιχα. Συνολικά τοποθετήθηκαν 13 ζεύγη μαγνητών κάτω από ανοιχτή δεξαμενή αλατόνερου, διαστάσεων 1700mm x 1700mm. Στο σχήμα 3.3.1 δείχνεται η διάταξη των 13 ζευγών μαγνητών.



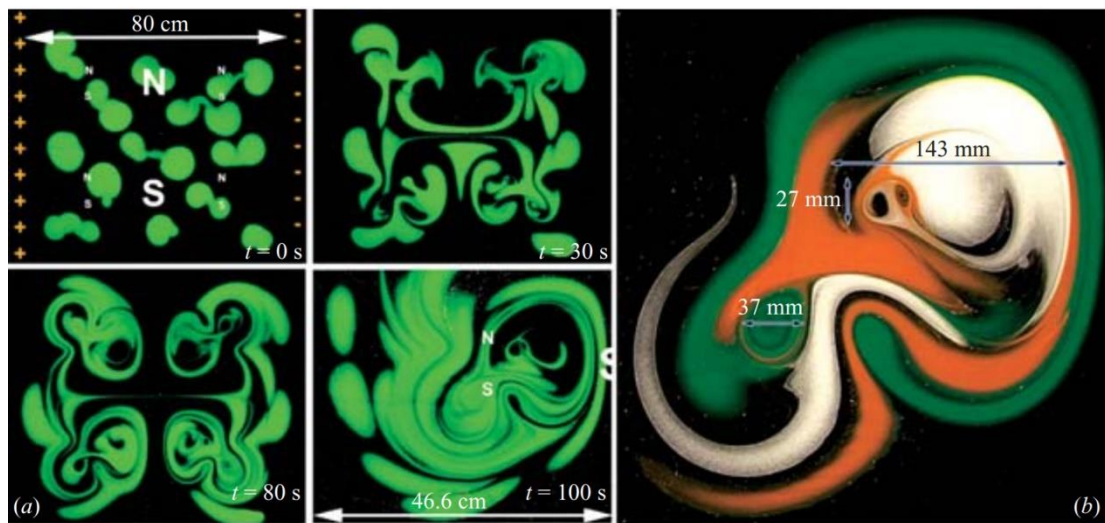
Σχ. 3.3.1 Διάταξη μαγνητών τετραγωνικού σχήματος τριών διαφορετικών διαστάσεων

Η συγκέντρωση άλατος στο αλατόνερο επιλέχθηκε να είναι σχετικά υψηλή, 158g/lit (υπενθυμίζεται ότι η αντίστοιχη συγκέντρωση στο θαλασσινό νερό είναι 35g/lit), ώστε η αγωγιμότητα του ρευστού να είναι αναξάρτητη της συγκέντρωσης, η οποία εκτιμήθηκε ότι είναι 16.6 S/m. Σε δυο απέναντι πλευρές της δεξαμενής (κατά μήκος του άξονα y του σχήματος 3.3.1) τοποθετήθηκαν 43 ηλεκτρόδια πλατίνας σε απόσταση 40 mm το ένα από το άλλο στα οποία επιβλήθηκε ηλεκτρική τάση προκαλώντας έτσι ένα οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο ελεγχόμενης έντασης, κάθετο στο μαγνητικό πεδίο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  ελέγχθηκε και βρέθηκε ότι είναι σταθερό σε μια περιοχή 1300mm x 1300mm γύρω από το κέντρο της δεξαμενής όπου είχαν τοποθετηθεί οι μαγνήτες. Το αλατόνερο, ως αγωγίμο μέσο τέθηκε σε κίνηση λόγω των δυνάμεων Lorentz =  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ , όπου  $\mathbf{j}$  είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (ένταση

ρεύματος/διατομή) και  $\mathbf{B}$  το μαγνητικό πεδίο. Λόγω της σχετικά μικρής τιμής του γινομένου  $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ , όπου  $\mathbf{u}$  η ταχύτητα του ρευστού και δεδομένου ότι  $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$ , όπου  $\mathbf{E}$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τελικώς ισχύει:  $\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E}$ . Επομένως, η δύναμη Lorentz στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν ανεξάρτητη της ταχύτητας του ρευστού.

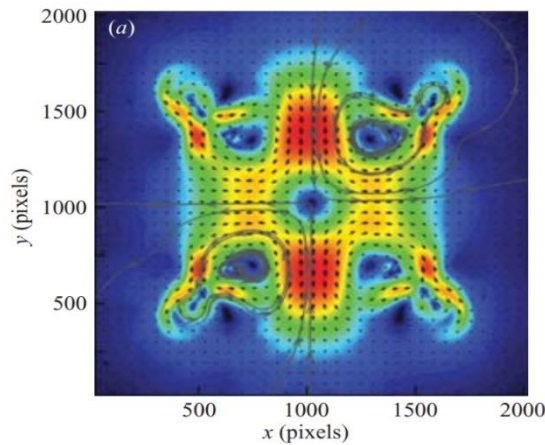
Το βάθος του αλατόνερου στη δεξαμενή ήταν 5 mm ώστε το μαγνητικό πεδίο να είναι κατά το δυνατόν ισχυρό λόγω του γεγονότος ότι η έντασή του ως γνωστόν μειώνεται εκθετικά καθώς αυξάνει η απόσταση από τους μαγνήτες και επιπλέον, λόγω του μικρού βάθους σε σχέση με την επιφάνεια της δεξαμενής, το πεδίο ροής ήταν διδιάστατο.

Ένα παράδειγμα της εξέλιξης της ροής στα πρώτα 100 s μετά την επιβολή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων (τα οποία δείχνονται με τα σύμβολα + και - στο σχ. 3.3.2) φαίνεται στο σχ.3.3.2, για ένταση ρεύματος  $I=0.3\text{A}$ , χρησιμοποιώντας κατάλληλη χρωστική ουσία, και στη δεξιά πλευρά του σχήματος φαίνεται μια λεπτομέρεια του πεδίου ροής με τις αντίστοιχες διαστάσεις.



Σχ. 3.3.2 Οπτικοποίηση της ροής για ένταση ρεύματος  $I=0.3\text{A}$

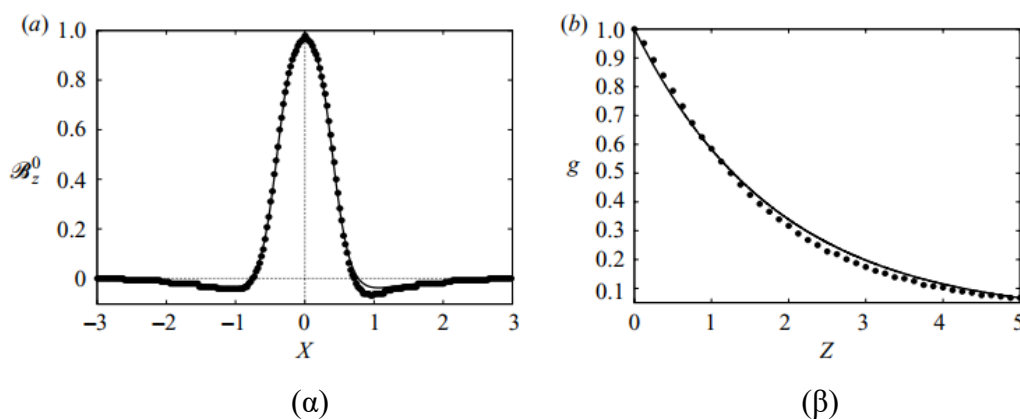
Στο σχ.3.3.3 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της ροής μετρημένο μέσω της μετρητικής τεχνικής PIV για μια περιοχή 80 cm x 80cm.



Σχ.3.3.3 Πεδίο ταχυτήτων μετρημένο με την τεχνική PIV.

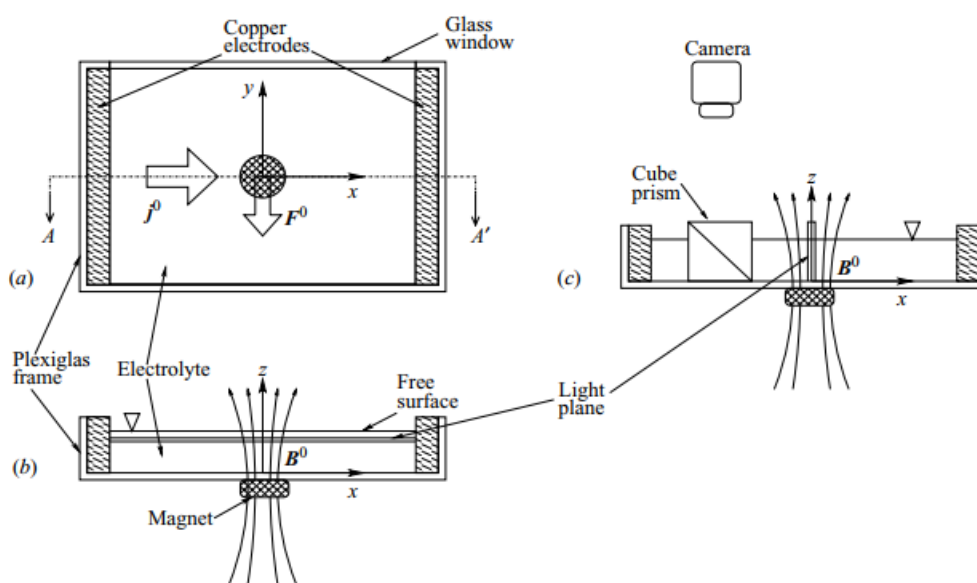
**3.4 A. Figueroa, F. Demiaux, S. Cuevas, E. Ramos, 2009. ‘Electrically driven vortices in a weak dipolar magnetic field in a shallow electrolytic layer’, J. Fluid Mech., 641, pp. 245–261.**

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε πειραματικώς και υπολογιστικώς το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ροής ηλεκτρολύτη σε ανοικτή δεξαμενή διαστάσεων 280 mm x 380 x 16 mm όπου χάλκινα ηλεκτρόδια ήταν τοποθετημένα κατά μήκος των μικρότερων πλευρών της δεξαμενής ενώ κάτω από την δεξαμενή είχε τοποθετηθεί μόνιμος κυλινδρικός μαγνήτης (Neodymium-Iron-Boron Dipole Magnet) διαμέτρου 19 mm, ύψους 5 mm και μέγιστης έντασης 330 mT. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα που συνδέει τις δυο πλευρές που είναι τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια σύμφωνα με το σχ.3.4.1a ενώ καθ’ ύψος σύμφωνα με το σχ.3.4.1.β.



Σχ. 3.4.1 Αδιάστατη ένταση του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα που συνδέει τα ηλεκτρόδια (α), και καθ’ ύψος (β). Τα μεγέθη X και Z είναι αδιάστατα με το βάθος του ηλεκτρολύτη.

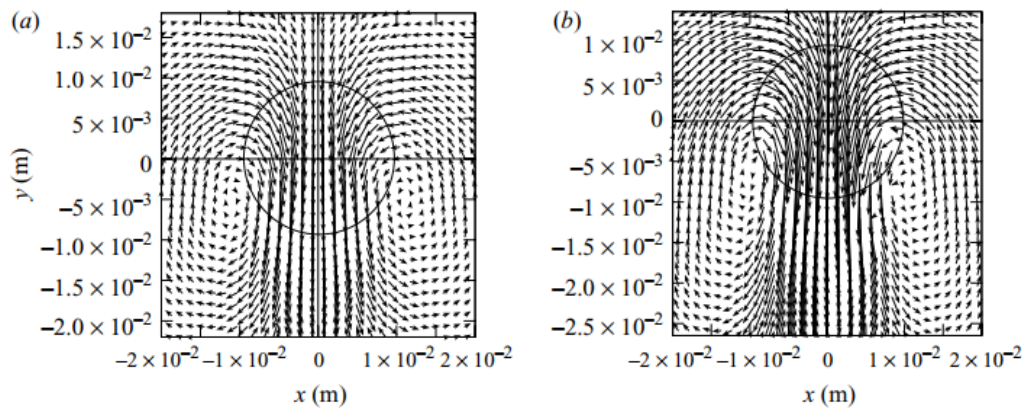
Ο ηλεκτρολύτης ήταν διάλυμα ανθρακικού νατρίου σε αναλογία 8.6g ανά 100g νερού, ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma=6.36 \text{ S/m}$ , πυκνότητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  και κινηματικής συνεκτικότητας  $\nu=10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Τα ηλεκτρόδια χαλκού ήταν συνδεδεμένα με πηγή σταθερής τάσης και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ρυθμίστηκε να παίρνει τιμές στο διάστημα 10mA έως 100mA. Η πειραματική διάταξη δείχνεται στο σχ. 3.4.2.



Σχ. 3.4.2 Πειραματική διάταξη

Η μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων σε ένα οριζόντιο επίπεδο έγινε με χρήση συστήματος PIV, με την κάμερα (1008 x 1016 pixels) τοποθετημένη 200 mm πάνω από το επίπεδο και η οποία κατέγραφε μια περιοχή 44 mm x 44 mm. Οι ταχύτητες του ρευστού κυμαίνονταν μεταξύ 6 mm/s και 15 mm/s και η μικρότερη απόσταση μεταξύ δυο διανυσμάτων ήταν 1.3 mm. Ο αριθμός Hartman  $B_{\max} h (\sigma/\rho\nu)^{1/2}$  από τον πυθμένα της δεξαμενής έως την ελεύθερη επιφάνεια μεταβαλλόταν από 0.32 σε 0.19, όπου h, η απόσταση από τον μαγνήτη.

Στο σχ.3.4.3 φαίνεται το μετρημένο πεδίο ταχυτήτων σε απόσταση 3.5 mm από τον πυθμένα και πάνω από τον μαγνήτη (που δείχνεται με έναν κύκλο) για δυο εντάσεις ρεύματος, 25mA (a) και 50mA (b) και το οποίο χαρακτηρίζεται από δυο δίνες αντίθετης φοράς. Οι δίνες αυτές είναι μακρόστενες, με τη μεγαλύτερη διάσταση παράλληλη προς την κατεύθυνση x δηλ. κάθετη στον άξονα που συνδέει τα ηλεκτρόδια και παράλληλη προς την ασκούμενη δύναμη Lorentz. Η μέγιστη ταχύτητα του ρευστού στην πρώτη περίπτωση ήταν 5.8 mm/s και στη δεύτερη 9.8 mm/s.



Σχ. 3.4.3 Μετρημένο πεδίο ταχυτήτων σε οριζόντιο επίπεδο  $z=3.5$  mm για ρεύμα  $I=25$ mA (a) και  $I=50$ mA (b)

Λόγω της παρουσίας του πυθμένα της δεξαμενής, η ταχύτητα του ρευστού μειώνεται από την ελεύθερη επιφάνεια προς τον πυθμένα. Τυπικές μεταβολές της  $y$ -συνιστώσας καθ' ύψος δείχνονται στο σχ.3.4.4 για ένταση ρεύματος 25 mA στον άξονα συμμετρίας ( $x=0$ ).

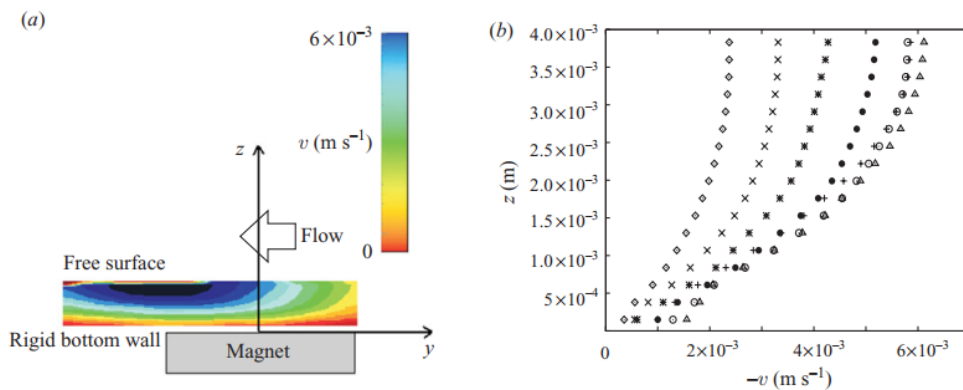
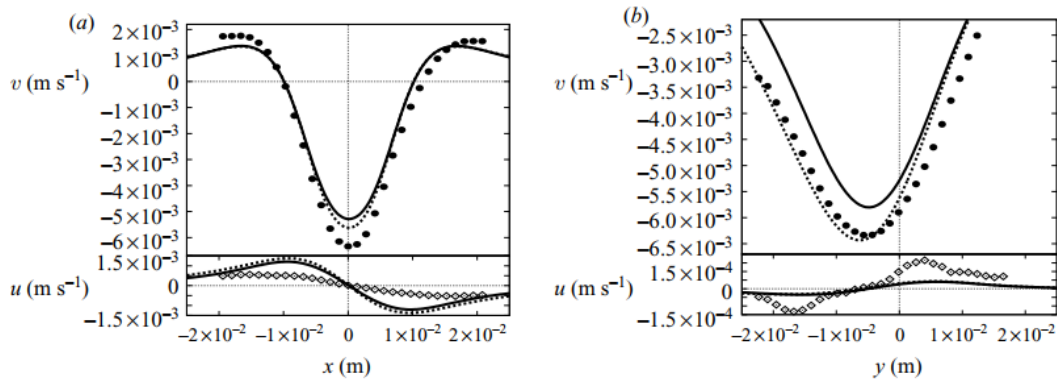


FIGURE 4. (a) Magnitude of the velocity component perpendicular to the injected electric current ( $v$ ) at the vertical  $x=0$  plane for  $I=25$  mA. (b) Profiles of the  $v$  velocity component as a function of the depth  $z$  at the symmetry plane  $x=0$ , for different positions upstream and downstream of the magnet centre:  $\diamond$ ,  $y=0.53d$ ;  $\times$ ,  $y=0.33d$ ;  $*$ ,  $y=0.19d$ ;  $\bullet$ ,  $y=0$ ;  $\ominus$ ,  $y=-0.19d$ ;  $\triangle$ ,  $y=-0.38d$ ;  $+$ ,  $y=-0.58d$ . At  $z=0$ ,  $B_{max}=0.22$  T ( $Ha=0.32$ ).

Σχ. 3.4.4 Καθ' ύψος κατανομές της συνιστώσας της ταχύτητας παράλληλης στον άξονα  $y$

Στο σχ. 3.4.5 δείχνονται οι κατανομές των δυο συνιστωσών της ταχύτητας του ρευστού παράλληλα και κάθετα στο επιβαλλόμενο ρεύμα ( $v$  και  $u$ , αντίστοιχα) σε απόσταση  $z=3.5$  mm από τον πυθμένα. Παρατηρούμε ότι η  $v$  συνιστώσα μεγιστοποιείται για  $x=0$  ενώ η  $u$  συνιστώσα αλλάζει πρόσημο που οφείλεται στις δυο δίνες αντίθετης κυκλοφορίας. Οι συνεχείς γραμμές αποτελούν λύση των υδρο-μαγνητικών εξισώσεων.



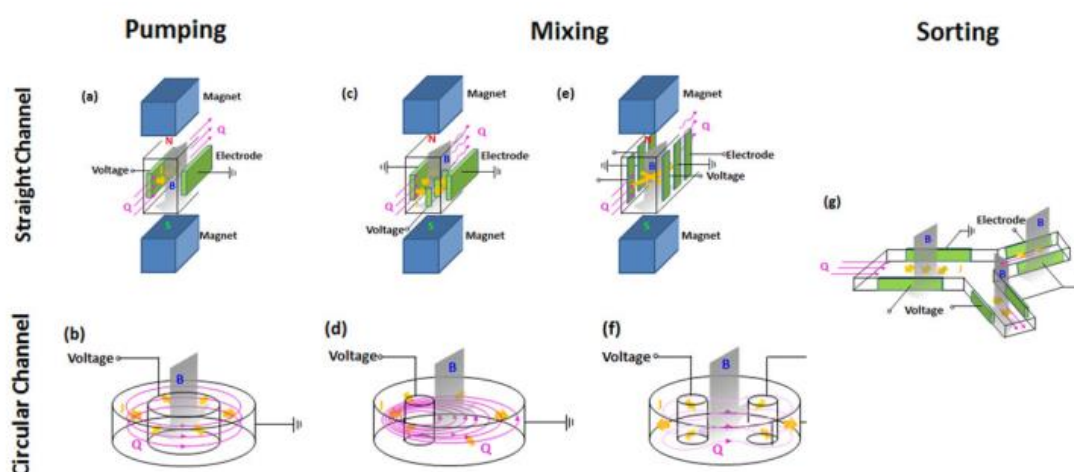
Σχ.3.4.5 Κατανομές της ταχύτητας παράλληλα ( $v$  συνιστώσα) και κάθετα ( $u$  συνιστώσα) προς το επιβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα  $I=25\text{mA}$  σε απόσταση  $z=3.5\text{ mm}$  από τον πυθμένα.  $y=0$  (a) και  $x=0$  (b).

**3.5 T. Stan Gregory, Rui Cheng, Guoyi Tang, Leidong Mao, and Zion Tsz Ho Tse, 2016. The Magnetohydrodynamic Effect and its Associated Material Designs for Biomedical Applications: A State of the Art Review. Adv Funct Mater, 26 (22), 3942–3952.**

Στην εργασία αυτή γίνεται ανασκόπηση εφαρμογών της μαγνητοϋδροδυναμικής σε βιοϊατρικές εφαρμογές. Ένα παράδειγμα αποτελούν οι **μικρο-αντλίες έγχυσης φαρμάκων** καθώς και διατάξεις lab- on- a- chip όπου γίνονται χημικές αντιδράσεις χωρίς τη χρήση κινούμενων μηχανικών εξαρτημάτων. Οι αντλίες είναι απλούστερες από τις μηχανικές αντλίες και κατασκευάζονται ευκολότερα. Συνήθως χρησιμοποιείται μια πηγή συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, ένα ζεύγος ηλεκτροδίων και μόνιμοι μαγνήτες. Η κατεύθυνση της ροής του ρευστού μπορεί να προσδιοριστεί είτε από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είτε από την πηγή ρεύματος. Οι αντλίες συνεχούς ρεύματος προκαλούν μεγαλύτερες παροχές ρευστού αλλά υστερούν έναντι των εναλλασσόμενου ρεύματος διότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους προκαλούν φυσαλίδες στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων απόμονώνοντάς τα από το αγώγιμο ρευστό, μειώνοντας την απόδοσή τους και προκαλώντας αστάθεια στην παροχή.

Μια άλλη εφαρμογή είναι οι **αναμείκτες υγρών** που χρησιμοποιούνται σε μικρορευστομηχανικά συστήματα και οι οποίοι πρέπει να είναι αποδοτικοί ώστε η ανάμειξη να γίνει αποδοτικά σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό είναι απαιτούμενο σε διάφορες βιολογικές διεργασίες όπως είναι η καλλιέργεια κυττάρων, αντιδράσεις ενζύμων, η σύνθεση πρωτεϊνών, κα. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι

συντελεστές διάχυσης μεγάλων μορίων, όπως το DNA, οι πρωτεΐνες, τα βακτήρια και τα ερυθρά και λευκά αιμοσφαίρια είναι πολύ μικροί σε σχέση με μικρών διαστάσεων μόρια με αποτέλεσμα η ανάμειξή τους να είναι δύσκολη. Οι αναμεικτες προκαλούν με τη βοήθεια των δυνάμεων Lorentz και κατάλληλες διατάξεις ηλεκτροδίων πολύπλοκες ροές ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορα η ανάμειξη. Στο σχ. 3.5.1 δείχνονται μερικά παραδείγματα αντλιών, αναμεικτών και ενός διαχωριστήρα π.χ. κυττάρων, βασισμένες σε ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις.



Σχ. 3.5.1 Ηλεκτρομαγνητικές μικροαντλίες, αναμεικτες και διαχωριστήρας

Μια άλλη εφαρμογή σχετίζεται με την κίνηση, μέσα στο κυκλοφορικό σύστημα, ρομπότ μικρών διαστάσεων εκμεταλλευόμενοι το ισχυρό μαγνητικό πεδίο των σαρωτών MRI μαγνητικής επαγωγής της τάξης του 1.5 έως 3 Tesla. Υπενθυμίζεται ότι το αίμα είναι ηλεκτρικά αγώγιμο ρευστό αποτελούμενο από πλάσμα που περιέχει λίπη, πρωτεΐνες, άλατα, σάκχαρο και ερυθρά αιμοσφαίρια. Η κίνηση των σωματιδίων αυτών μέσα στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο όταν γίνεται χρήση σαρωτή MRI επηρεάζεται από τις δυνάμεις Lorentz, που ασκούνται σε αυτά, και ταυτόχρονα τα ίδια προκαλούν ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό τοίχωμα των αγγείων.

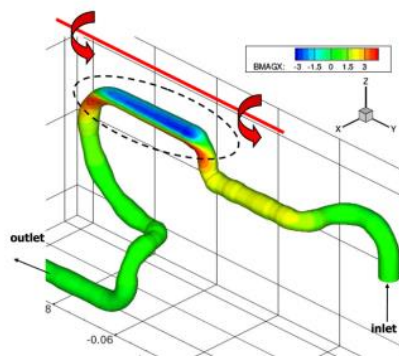
**3.6 S. Rashidi, J. A. Esfahani, M. Maskaniyan, 2017. Applications of magnetohydrodynamics in biological systems-A review on the numerical studies. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 439, 358–37.**

Στην εργασία αυτή γίνεται ανασκόπηση διαφόρων υπολογιστικών μελετών μαγνητοϋδροδυναμικών ροών με εφαρμογές στη ροή του αίματος, όπως παλμικών ροών, περισταλτικών και μεταφοράς φαρμάκων. Μεταξύ άλλων, διαπιστώνεται ότι

κατά την εγχείρηση ανοικτής καρδιάς μπορεί, εφόσον χρειαστεί, να μειωθεί η παροχή του αίματος καθώς και η θερμοκρασία των ιστών με εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου. Επίσης, με εφαρμογή μαγνητικού πεδίου μπορεί να αποφευχθεί η θρόμβωση του αίματος σε περισταλτικές ροές και η διευκόλυνση στη κίνηση της τροφής στο γαστρεντερικό σύστημα. Λόγω της παρουσίας της αιμοσφαιρίνης στα ερυθρά αιμοσφαίρια, όπου υπάρχουν ιόντα σιδήρου, το αίμα παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες οι οποίες εξαρτώνται από την ποσότητα του οξυγόνου. Το οξυγονωμένο αίμα (το αίμα των αρτηριών) έχει διαμαγνητικές ιδιότητες ενώ το αίμα με περιορισμένο οξυγόνο (φλεβικό αίμα) παραμαγνητικές. Υπενθυμίζεται ότι τα παραμαγνητικά υλικά μαγνητίζονται υπό την παρουσία μαγνήτη αλλά μετά την απομάκρυνσή του παύουν να έχουν μαγνητικές ιδιότητες ενώ τα διαμαγνητικά απωθούνται από το μαγνητικό πεδίο και δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο αντίθετο από το επιβαλλόμενο. Σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του αίματος αυτή παίρνει τιμές μεταξύ 0.7 και 0.9 S/m αυξανόμενη με την ταχύτητα του αίματος και τον αιματοκρίτη.

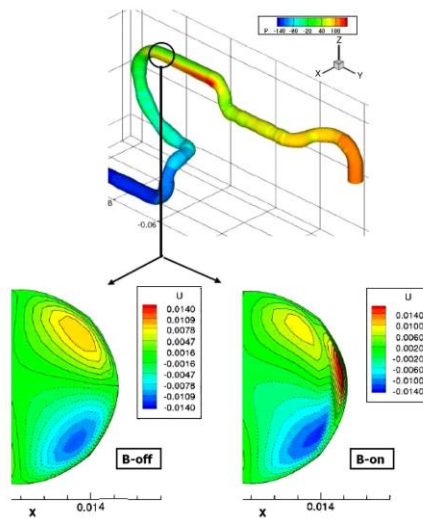
**3.7 S. Kenjeres, 2008. Numerical analysis of blood flow in realistic arteries subjected to strong non-uniform magnetic fields. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29, 752-764.**

Στην υπολογιστική αυτή εργασία μελετήθηκε η αιματική ροή στη δεξιά στεφανιαία αρτηρία με ρεαλιστικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά χωρίς και με την παρουσία μαγνητικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο, παραγόμενο από ένα σύρμα διαρρέομενο από ηλεκτρικό ρεύμα, σε μικρή απόσταση από ένα τμήμα της αρτηρίας (σχ.3.7.1), φαίνεται να επηρεάζει έντονα την δευτερεύουσα ροή (σχ.3.7.2) αυξάνοντας τον αριθμό των δευτερευουσών δινών.



Σχ.3.7.1 Τμήμα στεφανιαίας αρτηρίας και ένας ηλεκτρικός αγωγός (κόκκινη γραμμή) για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου

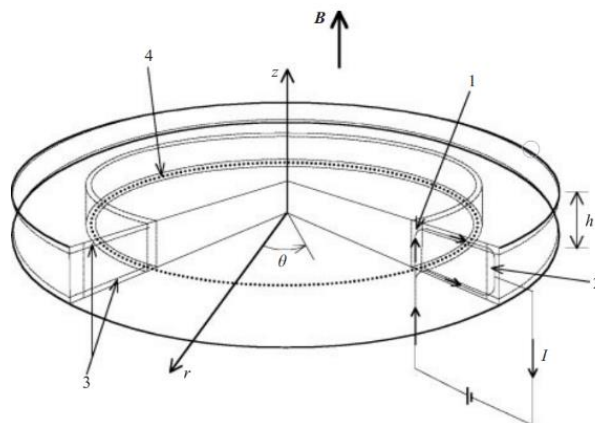




Σχ.3.7.2 Δευτερεύουσα ροή σε μια καμύλη της στεφανιαίας αρτηρίας χωρίς την παρουσία μαγνητικού πεδίου (αριστερά) και με την παρουσία του (δεξιά)

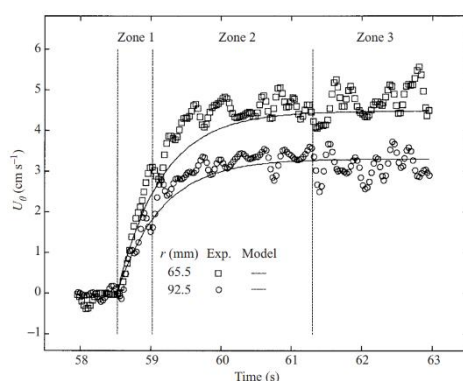
**3.8 K. Messadek, R. Moreau, 2002. An experimental investigation of MHD quasi-two-dimensional turbulent shear flows. J. Fluid Mech. (2002), vol. 456, pp. 137-159.**

Η πειραματική διάταξη της εργασίας αυτής αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 22 cm και ύψους 1 cm, γεμάτο με υδράργυρο. Ο πυθμένας και το κάλυμα του δοχείου είναι ηλεκτρικώς μονωμένα. Σε απόσταση από το κέντρο 5.4 cm και 9.3 cm, αντίστοιχα, τοποθετούνται ηλεκτροδία (διαμέτρου 1 mm και σε απόσταση 1.4 mm) κατά μήκος της περιφέρειας δυο ομόκεντρων κύκλων. Η μια, από τις δυο σειρές ηλεκτροδίων, συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος ελεγχόμενης έντασης (από 10 A έως 70 A) αποτελώντας την άνοδο, ενώ το ρεύμα περνά μέσα από το εξωτερικό κυλινδρικό τοίχωμα του δοχείου που είναι από χαλκό (βλ. σχ.3.8.1).



### Σχ. 3.8.1 Πειραματική διάταξη

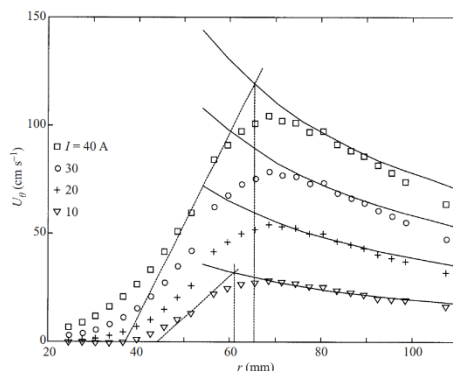
Στο σχ.3.8.1 με τον αριθμό 3 δείχνονται τα λεγόμενα στρώματα Hartmann όπου η ταχύτητα του ρευστού αυξάνει από μηδενική τιμή (επάνω στον τοίχο) σε μη μηδενικές τιμές σε μικρή απόσταση από αυτόν. Στην περιοχή αυτή, το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στην ταχύτητα. Μεταξύ των ηλεκτροδίων και της εξωτερικής επιφάνειας του κυλίνδρου, ο υδράργυρος τίθεται σε περιστροφική κίνηση λόγω των ασκούμενων δυνάμεων Lorentz με αποτέλεσμα το ρευστό που βρίσκεται προς το κέντρο του δοχείου (στο οποίο δεν ασκούνται δυνάμεις Lorentz) να κινείται με μικρότερη ταχύτητα και μεταξύ των δυο περιοχών να αναπτύσσεται ένα φύλλο διάτμησης. Το φύλλο διάτμησης ακόμα και για μικρές εντάσεις ρεύματος (περί το 1 A) γίνεται ασταθές με αποτέλεσμα να μετατρέπεται η ροή σε τυρβώδη για εντάσεις των 10 A. Δυο οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (κατά την ακτινική και εφαπτομενική κατεύθυνση) μετρώνται με τη βοήθεια οργάνων που καταγράφουν το ηλεκτρικό δυναμικό. Στο σχ.3.8.2 δείχνονται οι χρονοσειρές της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας μετρημένες σε δυο ακτινικές θέσεις (65.5 mm και 92.5 mm) για ένταση ρεύματος 3 A και μαγνητική επαγωγή 4 T. Από το σχήμα αυτό διαπιστώνεται μια απότομη αύξηση της ταχύτητας λίγο μετά την επιβολή της τάσης και στη συνέχεια οι διαταραχές της ταχύτητας αυξάνουν και διατηρούνται. Η διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα μεταξύ της πρώτης και δεύτερης ζώνης οριοθετεί την μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Στη δεύτερη ζώνη παρατηρείται ο σχηματισμός δινών και αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους ενώ στη τρίτη ζώνη η ροή είναι μη μόνιμη.



### Σχ.3.8.2 Μετρημένη εφαπτομενική ταχύτητα σε δυο ακτινικές θέσεις

Στο σχ.3.8.3 δείχνονται οι κατανομές της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας για εντάσεις ρεύματος 10 A έως 40 A και μαγνητική επαγωγή 3 T. Το πάχος του φύλλου διάτμησης, το οποίο ορίζεται ως:  $\delta = u_{\max} / (du/dr)_{\max}$ , βρίσκεται ότι είναι ανάλογο του

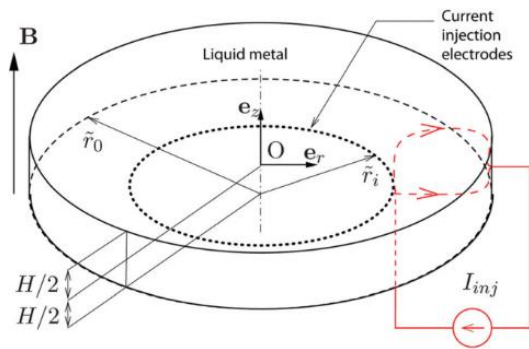
$(Ha/Re)^{-0.5}$ . Σχετικά με την στροφορμή του ρευστού, διαπιστώνεται ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου δεν την επηρεάζει ενώ η ένταση του ρεύματος την αυξάνει γραμμικά. Το πεδίο ροής κυριαρχείται από μικρό αριθμό μεγάλων δινών, οι οποίες ενεργοποιούνται από μια αντίστροφη μεταφορά ενέργειας δηλ από μικρές προς μεγάλες δομές του ρευστού.



Σχ.3.8.3 Κατανομή της εφαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας για διάφορες εντάσεις ρεύματος

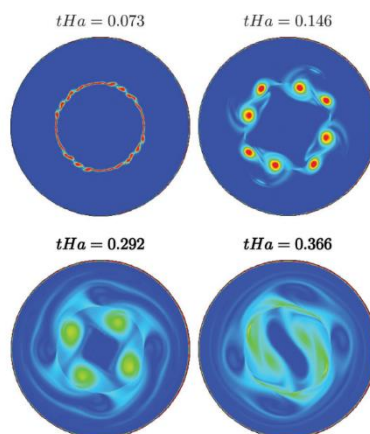
**3.9 A. Potherat and J-P Schweitzer, 2011. A shallow water model for magnetohydrodynamic flows with turbulent Hartmann layers. Physics of Fluids, 23, 055108-1-11.**

Στην εργασία αυτή προλέγεται το πεδίο ροής υδραργύρου που οφείλεται στην εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου και ηλεκτρικού ρεύματος που το διαρρέει σύμφωνα με παρόμοιο πείραμα που έγινε στη πόλη Grenoble της Γαλλίας και πήρε την επωνυμία MATUR (Magnetic Turbulence). Η πειραματική διάταξη (σχ.3.9.1) αποτελείται από κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου 22 cm και ύψους 1 cm γεμάτο με υδράργυρο πυκνότητας  $\rho=13530 \text{ Kg/m}^3$ , κινηματικής συνεκτικότητας  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  και ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma=1.05 \times 10^6 \text{ S/m}$ . Ένας σωληνοειδής μαγνήτης με άξονα που ταυτίζεται με τον άξονα του κυλινδρικού δοχείου τοποθετείται κάτω από το δοχείο με μέγιστη μαγνητική επαγωγή 6T. Στον πυθμένα του δοχείου (που είναι ηλεκτρικά μονωμένος) τοποθετείται μια σειρά ηλεκτροδίων κατά μήκος της περιφέρειας κύκλου διαμέτρου  $11 \text{ cm}=2r_i$  τα οποία συνδέονται με τον θετικό πόλο πηγής συνεχούς ρεύματος. Ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με την κατακόρυφη κυλινδρική επιφάνεια του δοχείου (διαμέτρου 22 cm).



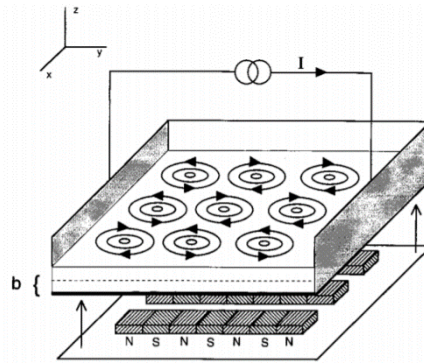
Σχ.3.9.1 Πειραματική διάταξη (MATUR experiment, Γαλλία)

Υπό τη δράση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, οι δυνάμεις Lorentz που ασκούνται στα μόρια του υδραργύρου έχουν κατεύθυνση κάθετη στην τοπική ακτίνα, της οποίας η αρχή είναι στο κέντρο του δοχείου. Επειδή για το διάστημα  $r=0$  έως  $r_i$  οι δυνάμεις Lorentz είναι πρακτικώς αμελητέες ενώ στο υπόλοιπο τμήμα του πεδίου ασκούνται δυνάμεις, δημιουργείται μεταξύ του κινούμενου και του ακίνητου ρευστού ένα φύλλο διάτμησης το οποίο, όταν η περιφερειακή ταχύτητα υπερβεί μια οριακή τιμή, σπάει σε δίνες λόγω ασταθειών της ροής τύπου Kelvin-Helmholtz. Οι δίνες αυτές με το πέρασμα του χρόνου ενώνονται δημιουργώντας δίνες μεγαλύτερων διαστάσεων οι οποίες διαταράσσονται και τελικά το πεδίο γίνεται τυρβώδες. Οι δίνες επιμηκύνονται και κινούνται προς μεγαλύτερες ακτίνες προς την άκρη του δοχείου. Ουσιαστικά εμφανίζεται μια αλληλουχία από καταστάσεις. Κατ'αρχήν εμφανίζονται μικρές δίνες μεγάλης στροβιλότητας κοντά στα ηλεκτρόδια, οι οποίες στη συνέχεια συνενώνονται σε μεγαλύτερες και με την πάροδο του χρόνου χάνουν την ενέργειά τους ώστε η διαδικασία να αρχίσει πάλι από την αρχή. Στο σχ.3.9.2 δείχνεται η εξέλιξη του πεδίου ροής σε 4 χρονικές στιγμές.



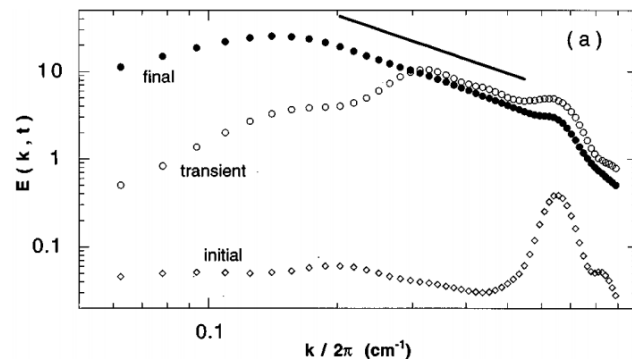
Σχ. 3.9.2 Τέσσερα στιγμιότυπα της ροής υδραργύρου υπό την παρουσία μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου

**3.10 J. Paret and P. Tabeling, 1998. Intermittency in the two-dimensional inverse cascade of energy: Experimental observations. Physics of Fluids, 10, 3126-3136.**



Σχ.3.10.1 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα της εργασίας αυτής έγιναν σε μια ανοικτή δεξαμενή, διαστάσεων 15 cm x 15 cm, με ρέον μέσο αλατόνερο. Μια σειρά από μαγνήτες μέγιστης επαγωγής 0.3T κατακόρυφης κατεύθυνσης ήταν τοποθετημένοι κάτω από τη δεξαμενή, ενώ μια πηγή ρεύματος επέβαλε μια διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο απέναντι πλευρών της δεξαμενής. Η πηγή του ρεύματος ενεργοποιείτο κατά τυχαίες χρονικές στιγμές, για διάστημα 4s και η καταγραφή του πεδίου ταχυτήτων μέσω της τεχνικής PIV γινόταν για διάστημα 6 min. Με βάση τις μετρημένες ταχύτητες έγινε ο υπολογισμός της μέσης τιμής του τετραγώνου της διαφοράς ταχύτητας μεταξύ δυο σημείων τυχαίας απόστασης  $r$  από την οποία υπολογίστηκε το ενεργειακό φάσμα  $E(k)$ , όπου  $k$  είναι ο κυματικός αριθμός (βλ. σχ.3.10.2).

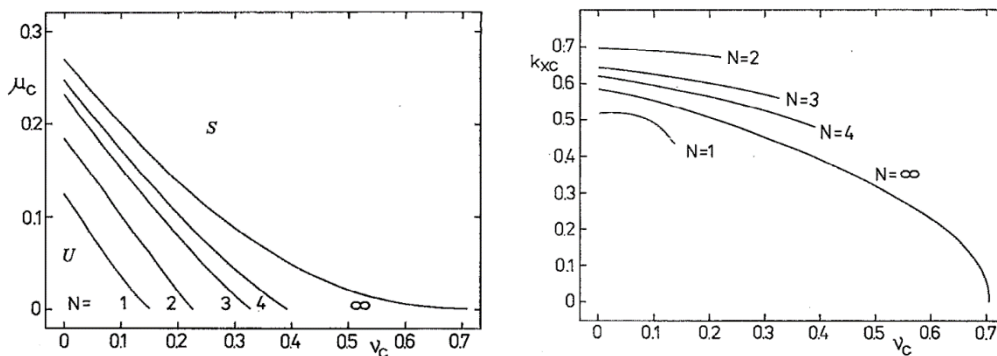


Σχ.3.10.2 Ενεργειακό φάσμα λίγο μετά τη στιγμή έναρξης της ροής (initial) και μετά από μεγάλο χρόνο (final)

Από το ενεργειακό φάσμα διαπιστώνεται ότι κατά την έναρξη της ροής εμφανίζεται ένα μέγιστο σε μια μεγάλη τιμή κυματικού αριθμού  $k_i$  που σημαίνει ότι αρχικώς διεγείρονται δομές του ρευστού μικρών διαστάσεων ενώ καθώς περνάει ο χρόνος εμφανίζεται η γνωστή από τη βιβλιογραφία μείωση της ενέργειας με τον αριθμό  $k$  της μορφής  $E \sim k^{-5/3}$ . Οι συγγραφείς απέδειξαν ότι για αριθμούς κύματος μικρότερους του  $k_i$  η μεταφορά ενέργειας γίνεται από τις μικρότερες προς τις μεγαλύτερες δομές της ροής.

### 3.11 A. Thess, Instabilities in two-dimensional spatially periodic flows. Part I: Kolmogorov flow, 1992. Physics of Fluids, 4(7), 1385-1395.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η ευστάθεια-αστάθεια της ροής τύπου Kolmogorov δηλ. ενός διδιάστατου πεδίου ροής όπου η ταχύτητα  $u$  μεταβάλλεται χωρικά σύμφωνα με τη σχέση:  $u = -\cos y$  και το πεδίο εκτείνεται κατά  $y$  μεταξύ  $y=0$  και  $y=2\pi N$ , όπου  $N=1,2, \dots$  Το πεδίο αυτό ροής αποτελεί μια κατηγορία ΜΥΔ ροών όπου αυξομείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά τους. Από την σχετική ανάλυση προέκυψαν τρεις αδιάστατες παράμετροι που σχετίζονται με την ευστάθεια της ροής: ο αριθμός  $\nu$ , που είναι ο αντίστροφος του αριθμού  $Re$ , ο αριθμός  $\mu$ , που είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τη γραμμική δύναμη τριβής που οφείλεται στη δράση του ιξώδους στον πυθμένα, και  $k_x$  η κυκλική συχνότητα κατά την κατεύθυνση της ροής  $x$ . Στο σχ.3.11.1 δείχνονται οι μεταξύ τους σχέσεις, το γράμμα  $S$  αποτελεί την περιοχή που η ροή είναι ευσταθής (stable) και το γράμμα  $U$  την περιοχή που η ροή είναι ασταθής (unstable).



Σχ. 3.11.1 Τρεις παράμετροι ( $\mu$ ,  $\nu$ ,  $k_x$ ) που συνδέονται με την ευστάθεια-αστάθεια της ροής

Στην περίπτωση που η ροή ενός υγρού μετάλλου πυκνότητας  $\rho$ , ηλεκτρικής αγωγιμότητας  $\sigma$ , κινηματικής συνεκτικότητας  $\nu^*$ , πάχους  $a$  (βάθος δεξαμενής), προκαλείται από κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής  $B_0$  και το ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $I$  εισάγεται από μια σειρά ηλεκτροδίων τοποθετημένων σε απόσταση  $L/2$  μεταξύ τους, η ευστάθεια της ροής Kolmogorov για την περίπτωση  $N=1$ , ελέγχεται από τις παραμέτρους  $\mu$ ,  $\nu$  όπου:

$$\mu = \frac{(2\pi)^2 Re + (2\pi)^4 Rh}{4\pi^3 Re Rh^2}, \quad \nu = \frac{(2\pi)^2 Re + (2\pi)^4 Rh}{\pi Re^2 Rh}$$

$$\text{, όπου } Re = \frac{L}{\nu^*} \sqrt{\frac{B_0 I}{\rho \alpha}}, \quad Rh = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\alpha I}{B_0 \sigma^* \nu}}$$

Εάν η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται χωρικά ώστε να ισχύει:  $B=B_0 \sin(2\pi y/L)$  και το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ομοιόμορφο  $j=j_0$  κατά την  $y$  κατεύθυνση οι παράμετροι ευστάθειας  $\mu$  και  $\nu$  είναι:

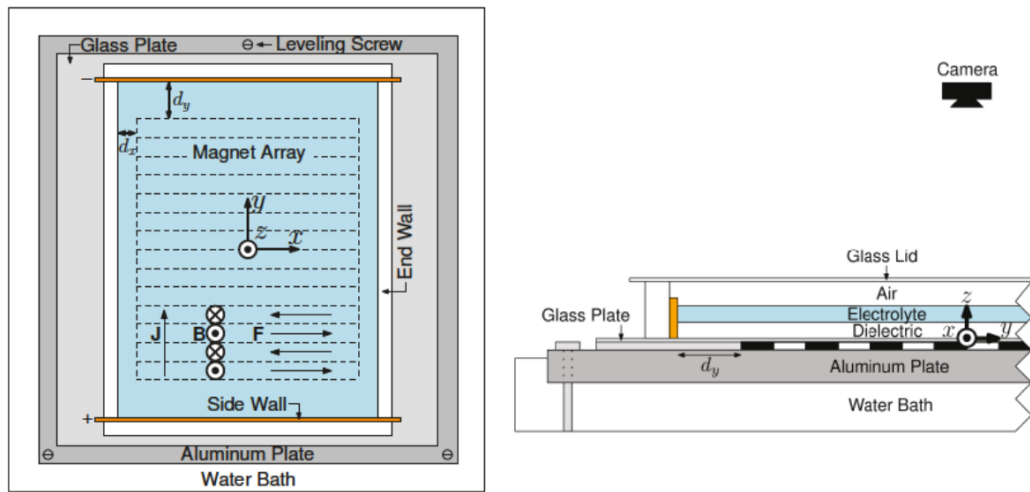
$$\mu = (1 + \lambda)/R \quad , \quad \nu = (1 + \lambda)(\lambda/R)$$

$$\text{όπου } R = \frac{L^3 j_0 B_0}{\nu^{*2} (2\pi)^3 \rho}, \quad \lambda = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{L}{\alpha}\right)^2.$$

### 3.12 J. Titohof, B. Suri, R. K. Pallantla, R. O. Grigoriev, M. F. Schatz, 2018. Bifurcations in a quasi-two-dimensional Kolmogorof-like flow. Journal of Fluid Mechanics.

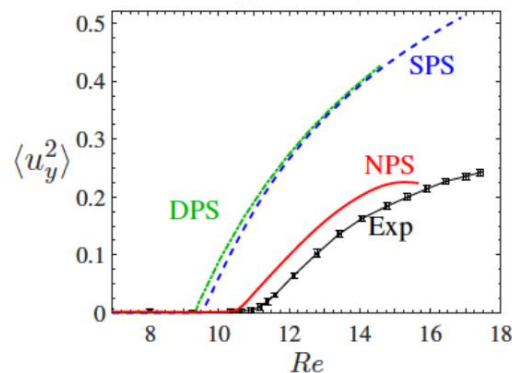
Στην εργασία αυτή εξετάζονται, πειραματικά και υπολογιστικά, μαγνητοϋδροδυναμικές ροές σχεδόν διδιάστατων πεδίων ροής. Χρησιμοποιούνται δυο ρευστά, ένα διηλεκτρικό (ιζώδους 1.3mPas) με μεγαλύτερη πυκνότητα ( $1769 \text{ kg/m}^3$ ) στον πυθμένα μιας δεξαμενής και ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη με μικρότερη πυκνότητα ( $1192 \text{ kg/m}^3$ ) πάνω από το διηλεκτρικό αλλά μεγαλύτερου ιζώδους (5.85mPas). Με τον τρόπο αυτό, οι συγγραφείς ήθελαν να πετύχουν το πεδίο ροής να είναι κατά το δυνατόν διδιάστατο. Κάτω από τη δεξαμενή τοποθετήθηκαν 14 μαγνήτες, ο ένας δίπλα στον άλλο (με διαστάσεις ο καθένας 15.24 cm x 1.27 cm x 0.32 cm) με μέγιστη μαγνητική επαγωγή 0.2T ώστε το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο να είναι κατακόρυφο και οι μαγνητικές γραμμές να αλλάζουν πρόσημο περιοδικώς στο χώρο. Οι μαγνήτες ήταν τοποθετημένοι με τη μεγαλύτερη διάστασή τους παράλληλη προς τις δυο πλευρές της δεξαμενής όπου βρίσκονταν ηλεκτρόδια για την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο ρευστό (σχ. 3.12.1). Μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων εφαρμόστηκε συνεχής ελεγχόμενη

τάση και οι πυκνότητες των ηλεκτρικών ρευμάτων που παράχθηκαν κυμαίνονταν από 10 έως 40 A/m<sup>2</sup>.



Σχ.3.12.1 Πειραματική διάταξη

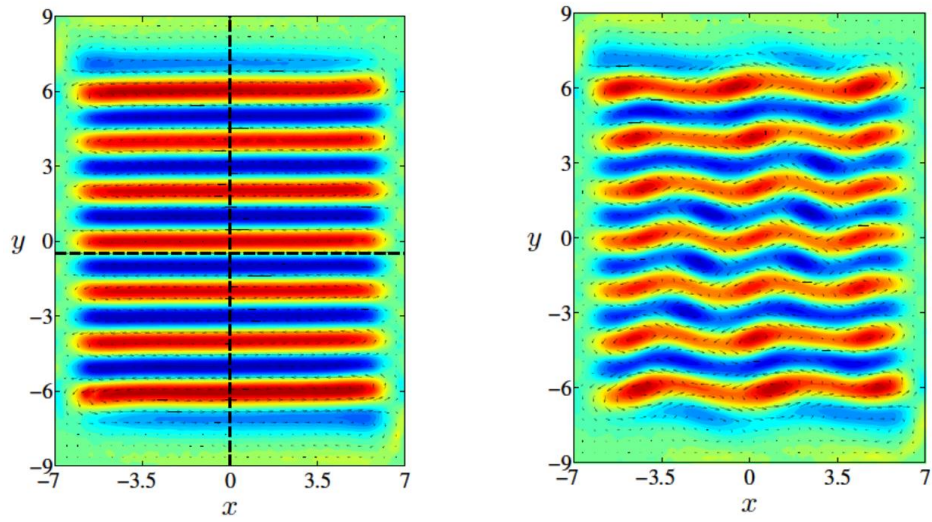
Αυξάνοντας την ένταση του ρεύματος προκαλούνται διαταραχές στο πεδίο ροής δεδομένου ότι αυξάνει ο αριθμός  $Re=UL/\nu$ , όπου  $U$  είναι η μέση χωρική τιμή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας και  $L=1.27$  cm είναι η απόσταση των κέντρων δυο γειτονικών μαγνητών που ταυτίζεται με το πλάτος τους. Στο σχ.3.12.2 δείχνεται η μέση τετραγωνική τιμή της ταχύτητας συναρτήσει του αριθμού  $Re$  με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα (Exp στο σχήμα) καθώς και αριθμητικές προλέξεις με βάση τρεις διαφορετικές οριακές συνθήκες.



Σχ. 3.12.2 Διαταραχές της ταχύτητας συναρτήσει του αριθμού  $Re$

Στο σχ.3.12.3 φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων για δυο αριθμούς  $Re$  εκ των οποίων στο ένα (αριστερά) που αντιστοιχεί στον μικρότερο αριθμό  $Re$  οι διαταραχές της ταχύτητας είναι πολύ μικρές σε αντίθεση με τις σαφώς μεγαλύτερες διαταραχές στο δεξί σχήμα.





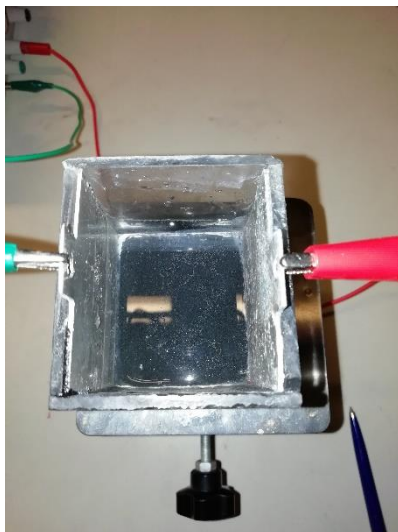
Σχ. 3.12.3 Το πεδίο ταχυτήτων για  $Re=8.1$  (αριστερά) και  $Re=14$  (δεξιά)

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑ

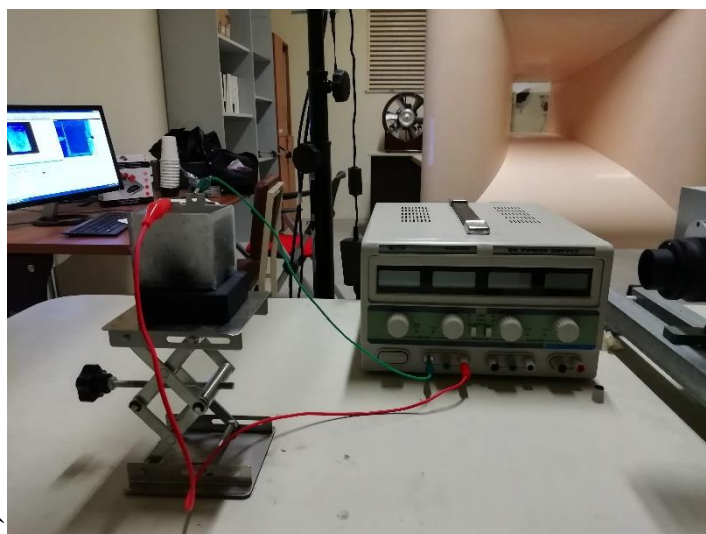
### 4.1 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε τα εξής μέρη:

**α) μια δεξαμενή** από Plexiglas διαστάσεων 55 mm x 45 mm και ύψους 40 mm μέσα στην οποία ήταν τοποθετημένη **ποσότητα αλατόνερου** βάθους 6 mm. Σε δυο απέναντι πλευρές της δεξαμενής (απόστασης 45 mm) ήταν τοποθετημένες δυο **πλάκες αλουμινίου** πάχους 1 mm (βλ. σχ.4.1.1) που συνδέονταν με **πηγή συνεχούς ρεύματος** ελεγχόμενης τάσης (σχ.4.1.2) για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στο ρέον μέσο. Δηλ. οι δυο πλάκες έπαιζαν τον ρόλο **των ηλεκτροδίων**.

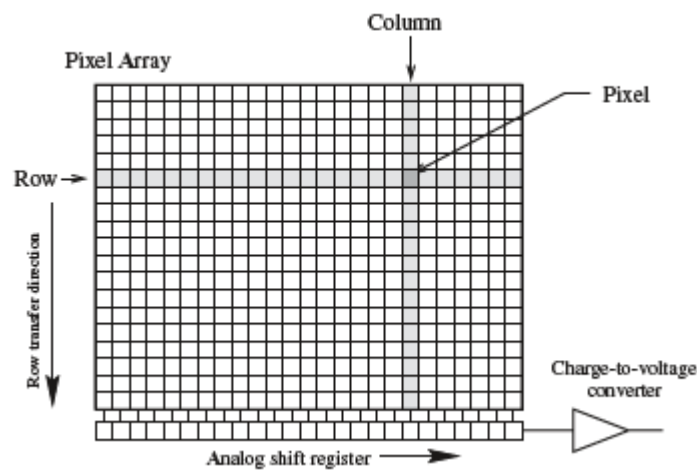


Σχ. 4.1.1 Δεξαμενή από Plexiglas και δυο ηλεκτροδία αλουμινίου



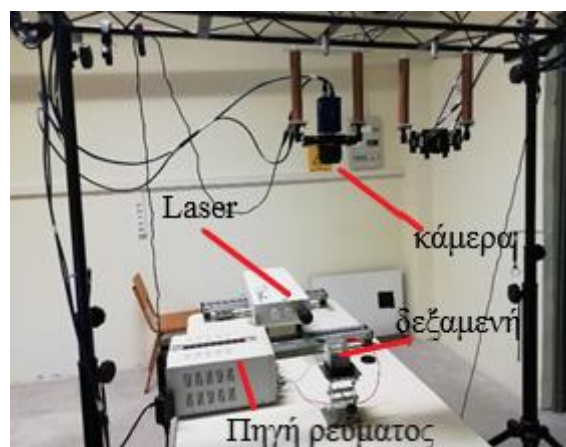
Σχ. 4.1.2 Τα δυο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα με την πηγή συνεχούς ρεύματος

β) Πάνω από τη δεξαμενή ήταν τοποθετημένη **μια κάμερα** ενός μετρητικού συστήματος PIV (Particle Image Velocimetry της Γερμανικής εταιρίας LaVision) σε απόσταση περίπου 500 mm από τον πυθμένα της δεξαμενής. Η κάμερα ήταν τύπου CCD (charged coupled device) με 2448 x 2050 pixel με διαστάσεις pixel 3.45μm x 3.45μm. Η κάμερα ήταν ειδική για χρήση σε διάταξη PIV και είχε τη δυνατότητα καταγραφής δυο εικόνων ελάχιστης χρονικής απόστασης 600 ns. Στο σχ.4.1.3 φαίνεται η διάταξη των pixel μιας κάμερας CCD στα οποία καταγράφεται η φωτεινότητα της εικόνας και η οποία στέλνεται υπό μορφή ηλεκτρικού σήματος στον αποθηκευτικό χώρο ενός υπολογιστή με τον οποίον είναι συνδεδεμένη η κάμερα.



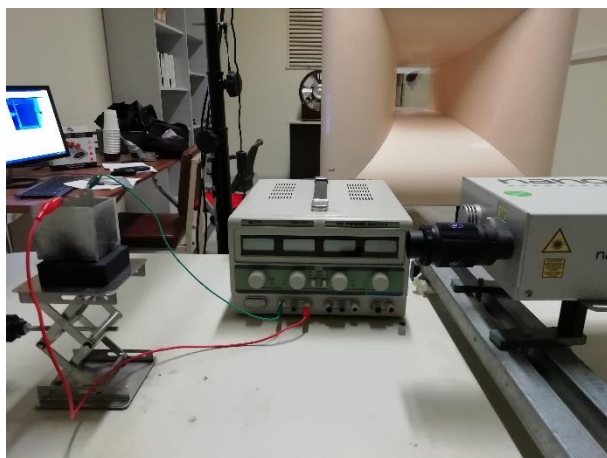
Σχ.4.1.3 Διάταξη pixel κάμερας τύπου CCD

γ) μια **συσσκευή Laser** (βλ. σχ.4.1.4) (τύπου Nd: YAG) φώτιζε παλμικά ένα οριζόντιο επίπεδο μέσα στο ρευστό, μήκους κύματος φωτός 532nm (πράσινο χρώμα).



Σχ. 4.1.4 Η πειραματική διάταξη: Η κάμερα, η δεξαμενή, η συσκευή Laser και η πηγή ρεύματος

Στο σχ. 4.1.5α φαίνεται (στα δεξιά) η έξοδος του φωτός από τη συσκευή Laser και στο σχ. 4.1.5.β η συσκευή Laser σε λειτουργία, εκπέμποντας πράσινο φως.



(α)



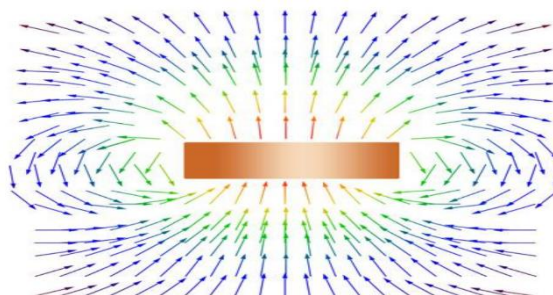
(β)

Σχ.4.1.5 Η συσκευή laser

δ) Η συσκευή Laser και η κάμερα λειτουργούσαν μέσω κατάλληλου **ηλεκτρονικού συστήματος συγχρονισμού** που συνδέονταν με **ηλεκτρονικό υπολογιστή** ώστε όταν φώτιζε η συσκευή Laser, η κάμερα αποθήκευε την αντίστοιχη εικόνα.

ε) Κάτω από τη δεξαμενή ήταν τοποθετημένοι **ένας ή περισσότεροι μαγνήτες** για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν:

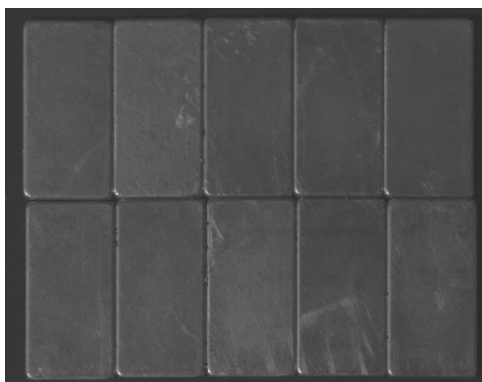
ε1) Ένας τοροειδής μαγνήτης (σχ.4.1.6) με ενδεικτικές γραμμές του μαγνητικού του πεδίου.



Σχ.4.1.6 Τοροειδής μαγνήτης (α), και το μαγνητικό του πεδίο (β)

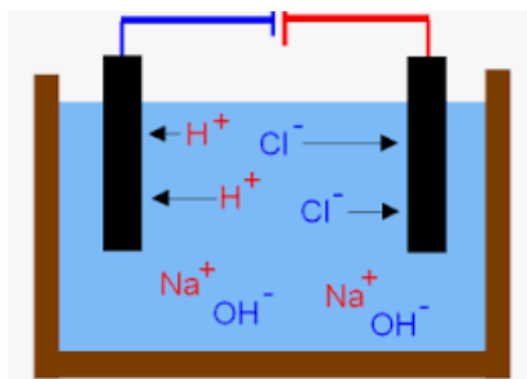
ε2) Τέσσερις καθώς και δέκα μαγνήτες σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, διαστάσεων 25 mm x 12.5 mm x 3 mm. Η μαγνητική επαγωγή σε απόσταση περίπου 6 mm ήταν 50 mT. Στο σχ.4.1.7 φαίνεται μια διάταξη 10 μαγνητών τοποθετημένοι με την μεγαλύτερη διάστασή τους να είναι κάθετη στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων δηλ.

παράλληλη προς το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κατακόρυφες και το πρόσημό τους εναλλάσσεται από μαγνήτη σε μαγνήτη δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλεται χωρικά.



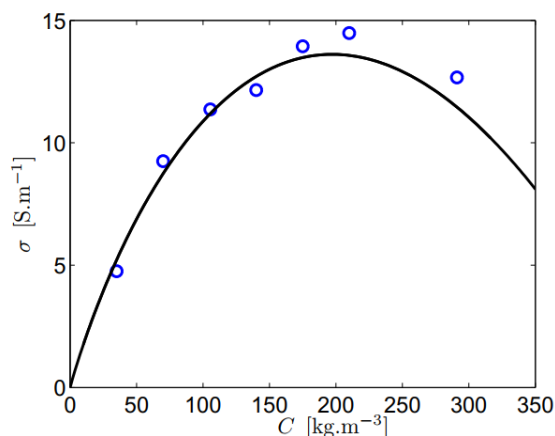
Σχ. 4.1.7 Δέκα μαγνήτες με αντίθετες πολικότητες

στ) Ρέον μέσο ήταν αλατόνερο συγκέντρωσης 150g ανά λίτρο απιονισμένου νερού. Επειδή στόχος της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη ΜΥΔ διδιάστατων ροών, φροντίσαμε το βάθος του ρευστού στη δεξαμενή να είναι μικρό δηλ. περί τα 6 mm. Επιβάλλοντας συνεχή τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων, προκλήθηκε ηλεκτρόλυση δηλ. παραγωγή χλωρίου στην άνοδο και υδρογόνου στην κάθοδο. Συγκεκριμένα, κατά την ηλεκτρόλυση, ιόντα χλωρίου (αρνητικά φορτισμένα) οδεύουν προς την άνοδο όπου ελευθερώνουν δυο ηλεκτρόνια ανά μόριο χλωρίου ενώ τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου οδεύουν προς την κάθοδο όπου παραλαμβάνουν δυο ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε μόρια υδρογόνου (βλ.σχ.4.1.8). Οι παραγόμενες ποσότητες χλωρίου και υδρογόνου (τα οποία είναι σε αέρια μορφή) εξαρτώνται από την διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων, αυξανόμενες όταν η διαφορά δυναμικού αυξάνει.



Σχ.4.1.8 Ηλεκτρόλυση αλατόνερου

Το αλατόνερο αποτελεί ηλεκτρικά αγώγιμο υγρό του οποίου η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση του άλατος. Στο σχ.4.1.9 φαίνεται ότι η αγωγιμότητα γίνεται μέγιστη (περίπου 15 S/m) για συγκέντρωση 200g άλατος ανά 1000g νερού. Επειδή στα πειράματα της εργασίας μας η συγκέντρωση ήταν 150g ανά 1000g νερού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ρευστού εκτιμάται ότι ήταν περί τα 12 S/m.



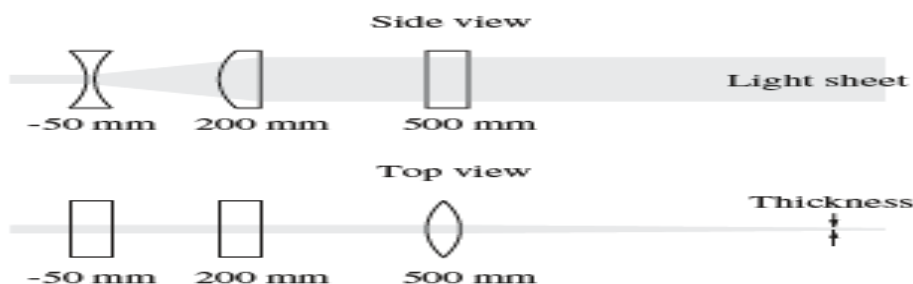
Σχ.4.1.9 Ηλεκτρική αγωγιμότητα αλατόνερου ( $\sigma$ ) συναρτήσει της συγκέντρωσης άλατος ( $C$ )

## 4.2 Μετρητική Τεχνική

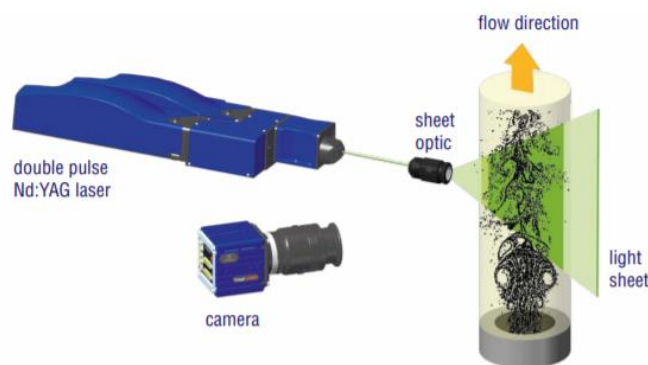
Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετήθηκαν πειραματικά διάφορες περιπτώσεις ΜΥΔ ροών μετρώντας το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού συναρτήσει του χρόνου σε ένα οριζόντιο επίπεδο σε απόσταση 3 mm από τον πυθμένα της δεξαμενής, εφαρμόζοντας την μετρητική τεχνική PIV (Particle image Velocimetry). Στη μέθοδο PIV χρησιμοποιείται μια πηγή φωτός για τον φωτισμό ενός επιπέδου μέσα στο ρευστό, πάνω στο οποίο γίνεται η μέτρηση των ταχυτήτων σωματιδίων που έχουν εισαχθεί στο ρευστό. Τα σωματίδια αυτά πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε να θεωρείται ότι η ταχύτητά τους είναι ίση με την ταχύτητα του ρευστού χωρίς να παρουσιάζουν λόγω αδράνειας υστέρηση. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν **σφαιρικά γυάλινα**, κούφια **σωματίδια**, **μέσης διαμέτρου 10μm**, της αμερικάνικης εταιρίας Potters Industries, με πυκνότητα  $1050\text{kg/m}^3$  δηλ. ελαφρά μεγαλύτερη του νερού. Τα σωματίδια αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές με πολύ καλά αποτελέσματα δεδομένου ότι καθιζάνουν με αργούς ρυθμούς και δεν επηρεάζουν το ρευστό στην κίνησή του.

Η ακτίνα μίας συσκευής Laser, συνήθως διαμέτρου 1 mm, μετατρέπεται σε φωτεινό επίπεδο περνώντας μέσα από έναν κυλινδρικό φακό που την μετατρέπει σε φύλλο

φωτός και στη συνέχεια μέσω σφαιρικού φακού με τη βοήθεια του οποίου ρυθμίζεται το πάχος του φύλλου φωτός σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την έξοδο της συσκευής του Laser. Στο σχ.4.2.1 δείχνεται μια παρόμοια διάταξη δημιουργίας φύλλου φωτός σε δυο όψεις και στο σχ.4.2.2 μια διάταξη PIV μέτρησης του πεδίου ταχυτήτων μιας δέσμης ρευστού.



Σχ.4.2.1 Διάταξη φακών για δημιουργία φύλλου φωτός



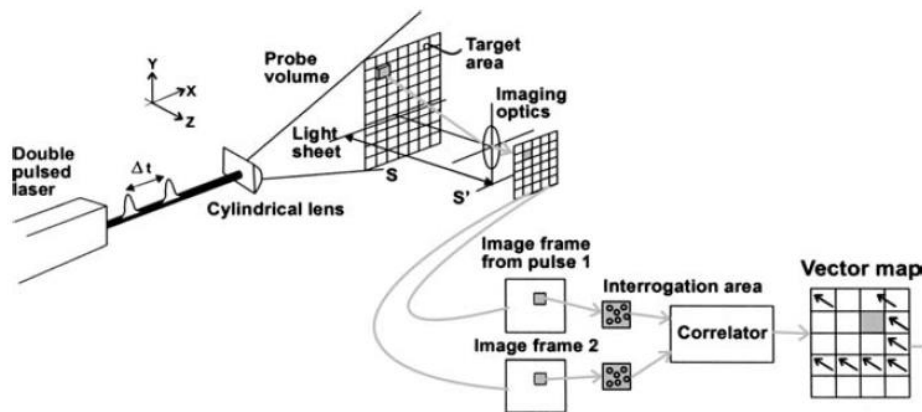
Σχ.4.2.2 Δημιουργία φωτεινού επιπέδου μέσα σε ρευστό

Για την μέτρηση μεγάλων σχετικά ταχυτήτων ρευστού, η φωτεινή πηγή πρέπει να είναι παλμική δηλ. να αναβοσβύνει ώστε τα είδωλα των σωματιδίων να παρουσιάζονται πρακτικώς ακίνητα. Στην αντίθεση περίπτωση, θα παρουσιάζονταν υπό τη μορφή γραμμών που αντιστοιχούν στις τροχιές τους, δυσκολεύοντας τον υπολογισμό της ταχύτητάς τους. Για τον λόγο αυτό έχει καθιερωθεί η χρήση παλμικών Laser, τα οποία παράγουν φως πολύ μικρής διάρκειας (της τάξης των nanosec) και η ενέργεια που εκπέμπουν είναι της τάξης των mJoule. Ο υπολογισμός της ταχύτητας του ρευστού βασίζεται στον υπολογισμό της μετατόπισης των σωματιδίων που συντελείται μέσα στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$  δυο αναλαμπών του Laser, το οποίο προεπιλέγεται. Π.χ. εάν οι ταχύτητες του ρευστού είναι μεγάλες, τότε πρέπει η χρονική απόσταση  $\Delta t$  να είναι μικρή ενώ αντίθετα στις μικρές ταχύτητες να είναι μεγάλη. Στην εργασία αυτή, το χρονικό διάστημα που επιλέξαμε για τις διάφορες εφαρμογές που εξετάσαμε ήταν στην περιοχή από 1.5 ms έως 30 ms. Εφόσον καταγραφούν δυο εικόνες με τα είδωλα των

σωματιδίων που αντιστοιχούν σε δυο χρονικές στιγμές απόστασης  $\Delta t$ , η μέθοδος PIV μπορεί να υπολογίσει την μετατόπιση των σωματιδίων σε χιλιάδες σημεία του φύλλου φωτός. Επιπλέον, εφόσον το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  είναι γνωστό, οι δυο συνιστώσες της ταχύτητας ( $u, v$ ) υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$u = \Delta x / \Delta t \quad \text{και} \quad v = \Delta y / \Delta t \quad (4.2.1)$$

όπου ( $\Delta x, \Delta y$ ) είναι η μετατόπιση των σωματιδίων κατά  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της μετατόπισης των σωματιδίων, οι εικόνες χωρίζονται σε εικονίδια διαστάσεων συνήθως  $64 \times 64$  pixel, τα οποία ονομάζονται interrogation windows. Σε κάθε ένα από τα εικονίδια αυτά πρέπει να υπάρχει αρκετός αριθμός ειδώλων σωματιδίων για να λειτουργήσει αποδοτικά η μέθοδος, τα οποία μετατοπίζονται από τη μια χρονική στιγμή  $t_1$  στην επόμενη  $t_2 = t_1 + \Delta t$ . Συγκρίνοντας την φωτεινότητα των δυο εικονιδίων, γίνεται ο υπολογισμός της μέσης μετατόπισης των σωματιδίων που βρίσκονται στα δυο εικονίδια και επομένως η μέση τους ταχύτητα. Στο σχ.4.2.3 δείχνεται σχηματικά η παραπάνω διαδικασία, η οποία καταλήγει (δεξί άκρο της εικόνας) στο λεγόμενο vector map, δηλ. σε διανύσματα ταχύτητας, ένα διάνυσμα για κάθε ζεύγος εικονιδίων.



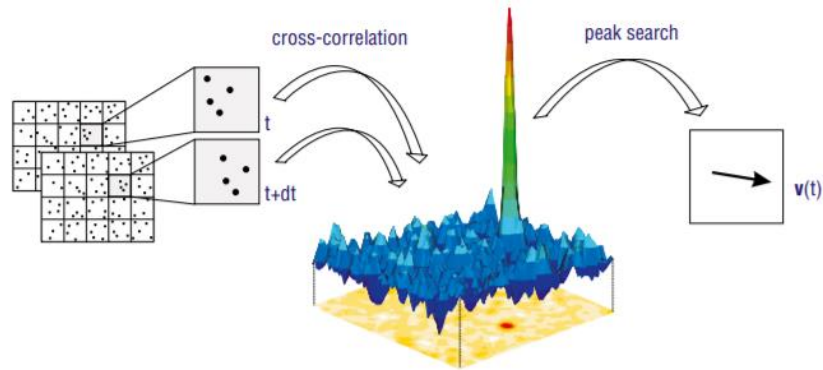
Σχ. 4.2.3 Εφαρμογή της μεθόδου ετεροσυσχέτισης

Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας των σωματιδίων για κάθε ζεύγος εικονιδίων προκύπτει από τον υπολογισμό της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης (cross-correlation function) των συναρτήσεων φωτεινότητας των δυο εικονιδίων δηλ. της φωτεινότητας  $I_1(x, y)$  (του εικονιδίου που αναφέρεται στην χρονική στιγμή  $t_1$ ) και της φωτεινότητας  $I_2(x, y)$  (του εικονιδίου που αναφέρεται στην χρονική στιγμή  $t_2$ ). Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης  $\varphi(\tau_x, \tau_y)$  δίνεται από τη σχέση:



$$\varphi(\tau_x, \tau_y) = \iint I_1(x, y)I_2(x + \tau_x, y + \tau_y)dxdy \quad (4.2.2)$$

Η παραπάνω συνάρτηση παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή σε ένα σημείο του εικονιδίου που απέχει από το κέντρο του απόσταση  $(\delta x, \delta y)$ , η οποία είναι ίση με την μέση μετατόπιση των σωματιδίων. Στο σχ.4.2.4 φαίνεται σχηματικά η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης με την χαρακτηριστική της κορυφή που προέκυψε από δυο εικονίδια, σε κάθε ένα από τα οποία υπάρχουν τέσσερα σωματίδια, ενώ στα δεξιά του σχήματος φαίνεται το αποτέλεσμα της διαδικασίας δηλ. ο υπολογισμός ενός διανύσματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα ζεύγη εικονιδίων της εικόνας  $t=t_1$  και της εικόνας  $t=t_2$  ώστε τελικά υπολογίζονται μερικές χιλιάδες διανύσματα ταχύτητας.



Σχ.4.2.4 Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης

### 4.3 Διαδικασία Μετρήσεων

Σε όλα τα πειράματα φροντίζαμε το βάθος της δεξαμενής με το αλατόνερο να είναι 6 mm και η συγκέντρωση του άλατος 150g άλατος ανά 1l απιονισμένου νερού. Αφού προηγουμένως ρυθμιζόταν η τάση της πηγής πριν τη σύνδεσή της με τα ηλεκτρόδια της δεξαμενής, θέταμε τη πηγή Laser σε λειτουργία, αρχίζαμε την καταγραφή των εικόνων για 1 με 2 sec με το ρευστό ακίνητο και στη συνέχεια γινόταν η σύνδεση με την πηγή με αποτέλεσμα το ρευστό να τίθεται σε κίνηση. Το φως του Laser περνούσε από τη μια διαφανή πλευρά της δεξαμενής (στις δυο πλευρές που ήταν τοποθετημένα τα ηλεκτρόδια αλουμινίου δεν ήταν δυνατή η πρόσβαση του φωτός) η οποία φροντίζαμε να είναι 3 mm πάνω από τον πυθμένα της δεξαμενής και επομένως 3 mm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Συνήθως γινόταν η καταγραφή 50 εικόνων, που αποθηκεύονταν στον υπολογιστή, και αργότερα γινόταν η ανάλυσή τους δηλ. η εξαγωγή των διανυσμάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονταν υπό μορφή αριθμού pixel σε αρχεία με πέντε στήλες  $(x, y, u, v, q)$  όπου  $(x, y)$  και  $(u, v)$

ήταν οι συντεταγμένες της θέσης (δηλ του κέντρου του κάθε εικονίδιου) και οι δυο συνιστώσες της μετατόπισης των σωματιδίων (κατά x και y), αντίστοιχα, οι οποίες μετατρέπονταν σε ταχύτητες, γνωρίζοντας την χρονική απόσταση των εικόνων και την σχέση αριθμός pixel – mm. Στα πειράματά μας η σχέση αυτή ήταν 13.83 pixel/mm. Επίσης, διευκρινίζεται ότι οι διαστάσεις των interrogation windows ήταν 32 x 32 pixel, που αντιστοιχούν σε 2.31 mm x 2.31mm στο πραγματικό πεδίο, και η απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών διανυσμάτων ήταν 1.15 mm. Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ παρουσιάζεται ο κώδικας γραμμένος σε περιβάλλον MATLAB βάσει του οποίου έγινε η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Από κάθε ζεύγος εικόνων (των οποίων η χρονική απόσταση ρυθμίζεται στο διάστημα 1.5ms έως 30ms) υπολογίζεται ένα στιγμιότυπο της ροής αποτελούμενο από 5355 διανύσματα, ενώ η χρονική απόσταση μεταξύ δυο στιγμιοτύπων του πεδίου ροής είναι 0.9 sec.

## 5 Πειραματικά Αποτελέσματα

### 5.1 Τέσσερις μαγνήτες

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται το πεδίο ροής για την περίπτωση που κάτω από τη δεξαμενή είναι τοποθετημένοι τέσσερις μαγνήτες διαστάσεων 25 mm x 12.5 mm x 3 mm ο καθένας, με τη διάσταση των 25 mm να είναι κάθετη στις πλάκες των ηλεκτροδίων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, ο άξονας x είναι παράλληλος προς τις πλάκες των ηλεκτροδίων και η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Για την περίπτωση των τεσσάρων μαγνητών εφαρμόστηκαν μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσεις στο διάστημα 4 V έως 14 V και η ένταση του ρεύματος έπαιρνε τιμές από 0.25A έως 1.2 A.

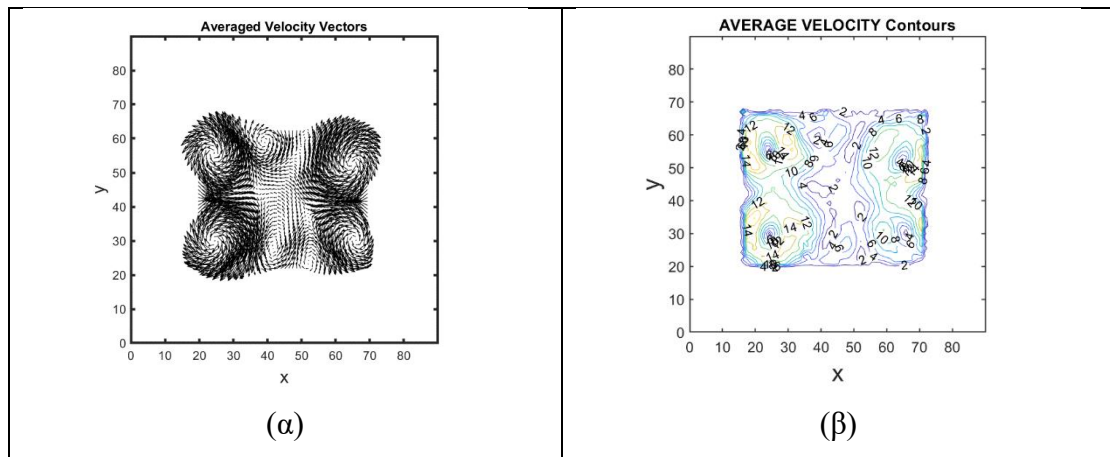
#### 5.1.α Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 4V

Για την τάση των 4 V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη ήταν 0.25 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=16 \Omega$ . Από την τιμή αυτή μπορεί να εκτιμηθεί η αγωγιμότητα  $\sigma$  του αλατόνευρου διότι η ωμική αντίσταση συνδέεται με την ηλεκτρική αγωγιμότητα μέσω της σχέσης:

$$R=L/(\sigma S) \quad (5.1)$$

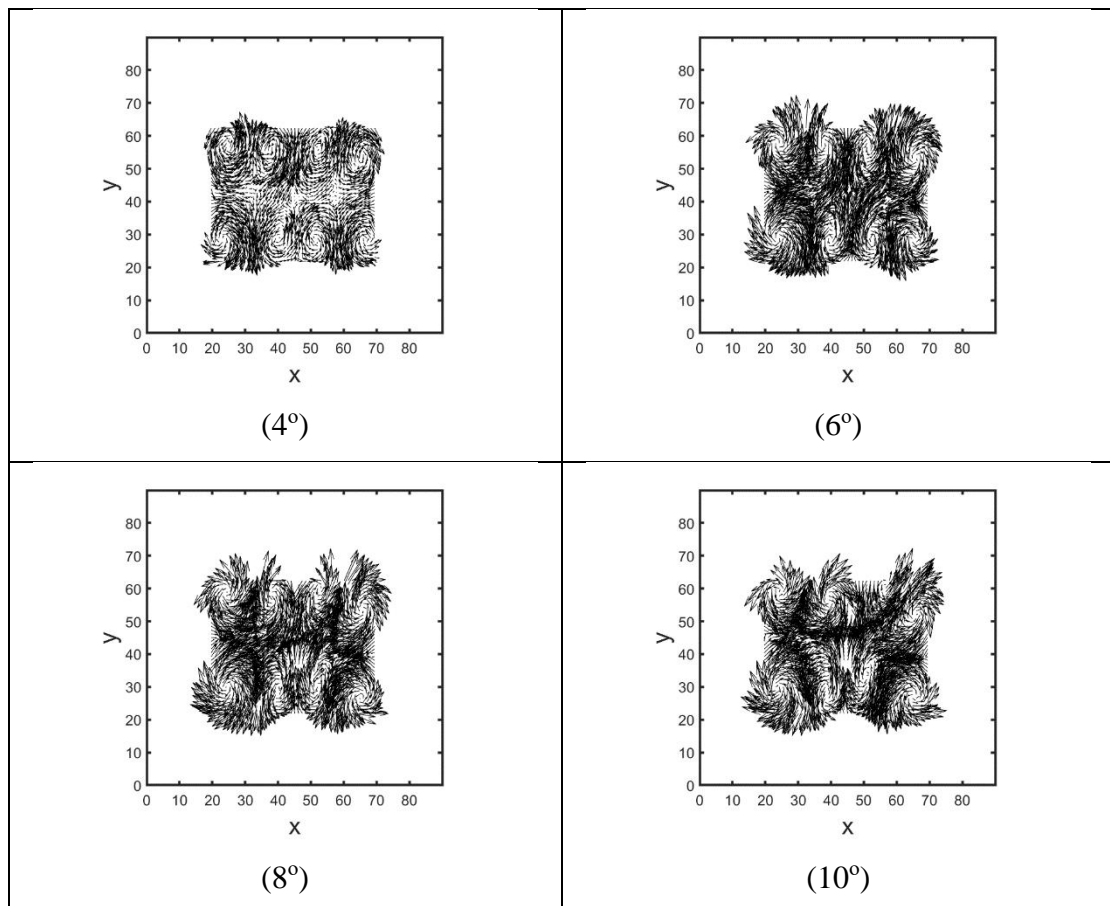
όπου L είναι το μήκος της αντίστασης, που στην περίπτωση αυτή είναι ίσο με την απόσταση των ηλεκτροδίων δηλ.  $L=45 \text{ mm}$ , και S η διατομή της αντίστασης, η οποία είναι ίση με την κατακόρυφη διατομή του ρευστού παράλληλα προς τα ηλεκτρόδια, δηλ.  $S=6 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ . Επομένως,  $\sigma=8.52 \text{ S/m}$ . (Υπενθυμίζεται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα είχε εκτιμηθεί 12 S/m με βάση τη συγκέντρωση του άλατος).

Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση μεταξύ των εικόνων ενός ζεύγους εικόνων επιλέχθηκε να είναι 3 msec. Στο διάγραμμα 5.1.α.1 (α) δείχνεται το μέσο πεδίο ταχυτήτων 50 στιγμιοτύπων της ροής αποτελούμενο από 2 ζεύγη δινών αντίθετης κυκλοφορίας στις δυο απέναντι πλευρές δεξαμενής μεγαλύτερης έντασης και άλλες 3 δίνες μικρότερης έντασης. Από το σχ. 5.1.α.1 (β) που παρουσιάζονται οι ισοϋψείς του μέτρου της ταχύτητας του μέσου πεδίου (σε mm/s), διαπιστώνουμε ότι οι μέγιστες τιμές του είναι της τάξης των 14 mm/s.



Σχ. 5.1.α.1 Μέσο πεδίο ταχυτήτων (4 μαγνήτες/4V)

Πρέπει να τονιστεί ότι με την επιβολή της τάσης, το ρευστό τίθεται σε κίνηση και μετά από περίπου 4 sec σχηματίζονται τέσσερα ζεύγη δινών των οποίων η κυκλοφορία αυξάνει για μερικά δευτερόλεπτα ενώ στη συνέχεια παραμένει λίγο πολύ σταθερή. Στο σχ. 5.1.α.2 δείχνονται τέσσερα στιγμιότυπα (το 4°, 6°, 8° και 10°) με χρονική απόσταση  $0.9 \times 2 = 1.8$  sec το ένα από το άλλο.

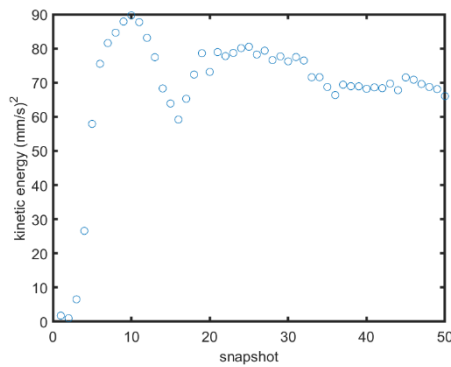


Σχ. 5.1.α.2 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/4V)

Με βάση την κινητική ενέργεια  $E_{κιν}$  του εξεταζόμενου πεδίου ροής:

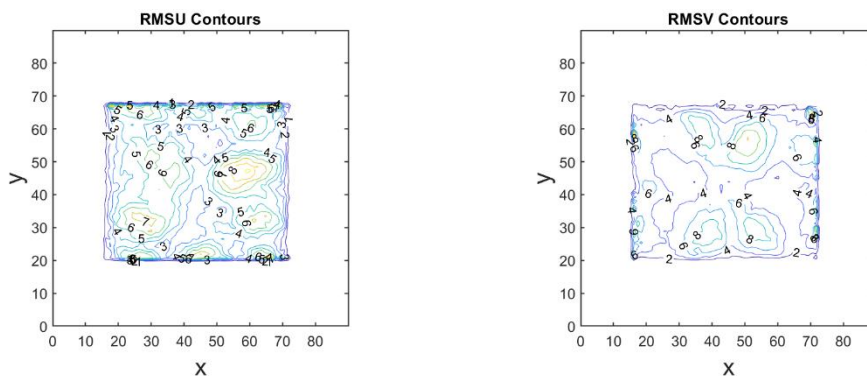
$$E_{\text{κιν}} = \sum_1^v (u^2 + v^2) / 2 \quad (5.2)$$

όπου  $v$ , ο συνολικός αριθμός των σημείων μέτρησης της ταχύτητας του πεδίου, διαπιστώνουμε από το σχ. 5.1.α.3 που παρουσιάζει την  $E_{\text{κιν}}$  συναρτήσε του χρόνου υπό μορφή στιγμιοτύπων (με χρονική απόσταση 0.9 sec μεταξύ διαδοχικών στιγμιοτύπων) ότι οι ταχύτητες του ρευστού μετά την επιβολή της τάσης αυξάνουν με γρήγορο ρυθμό στα πρώτα 10 sec και συνέχεια μεταβάλλονται με μικρότερο ρυθμό έως ότου η μεταβολή τους γίνεται πολύ μικρή μετά από 40 sec.



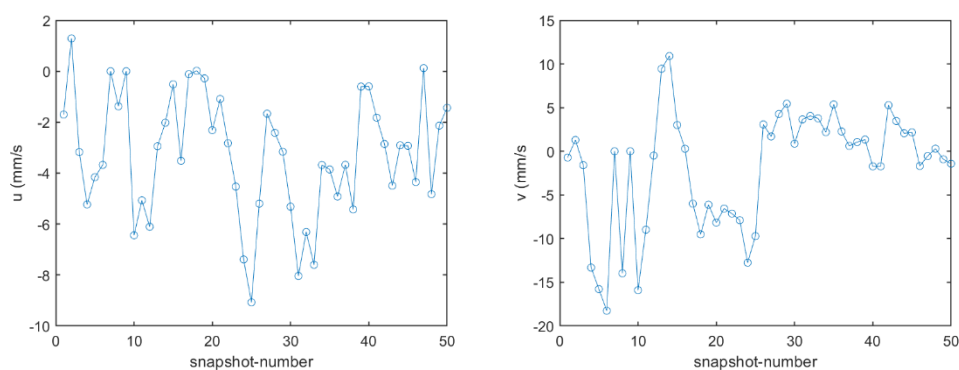
Σχ. 5.1.α.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσε του χρόνου (4 μαγνήτες/4V)

Οι διαταραχές της ταχύτητας αποτυπώνονται επίσης μέσω της τυπικής απόκλισής της. Στο 5.1.α.4 δείχνεται η κατανομή της τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας  $\sqrt{u'^2}$  και  $\sqrt{v'^2}$  με βάση τα 50 στιγμιότυπα του πεδίου, παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή 8 mm/s. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι στις περιοχές κοντά στις πλάκες των ηλεκτροδίων, η κάθετη προς αυτές συνιστώσα της ταχύτητας ( $v$ ) μεταβάλλεται έντονα χρονικώς (τυπικές αποκλίσεις της τάξης των 8 mm/s) ενώ η άλλη συνιστώσα,  $u$ , που είναι εφαπτομενική προς τις πλάκες, αντιθέτως παρουσιάζει διαταραχές με πλάτη που είναι ουσιαστικά 50% μικρότερα ή οι τυπικές αποκλίσεις είναι της τάξης των 4 mm/s.

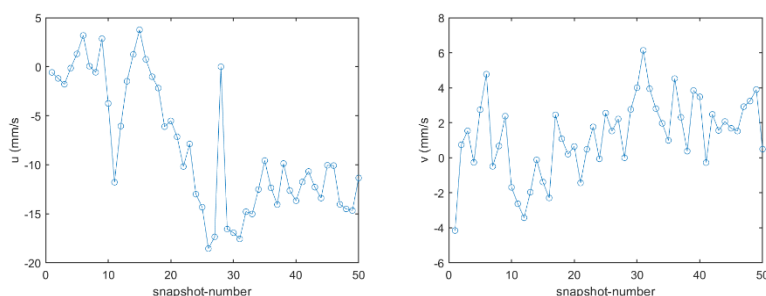


#### Σχ.5.1.α.4 Κατανομή της τυπικής απόκλισης της $u$ και $v$ συνιστώσας της ταχύτητας (4 μαγνήτες/4V)

Τα παραπάνω γίνονται πιο κατανοητά δείχνοντας τη χρονική μεταβολή της ταχύτητας σε ένα σημείο κοντά στο θετικό ηλεκτρόδιο π.χ. σε απόσταση 9.8 mm από αυτό και σε απόσταση 24.15 mm από την πλευρά της δεξαμενής που γίνεται η είσοδος του φωτός του Laser δηλ.  $x=24.15$  (σχ. 5.1.α.5), καθώς και σε μεγαλύτερη απόσταση π.χ. 20.7 mm από το θετικό ηλεκτρόδιο και  $x=36.8$  mm (σχ. 5.1.α.6).



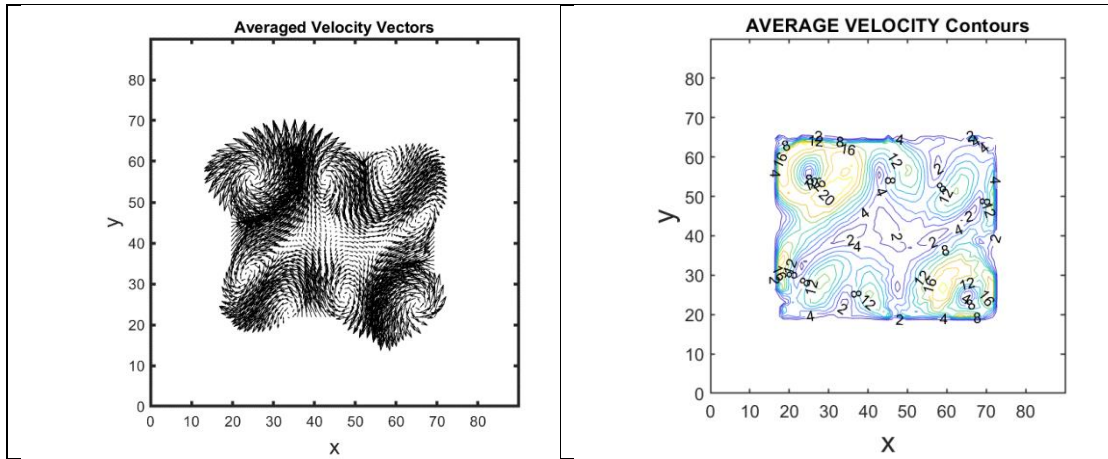
#### Σχ.5.1.α.5 Η ταχύτητα του ρευστού συναρτήσει του χρόνου, 9.2 mm από το θετικό ηλεκτρόδιο και $x=24.15$ mm (4 μαγνήτες/4V)



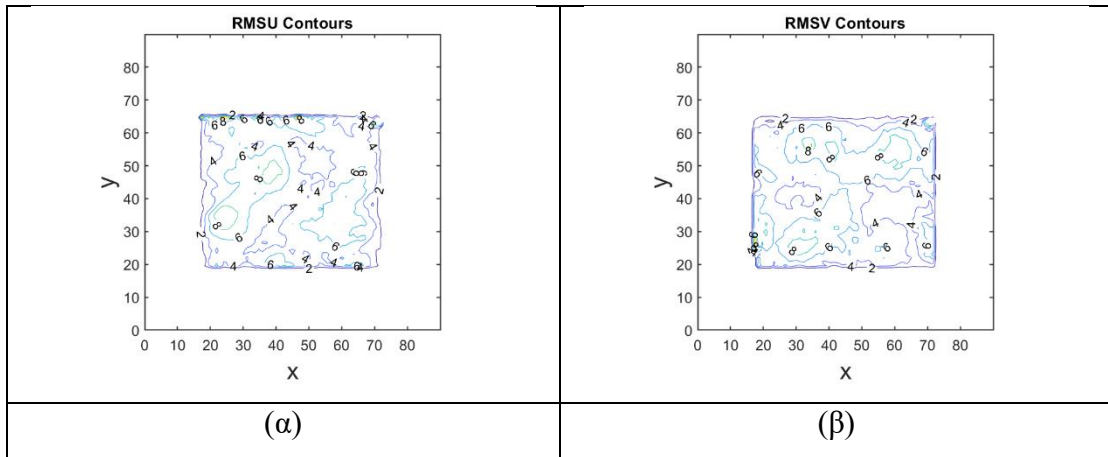
#### Σχ.5.1.α.6 Η ταχύτητα του ρευστού συναρτήσει του χρόνου, 20.7 mm από το θετικό ηλεκτρόδιο και $x=36.8$ mm (4 μαγνήτες/4V)

### 5.1.β Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 5V

Για την τάση των 5V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη αυξήθηκε σε 0.32 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=15.6 \Omega$ . Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση μεταξύ του ζεύγους εικόνων επιλέχθηκε 2.5 msec δηλ. μικρότερη από την προηγούμενη λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων. Η εικόνα του πεδίου είναι γενικώς παρόμοια με την περίπτωση της τάσης των 4 V (σχ. 5.1.β.1) αλλά με μεγαλύτερες ταχύτητες που αυτή τη φορά φθάνουν τα 20 mm/s. Επίσης, η διαφορά από την προηγούμενη περίπτωση των 4V είναι ότι η κάτω αριστερά μεγάλη δίνη έχει μετασχηματιστεί σε δυο μικρότερες δίνες. Αναφορικά με τις διαταραχές της ταχύτητας, αυτές είναι ίδιες με της προηγούμενης (σχ. 5.1.β.2).



Σχ. 5.1.β.1 Μέσο πεδίο ταχυτήτων (4 μαγνήτες/5V)

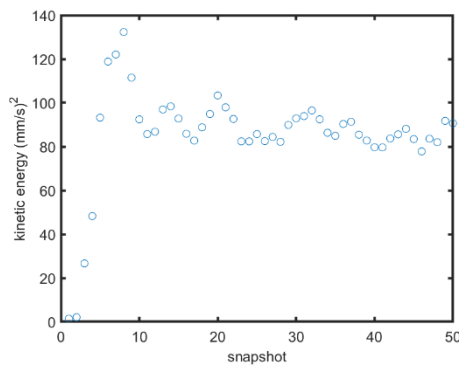


(α)

(β)

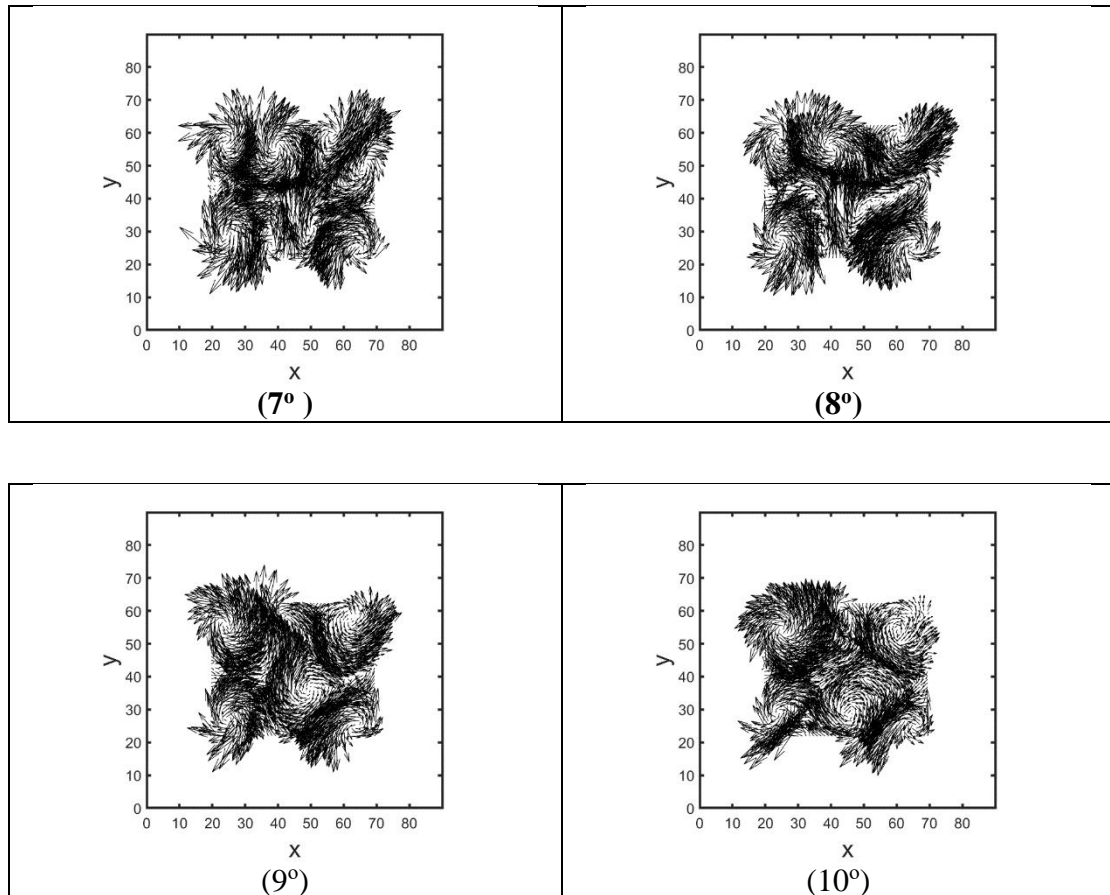
Σχ. 5.1.β.2 Κατανομή της τυπικής απόκλισης της u και v συνιστώσας της ταχύτητας (4 μαγνήτες/5V)

Η κινητική ενέργεια του πεδίου αφού μεγιστοποιηθεί περί το πέμπτο στιγμιότυπο φθάνοντας την τιμή  $135 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ , στη συνέχεια σταθεροποιείται στην τιμή των περίπου  $90 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ. 5.1.β.3).



### Σχ. 5.1.β.3 Μέση κινητική ενέργεια πεδίου συναρτήσει του χρόνου (4 μαγνήτες/5V)

Στο σχ. 5.1.β.4 δείχνονται τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $7^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $9^\circ$  και  $10^\circ$ ) με τις χαρακτηριστικές δίνες των οποίων οι μορφές και οι θέσεις μεταβάλλονται χρονικά. Για παράδειγμα στο  $7^\circ$  στιγμιότυπο, πάνω δεξιά υπάρχουν δυο δίνες ενώ στο επόμενο ( $8^\circ$ ) υπάρχει μια δίνη. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και πάνω αριστερά, όπου ενώ στα στιγμιότυπα  $7^\circ$  και  $8^\circ$  υπάρχουν δυο δίνες στο  $9^\circ$  και  $10^\circ$  εμφανίζεται μια δίνη στην ίδια περιοχή.



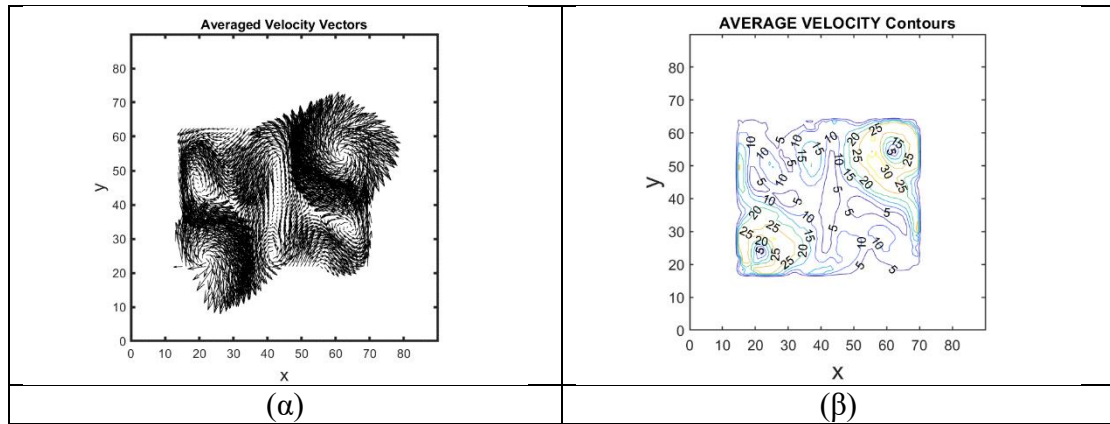
Σχ. 5.1.β.3 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/5V)

### 5.1.γ Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 7V

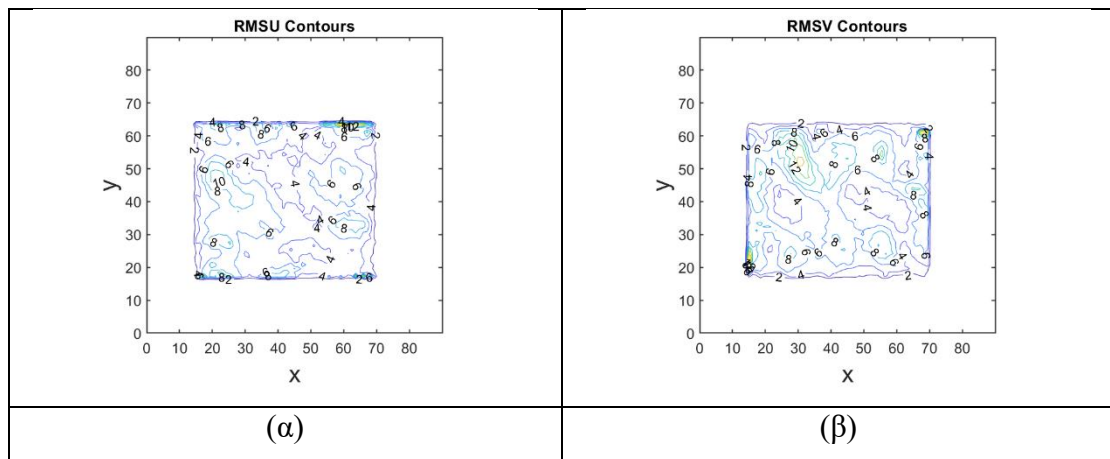
Για την τάση των 7V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη αυξήθηκε σε 0.45 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=15.55 \Omega$ . Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση μεταξύ του ζεύγους εικόνων επιλέχθηκε 2 msec δηλ. μικρότερη από την προηγούμενη λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων. Η εικόνα του πεδίου έχει αλλάξει, παρουσιάζοντας δυο μεγάλες δίνες κατά μια διαγώνιο της δεξαμενής και άλλες τρεις μικρότερες, ενώ οι ταχύτητες φθάνουν τα 30 mm/s (σχ.5.1.γ.1). Οι διαταραχές της ταχύτητας είναι αυξημένες, φθάνοντας η τυπική



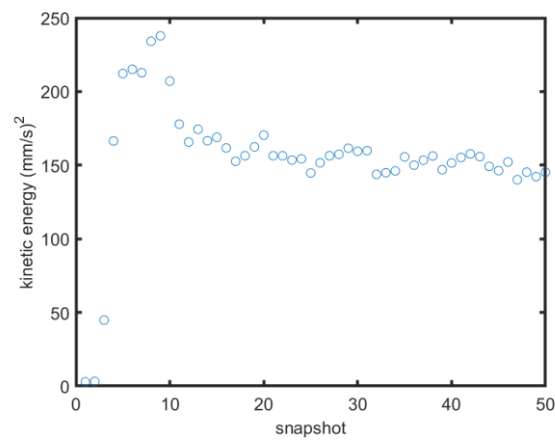
απόκλιση της  $v$  συνιστώσας της ταχύτητας τα  $12 \text{ mm/s}$  (σχ. 5.1.γ.2). Η μέγιστη κινητική ενέργεια του πεδίου που εμφανίζεται στο ένατο στιγμιότυπο ( $250 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ ), παίρνει διπλάσια τιμή από την περίπτωση της τάσης των  $5 \text{ V}$ , και μετά το εικοστό στιγμιότυπο πρακτικώς παραμένει σταθερή σε μια τιμή περί τα  $150 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.1.γ.3).



Σχ. 5.1.γ.1 Μέσο πεδίο ταχυτήτων (4 μαγνήτες/7V)

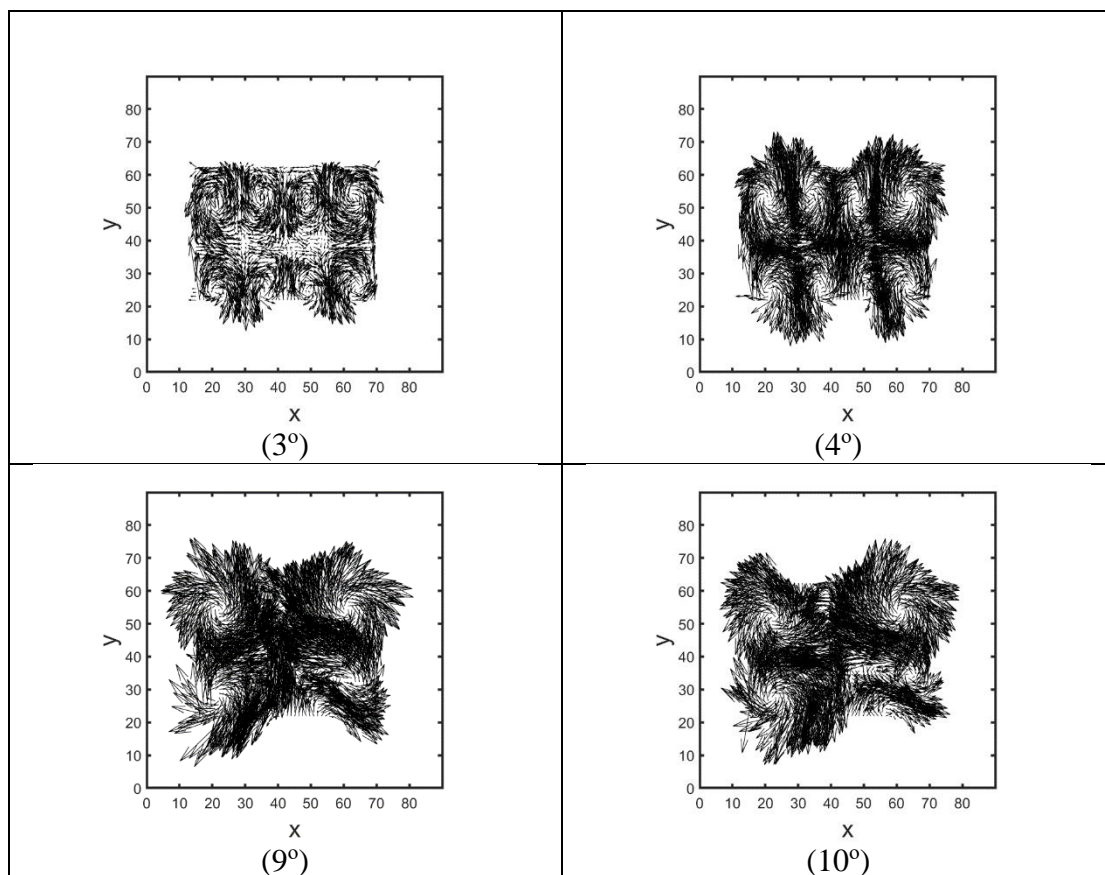


Σχ. 5.1.γ.2 Τοπική απόκλιση της (u) και (v) συνιστώσας της ταχύτητας (4 μαγνήτες/7V)



Σχ. 5.1.γ.3 Μέση κινητική ενέργεια πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (4 μαγνήτες/7V)

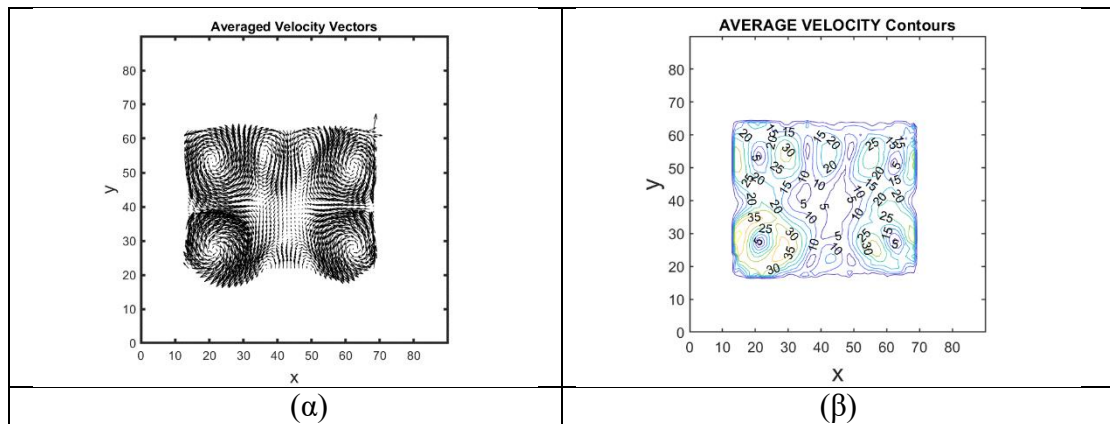
Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ κατά την έναρξη της ροής δημιουργούνται 4 ζεύγη δινών αντίθετης φοράς κυκλοφορίας, αργότερα επικρατούν 4 δίνες με κέντρα στα τέσσερα άκρα της δεξαμενής (σχ. 5.1.γ.4).



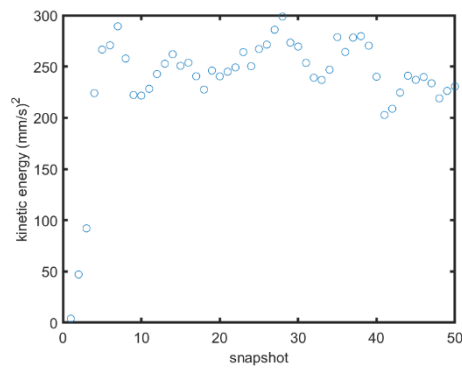
Σχ. 5.1.γ.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/7V)

### 5.1.δ Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 9V

Για την τάση των 9V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη αυξήθηκε σε 0.64 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=14.06 \Omega$ . Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση μεταξύ του ζεύγους εικόνων επιλέχθηκε 2 msec. Στο μέσο χρονικά πεδίο ροής υπάρχουν τέσσερις μεγάλες δίνες στις τέσσερις άκρες της δεξαμενής και δύο μικρότερες, και οι ταχύτητες του ρευστού φθάνουν τα 38 mm/s (σχ. 5.1.δ.1). Η μέγιστη κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει στα  $300 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  και αυξομειώνεται μεταξύ 200 και  $300 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  χωρίς να φαίνεται να τείνει σε μια σταθερή τιμή τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα των 50 στιγμιοτύπων δηλ. για τα πρώτα περίπου 50 sec μετά την έναρξη της ροής. Σε σχέση με την περίπτωση των 5 V, η κινητική ενέργεια παίρνει διπλάσιες τιμές (σχ.5.1.δ.2).

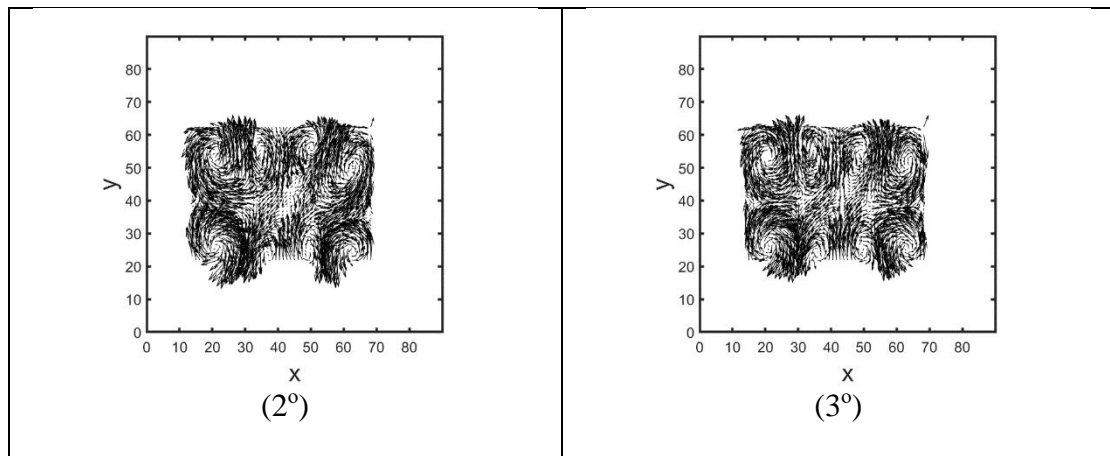


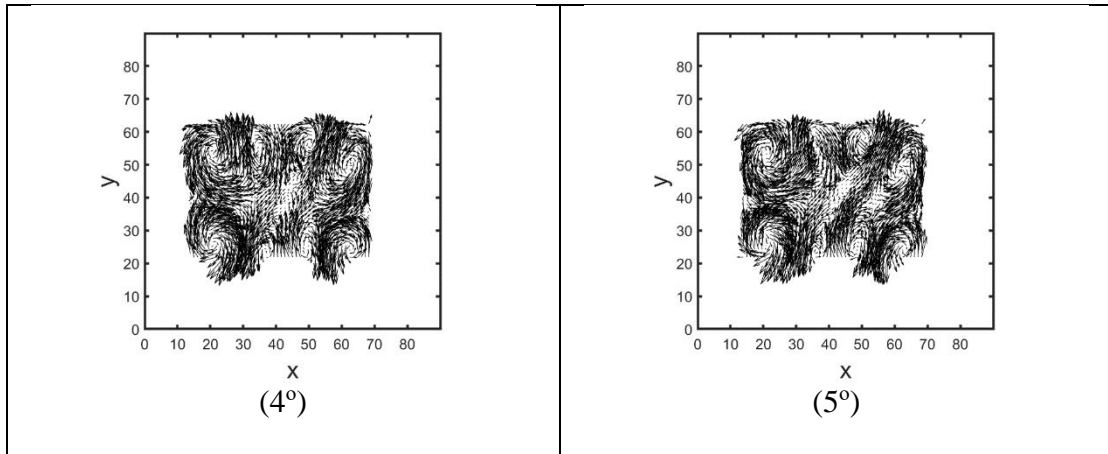
Σχ. 5.1.δ.1 Χρονικά μέσο πεδίο ροής (4 μαγνήτες/9V)



Σχ. 5.1.δ.2 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (4 μαγνήτες/9V)

Και εδώ παρατηρείται το φαινόμενο της τάσης μείωσης του αριθμού των δινών καθώς περνά ο χρόνος (σχ. 5.1.δ.3).

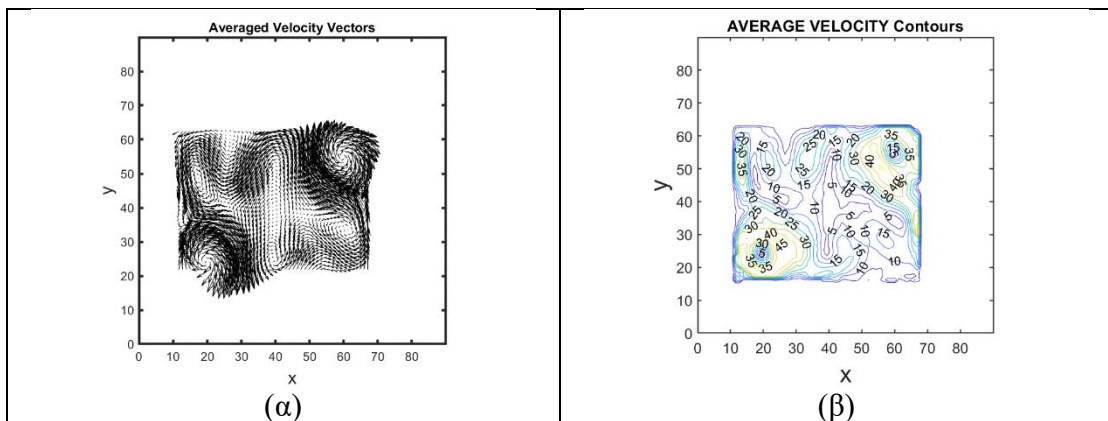




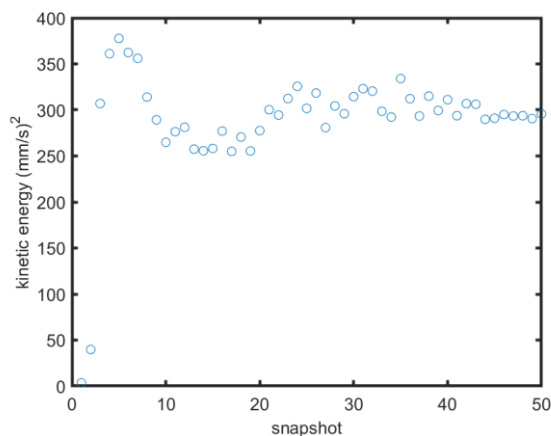
Σχ. 5.1.δ.3 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/9V)

### 5.1.ε Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 12V

Για την τάση των 12V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη αυξήθηκε σε 0.9 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=13.33 \Omega$ . Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση για κάθε ζεύγος εικόνων επιλέχθηκε 1.5 msec. Στο μέσο χρονικά πεδίο ροής υπάρχουν δυο μεγάλες δίνες στα δυο διαγώνια άκρα της δεξαμενής ίδιας φοράς κυκλοφορίας και οι ταχύτητες του ρευστού φθάνουν τα 44 mm/s (σχ. 5.1.ε.1). Η μέγιστη κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει στα  $380 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  και μετά από 30 περίπου στιγμιότυπα τείνει να σταθεροποιηθεί στα  $300 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ . Σε σχέση με την περίπτωση των 5 V, η κινητική ενέργεια παίρνει διπλάσιες τιμές (σχ.5.1.δ.2).

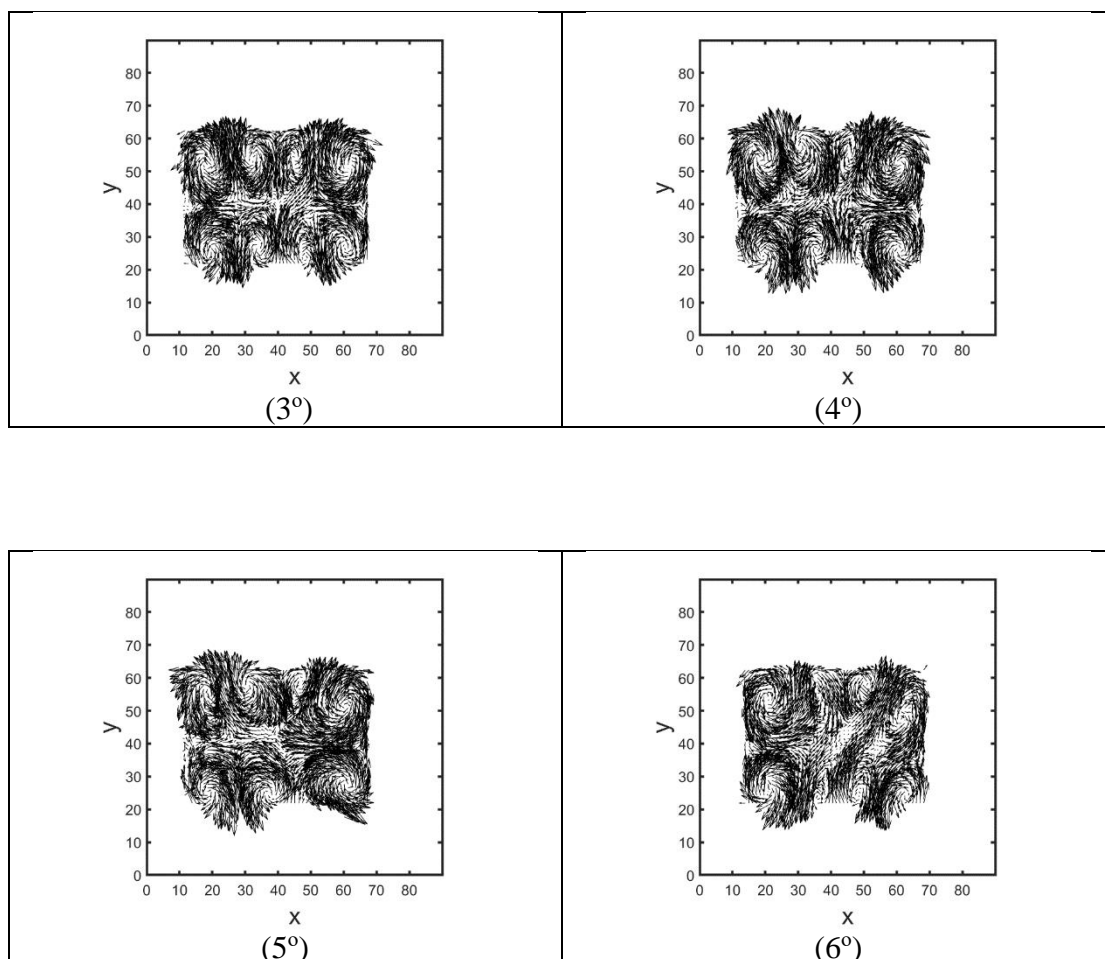


Σχ. 5.1.ε.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (4 μαγνήτες/12V)



Σχ. 5.1.ε.2 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (4 μαγνήτες/12V)

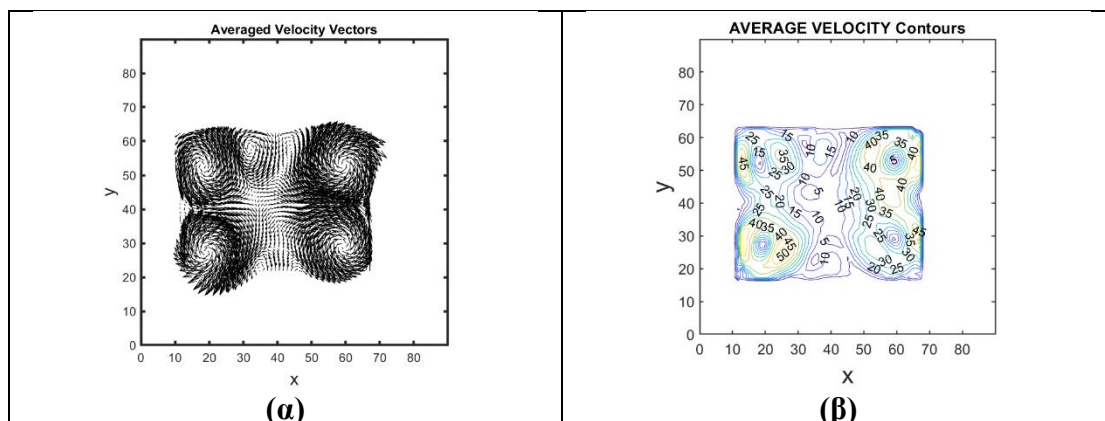
Από το σχ.5.1.ε.3 παρατηρούμε ότι υπάρχει μια τάση προοδευτικής μείωσης του αριθμού των δινών με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα στο 3<sup>ο</sup> στιγμιότυπο υπάρχουν 8 δίνες και στο 6<sup>ο</sup> στιγμιότυπο έχουν μειωθεί στις 6 δίνες.



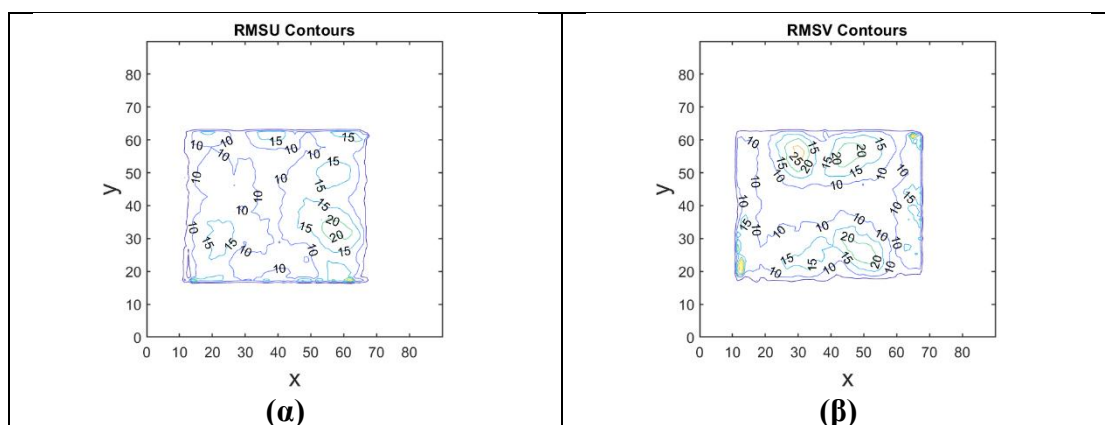
Σχ. 5.1.ε.3 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/12V)

### 5.1.στ Διάταξη τεσσάρων μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 14V

Για την τάση των 14V, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του ηλεκτρολύτη αυξήθηκε σε 1.2 A που σημαίνει ότι η ωμική αντίσταση ήταν  $R=V/I=11.60 \Omega$ . Για την περίπτωση αυτή, η χρονική απόσταση μεταξύ του ζεύγους εικόνων επιλέχθηκε 1.5 ms. Στο μέσο χρονικά πεδίο ροής υπάρχουν τέσσερις μεγάλες δίνες στις τέσσερις άκρες της δεξαμενής και άλλες δυο μικρότερες, με τις ταχύτητες του ρευστού να φθάνουν τα 50 mm/s (σχ. 5.1.στ.1) και η τυπική απόκλιση της  $v$  συνιστώσας να παίρνει τιμές μέχρι 25 mm/s (σχ. 5.1.στ.2).

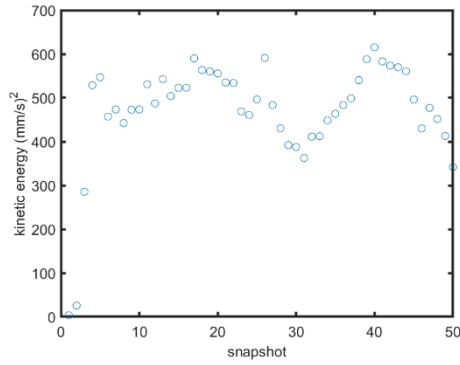


Σχ. 5.1.στ.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (4 μαγνήτες/14V)



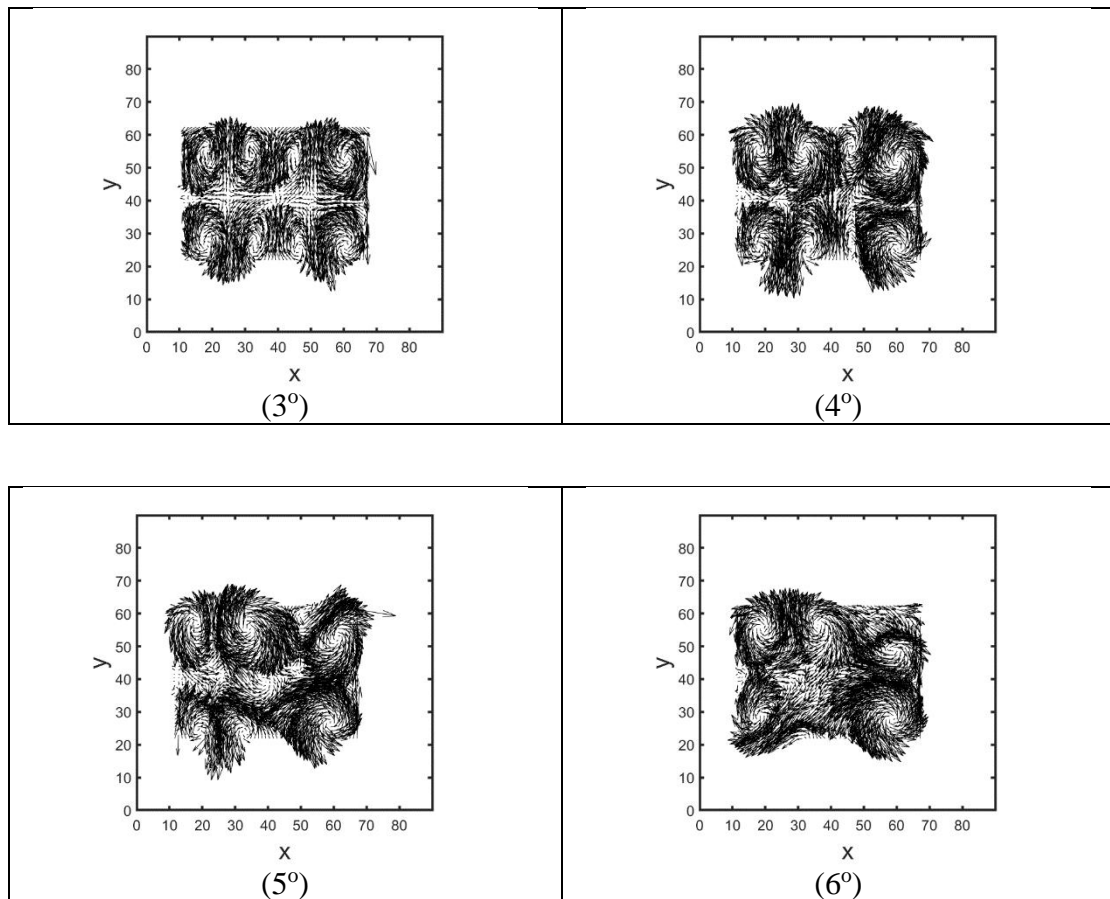
Σχ. 5.1.στ.2 Κατανομή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας (4 μαγνήτες/14V)

Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής αυξομειώνεται με μια περίοδο της τάξης των 20 περίπου στιγμιότυπων που αντιστοιχεί σε χρόνο 38 sec και οι τιμές της μεταβάλλονται στο διάστημα 400 με 600  $\text{mm}^2/\text{s}^2$  (σχ. 5.1.στ.3).



Σχ. 5.1.στ.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (4 μαγνήτες/14V)

Ο αριθμός των δινών μειώνεται από 8 σε 4 μεγάλες και δυο μικρές (σχ.5.1.στ. 4). Είναι ενδιαφέρον πως από το 5<sup>ο</sup> στιγμιότυπο οι δυο δίνες κάτω αριστερά μετατρέπονται σε μια δίνη στο επόμενο (6<sup>ο</sup>) στιγμιότυπο.



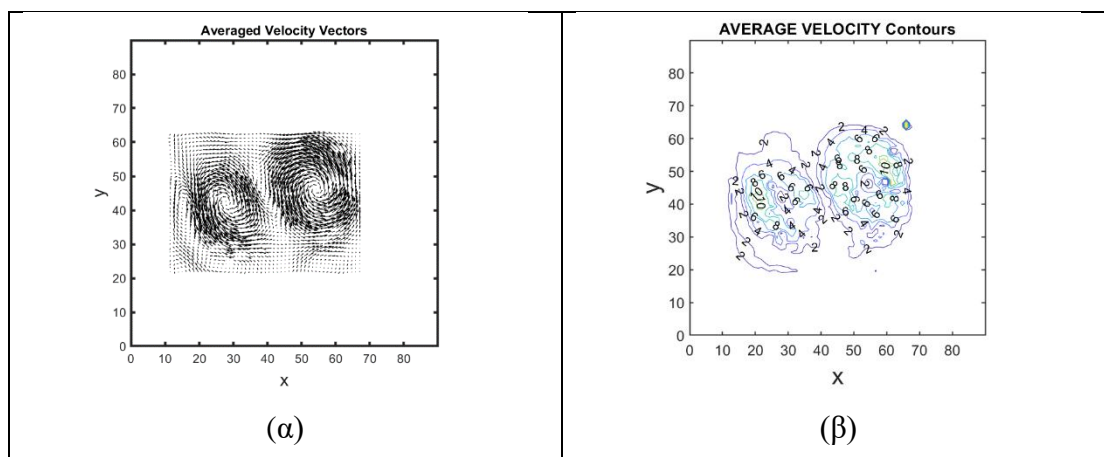
Σχ. 5.1.στ.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (4 μαγνήτες/14V)

## 5.2 Διάταξη 10 μαγνητών

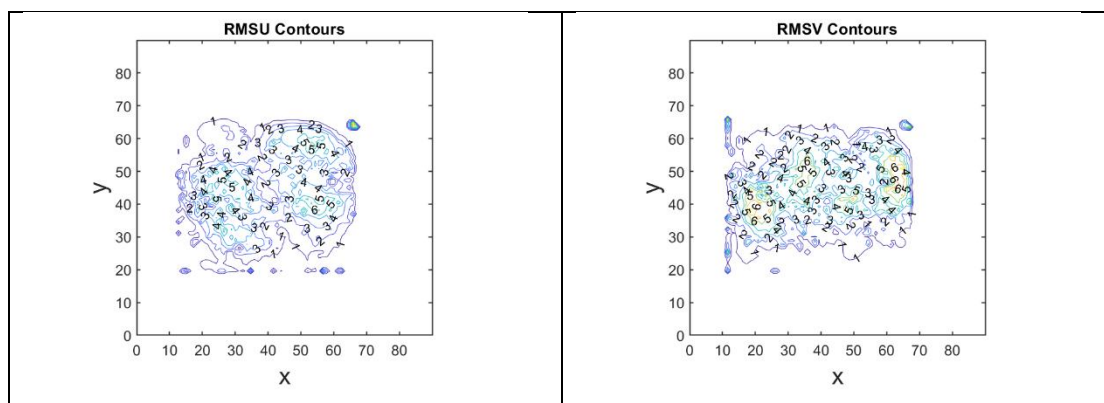
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται το πεδίο ροής για την περίπτωση που κάτω από τη δεξαμενή είναι τοποθετημένοι δέκα μαγνήτες διαστάσεων 25 mm x 12.5 mm x 3 mm ο καθένας, με τη διάσταση των 25 mm να είναι κάθετη στις πλάκες των ηλεκτροδίων. Στα διαγράμματα που ακολουθούν ο άξονας x είναι παράλληλος προς τις πλάκες των ηλεκτροδίων και η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Για την περίπτωση των δέκα μαγνητών εφαρμόστηκαν μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσεις στο διάστημα 2V έως 9 V.

### 5.2.a Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση 2V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία περίπου  $10^\circ$  ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.a.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας είναι 10 mm/s (σχ.5.2.a.1) και η τυπική απόκλιση φθάνει τα 6 mm/s (σχ.5.2.a.2).



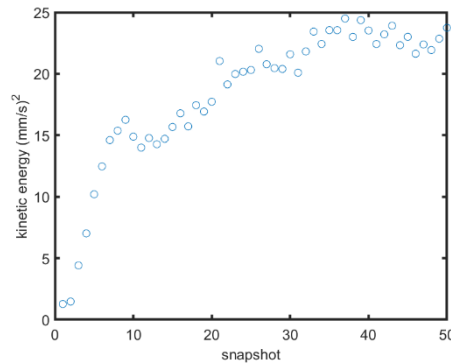
Σχ. 5.2.a.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/2V)





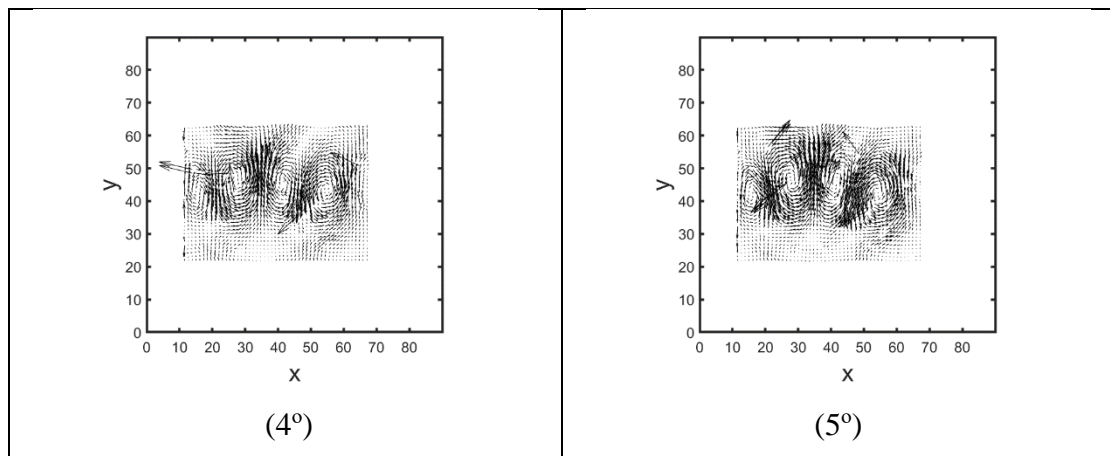
Σχ. 5.2.α.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/2V)

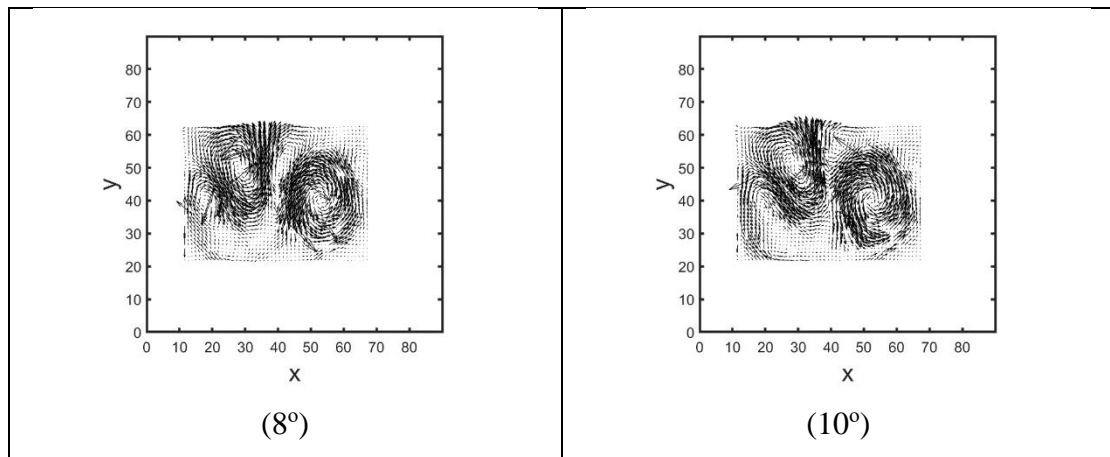
Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής αυξάνει με γρήγορο ρυθμό κατά τη διάρκεια των 10 πρώτων στιγμιότυπων και συνεχίζει με μικρότερο ρυθμό έως το 38<sup>ο</sup> στιγμιότυπο που μεγιστοποιείται στην τιμή των 25 mm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> (σχ.5.2.α.3).



Σχ. 5.2.α.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου(10 μαγνήτες/2V)

Αναφορικά με την εξέλιξη του πεδίου, αρχικώς αυτό αποτελείται από 4 δίνες (με αντίθετες φορές κυκλοφορίας ανά δυο γειτονικές δίνες) με τα κέντρα τους σε μια ευθεία παράλληλη προς την επιφάνεια των ηλεκτροδίων, ενώ αργότερα οι 4 δίνες γίνονται 3 δίνες και τελικά δυο (σχ.5.2.α.4).

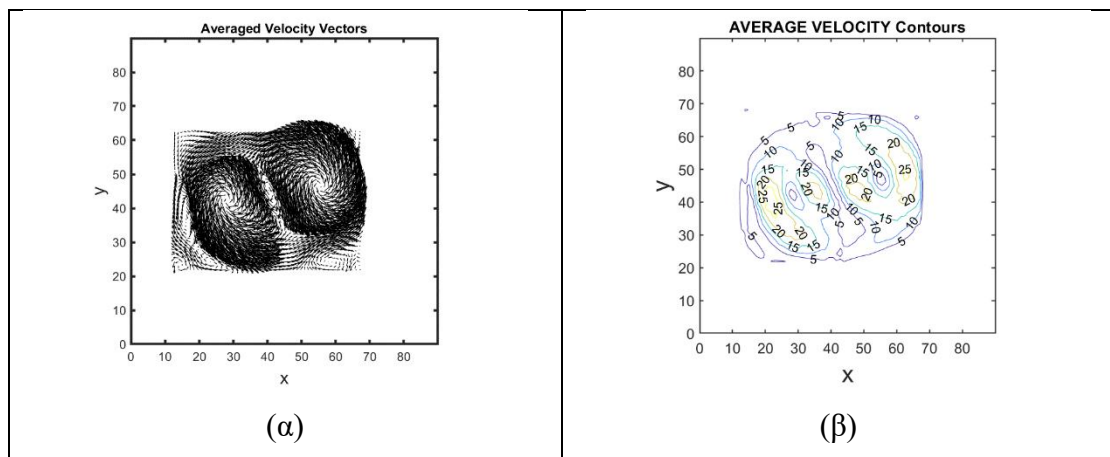




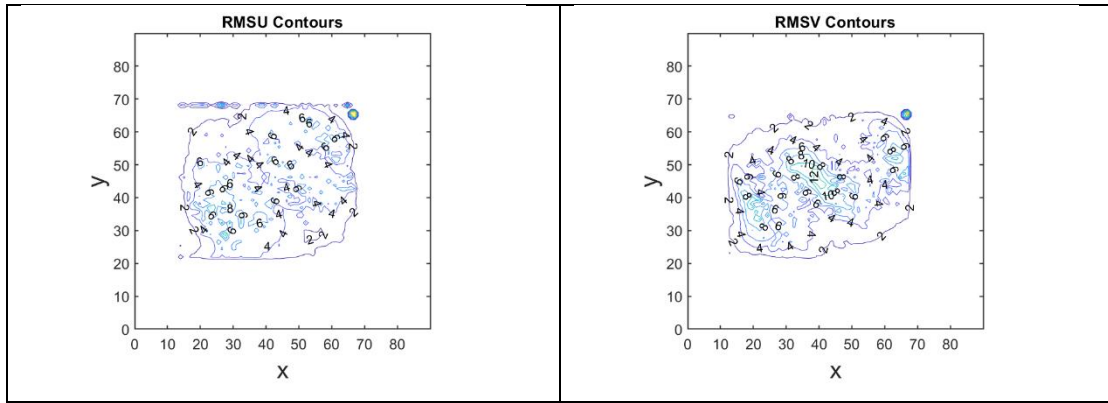
Σχ.5.2.α.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (10 μαγνήτες/2V)

### 5.2.β Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση 3V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται και πάλι από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.β.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας έχει αυξηθεί στα 25 mm/s (σχ.5.2.β.1) και η τυπική απόκλιση φθάνει τα 12mm/s (σχ.5.2.β.2), παρουσιάζοντας μεγαλύτερες τιμές η  $v$  συνιστώσα της ταχύτητας.

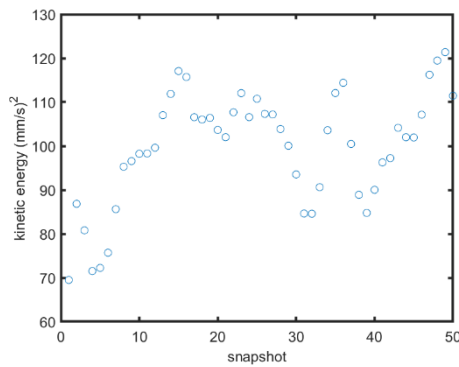


Σχ. 5.2.β.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/3V)



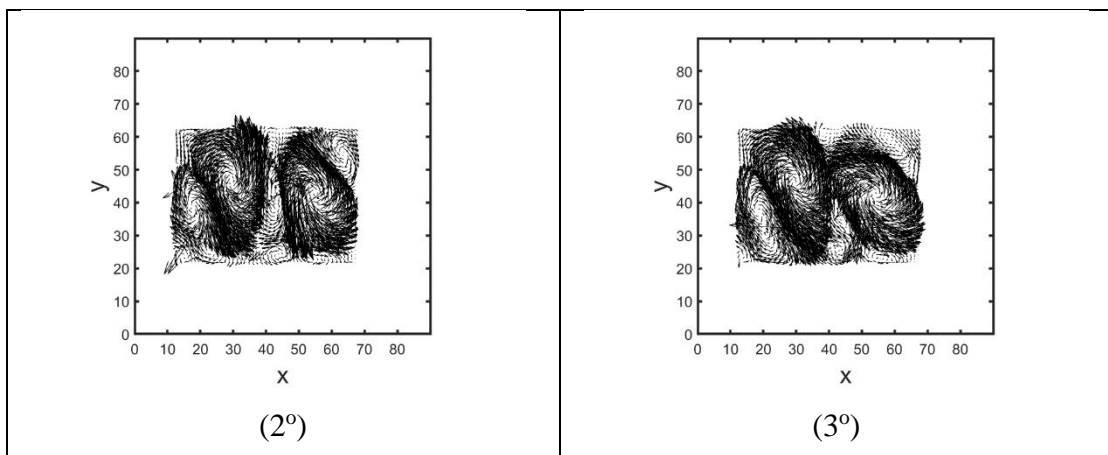
Σχ. 5.2.β.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/3V)

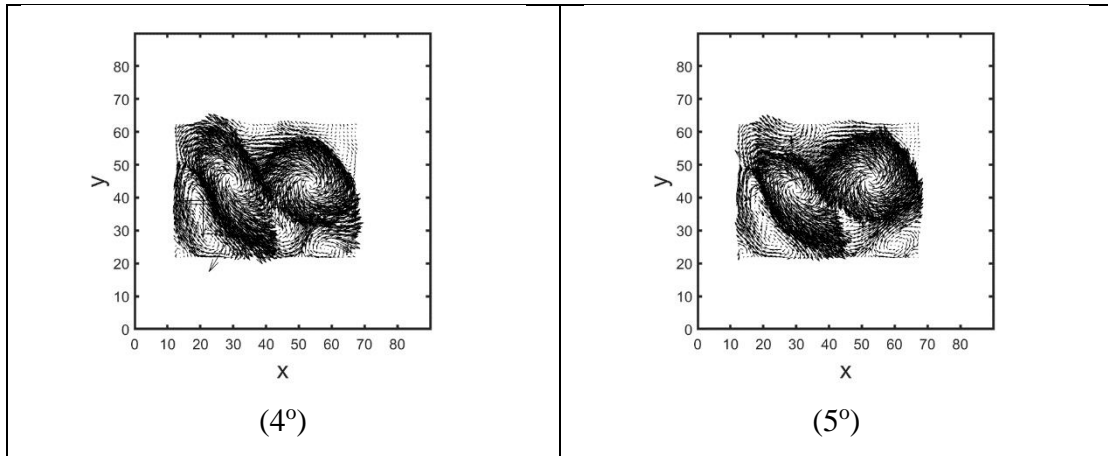
Η κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει τα  $120 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  παρουσιάζοντας μεγάλες διακυμάνσεις, κυμαινόμενη μεταξύ  $80 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  και  $120 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ .



Σχ. 5.2.β.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου (10 μαγνήτες/3V)

Η χρονική εξέλιξη του πεδίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά δηλ. μειώνεται ο αριθμός των δινών και αυξάνει η έντασή τους (σχ. 5.2.β.4).

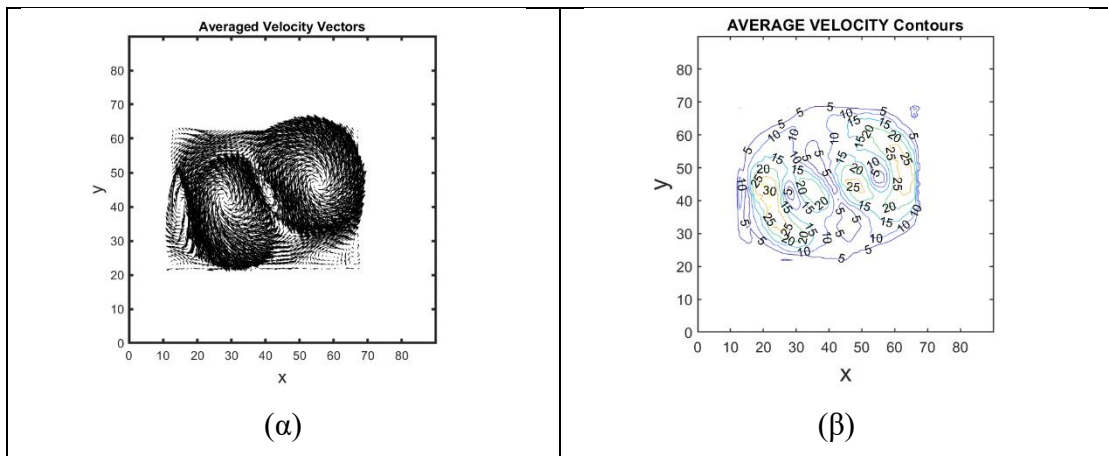




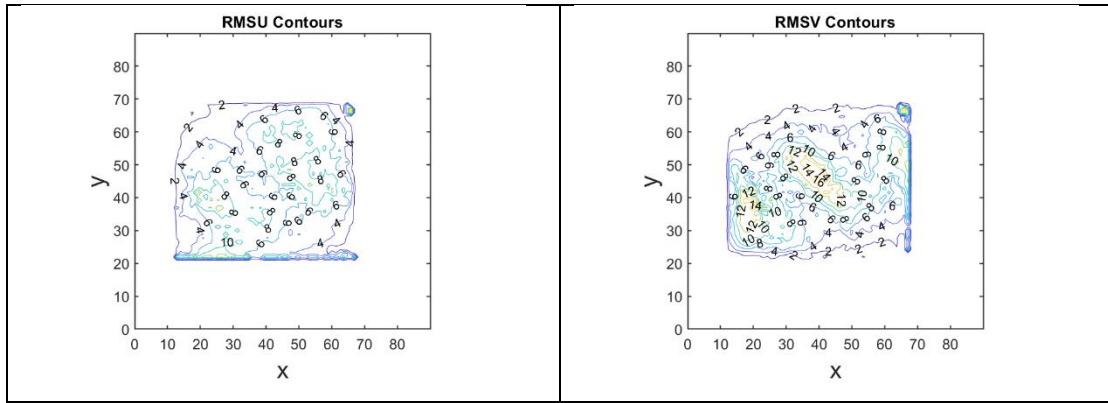
Σχ. 5.2.β.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$ ). (10 μαγνήτες/3V)

### 5.2.γ Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση 4V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται και πάλι από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.γ.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας έχει αυξηθεί στα 30 mm/s (σχ.5.2.γ.1) και η τυπική απόκλιση φθάνει τα 16 mm/s (σχ.5.2.γ.2), παρουσιάζοντας σχεδόν διπλάσιες τιμές η  $v$  συνιστώσα της ταχύτητας σε σχέση με την  $u$ .

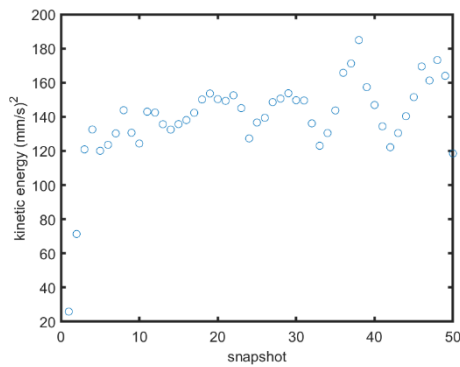


Σχ. 5.2.γ.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/4V)



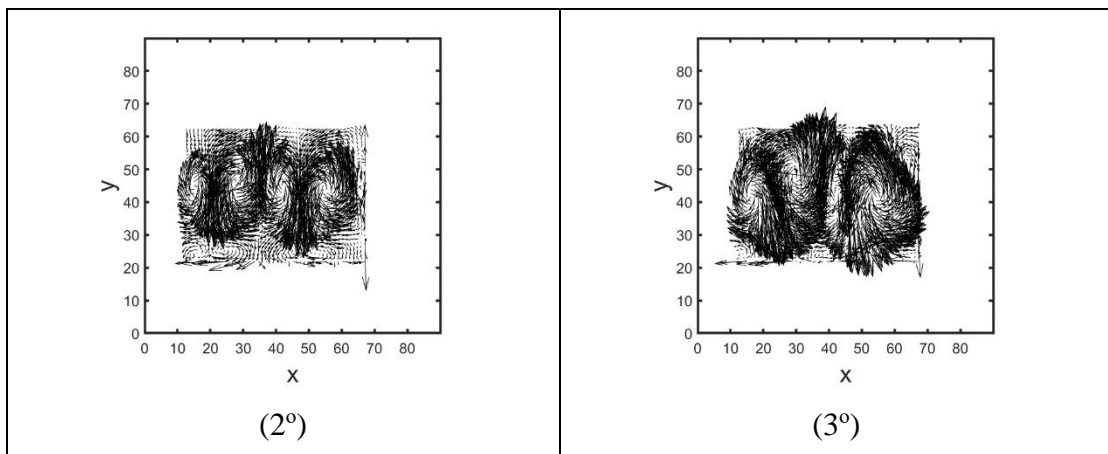
Σχ. 5.2.γ.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/4V)

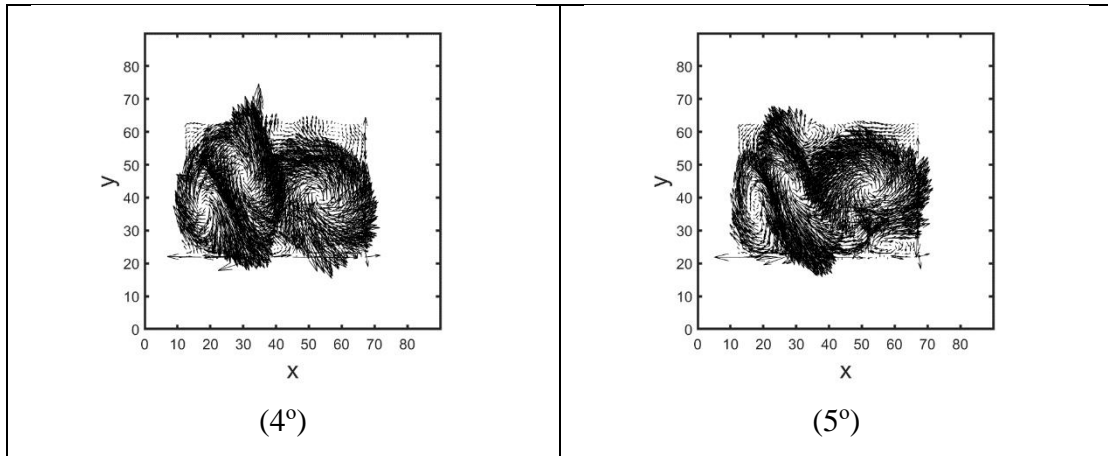
Η κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει τα  $180 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  παρουσιάζοντας διακυμάνσεις, στο διάστημα  $120 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  με  $180 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.2.γ.3).



Σχ. 5.2.γ.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου (10 μαγνήτες/4V)

Η χρονική εξέλιξη του πεδίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά δηλ. μειώνεται ο αριθμός των δινών και αυξάνει η έντασή τους (σχ. 5.2.γ.4).

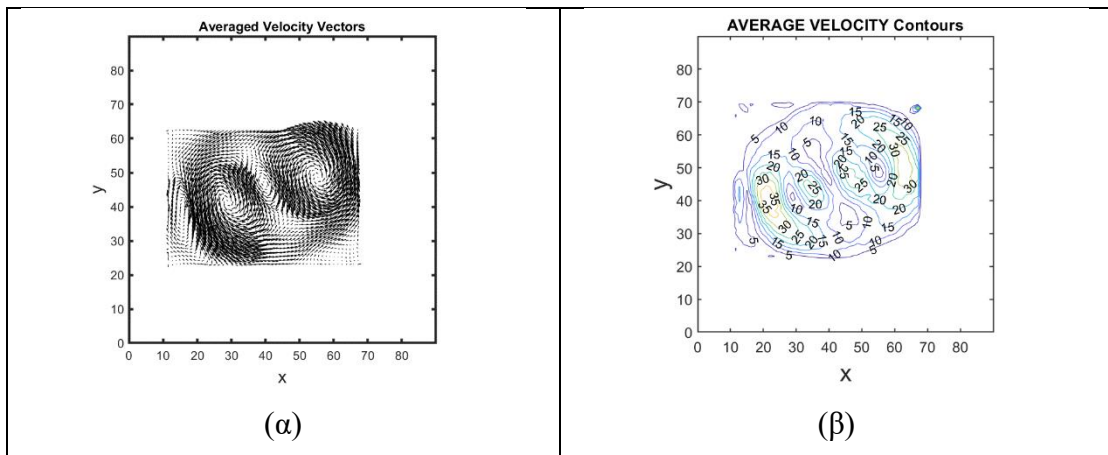




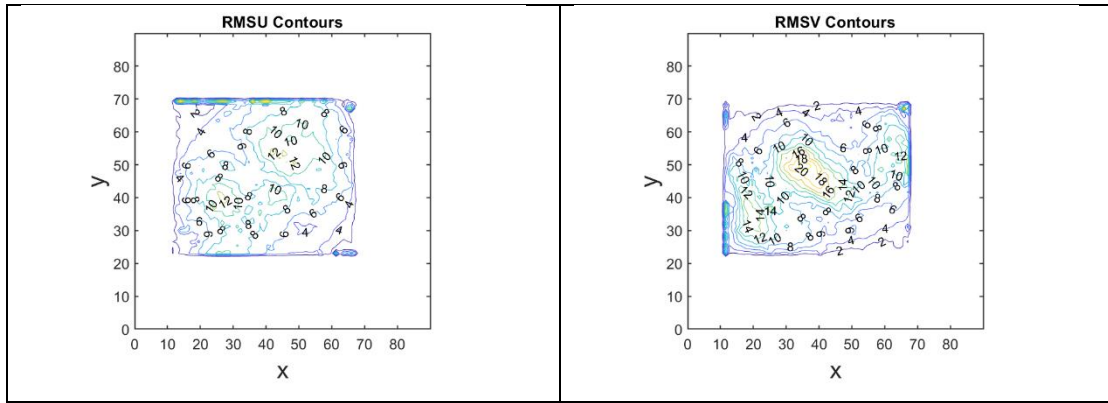
Σχ.5.2.γ.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$ ). (10 μαγνήτες/4V)

### 5.2.δ Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 5V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται και πάλι από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.δ.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας έχει αυξηθεί στα 35 mm/s (σχ.5.2.δ.1) και η τυπική απόκλιση φθάνει τα 20 mm/s (σχ.5.2.δ.2) για την συνιστώσα  $v$ , ενώ η τυπική απόκλιση της  $u$  συνιστώσας φθάνει στα 12 mm/s.

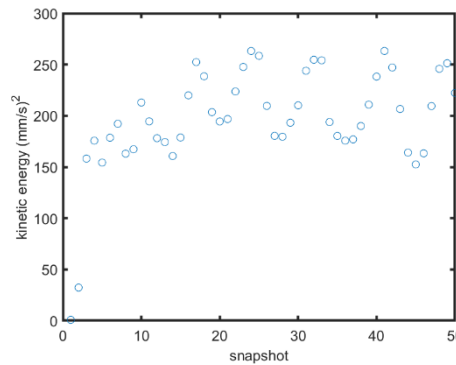


Σχ. 5.2.δ.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/5V)



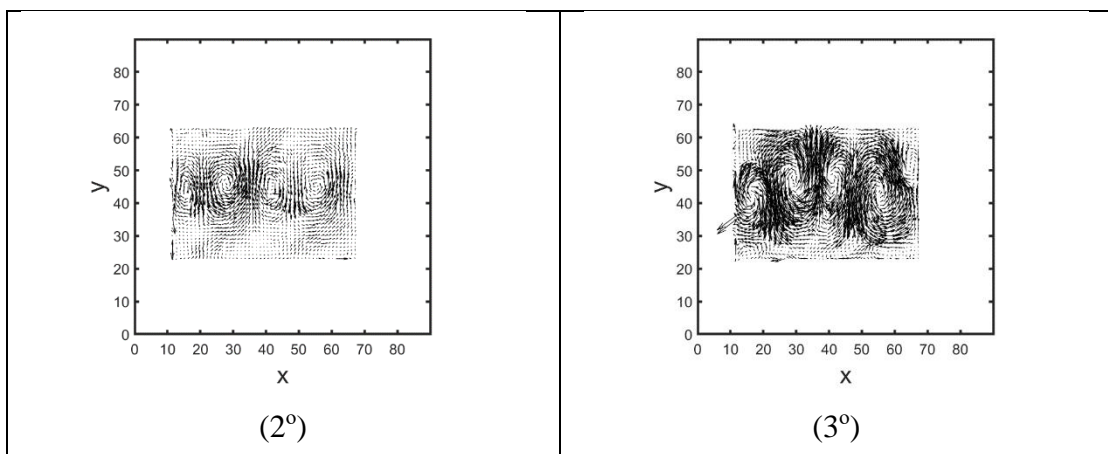
Σχ. 5.2.δ.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/5V)

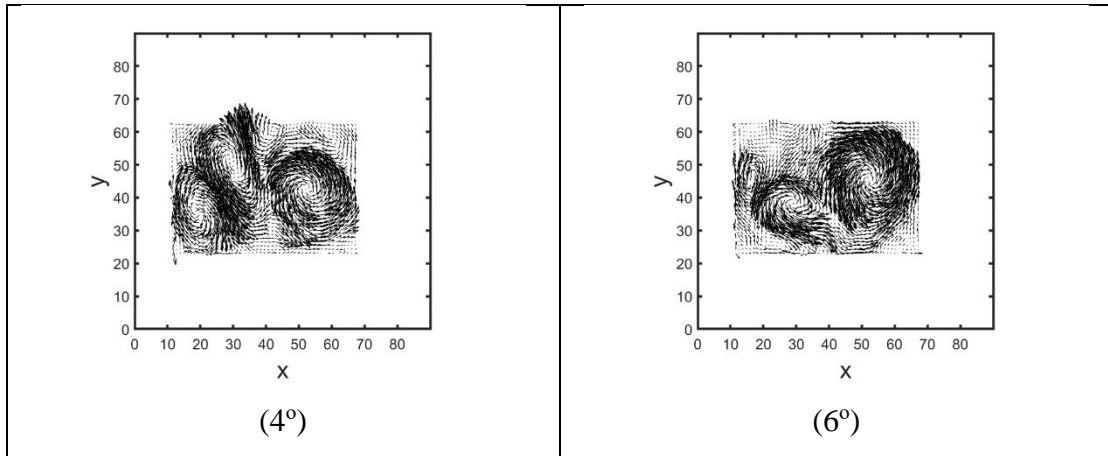
Η κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει τα  $260 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  παρουσιάζοντας διακυμάνσεις, στο διάστημα  $160 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  με  $260 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.2.δ.3).



Σχ. 5.2.δ.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου (10 μαγνήτες/5V)

Η χρονική εξέλιξη του πεδίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά δηλ. μειώνεται ο αριθμός των δινών και αυξάνει η έντασή τους (σχ. 5.2.δ.4).

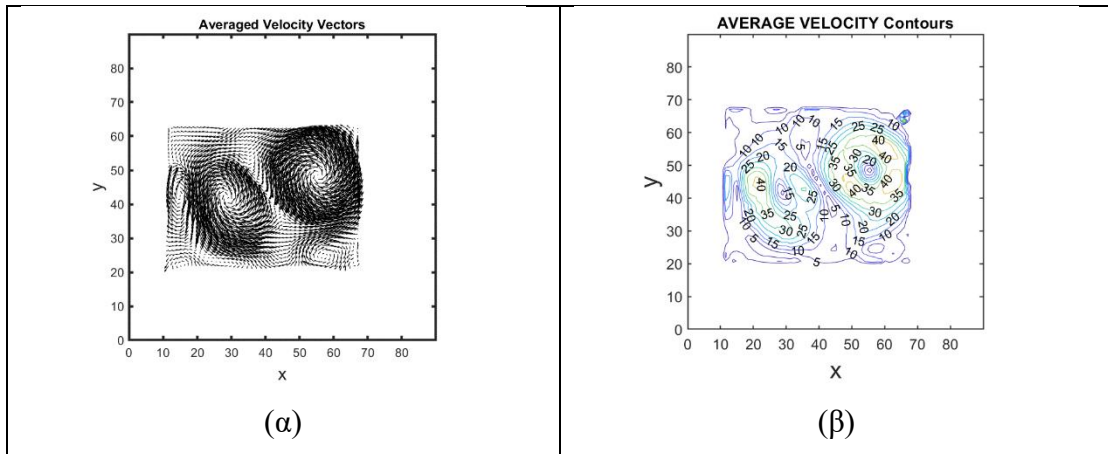




Σχ.5.2.δ.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ). (10 μαγνήτες/5V)

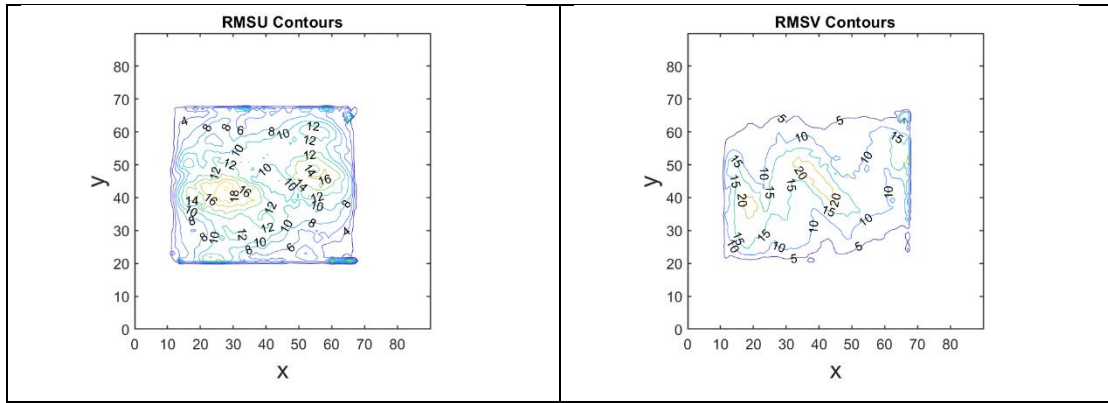
### 5.2.ε Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 7V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται και πάλι από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.ε.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας έχει αυξηθεί στα 40 mm/s (σχ.5.2.ε.1) και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας είναι στα ίδια επίπεδα όπως και για την τάση των 5V δηλ. φθάνει στα 20 mm/s (σχ.5.2.ε.2) για την συνιστώσα v, αλλά εδώ έχει αυξηθεί και η τυπική απόκλιση της u συνιστώσας που φθάνει στα 18 mm/s.



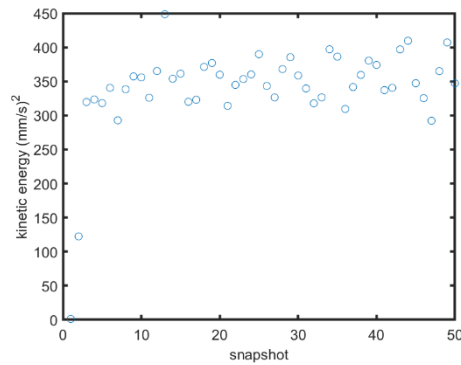
Σχ. 5.2.ε.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/7V)





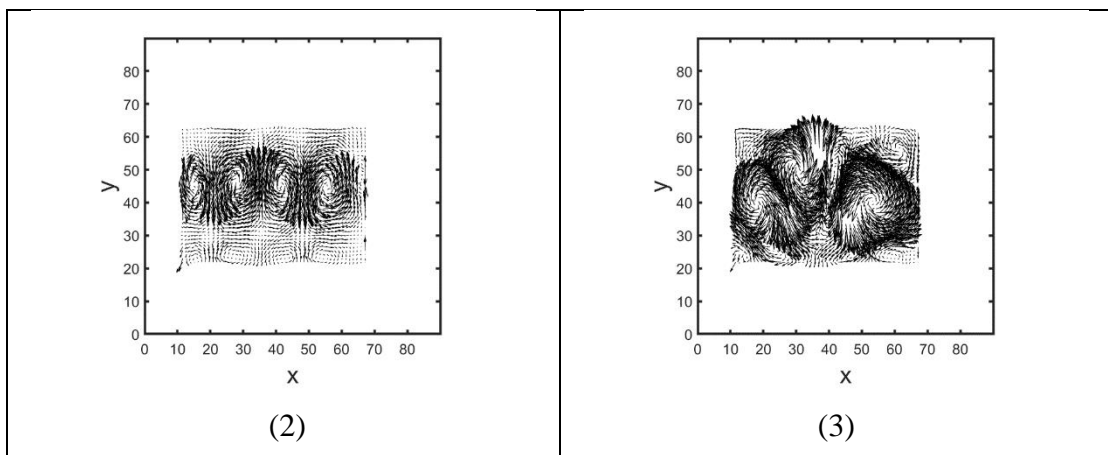
Σχ. 5.2.ε.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/7V)

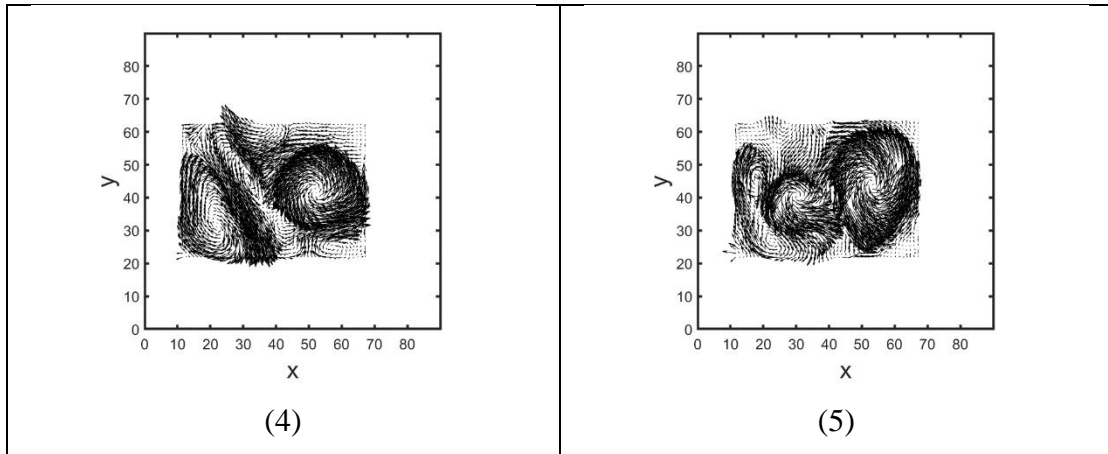
Η κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει τα  $410 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  παρουσιάζοντας διακυμάνσεις, στο διάστημα  $300 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  με  $410 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.2.ε.3).



Σχ. 5.2.ε.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου (10 μαγνήτες/7V)

Η χρονική εξέλιξη του πεδίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά δηλ. μειώνεται ο αριθμός των δινών και αυξάνει η έντασή τους (σχ. 5.2.ε.4).

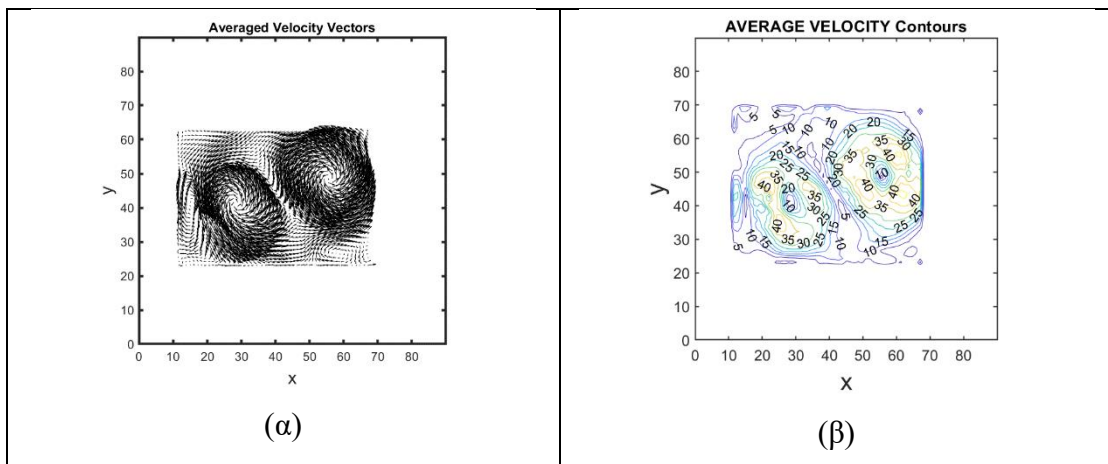




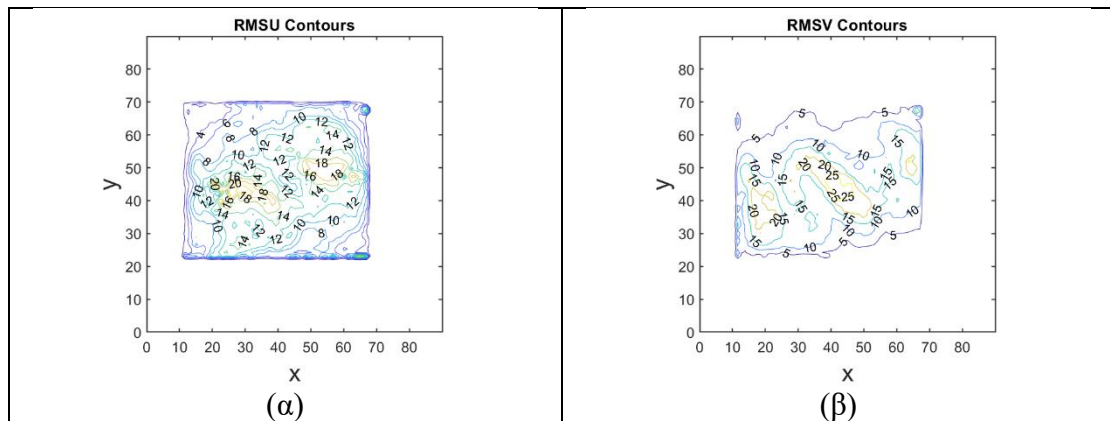
Σχ.5.2.ε.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$ ). (10 μαγνήτες/7V)

### 5.2.στ Διάταξη δέκα μαγνητών-Τάση ηλεκτροδίων 9V

Το μέσο χρονικά πεδίο αποτελείται και πάλι από δυο μεγάλες δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε ευθεία που σχηματίζει μια θετική γωνία ως προς τον άξονα x (σχ. 5.2.στ.1). Η μέγιστη τιμή του μέτρου της ταχύτητας είναι η ίδια όπως πριν δηλ. 40 mm/s (σχ.5.2.στ.1) και η τυπική απόκλιση της ταχύτητας είναι αυξημένη στα 25 mm/s (σχ.5.2.στ.2) για την συνιστώσα  $v$ , ενώ η τυπική απόκλιση της  $u$  συνιστώσας φθάνει στα 18 mm/s όπως για την τάση των 7V.

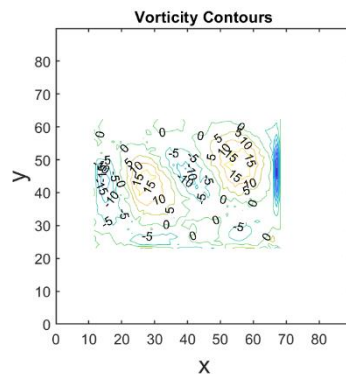


Σχ. 5.2.στ.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής (10 μαγνήτες/9V)



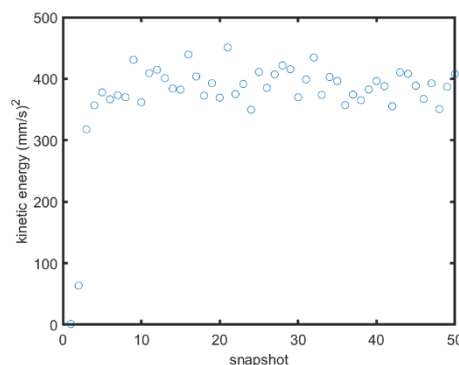
Σχ. 5.2.στ.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης των δυο συνιστωσών της ταχύτητας (10 μαγνήτες/9V)

Η στροβιλότητα του πεδίου δείχνεται στο σχ.5.2.στ.3 και παρουσιάζει μέγιστες τιμές στο κέντρο των δυο δινών της τάξης των  $15 \text{ s}^{-1}$ . Οι τιμές της στροβιλότητας είναι θετικές διότι οι δίνες είναι αριστερόστροφες.



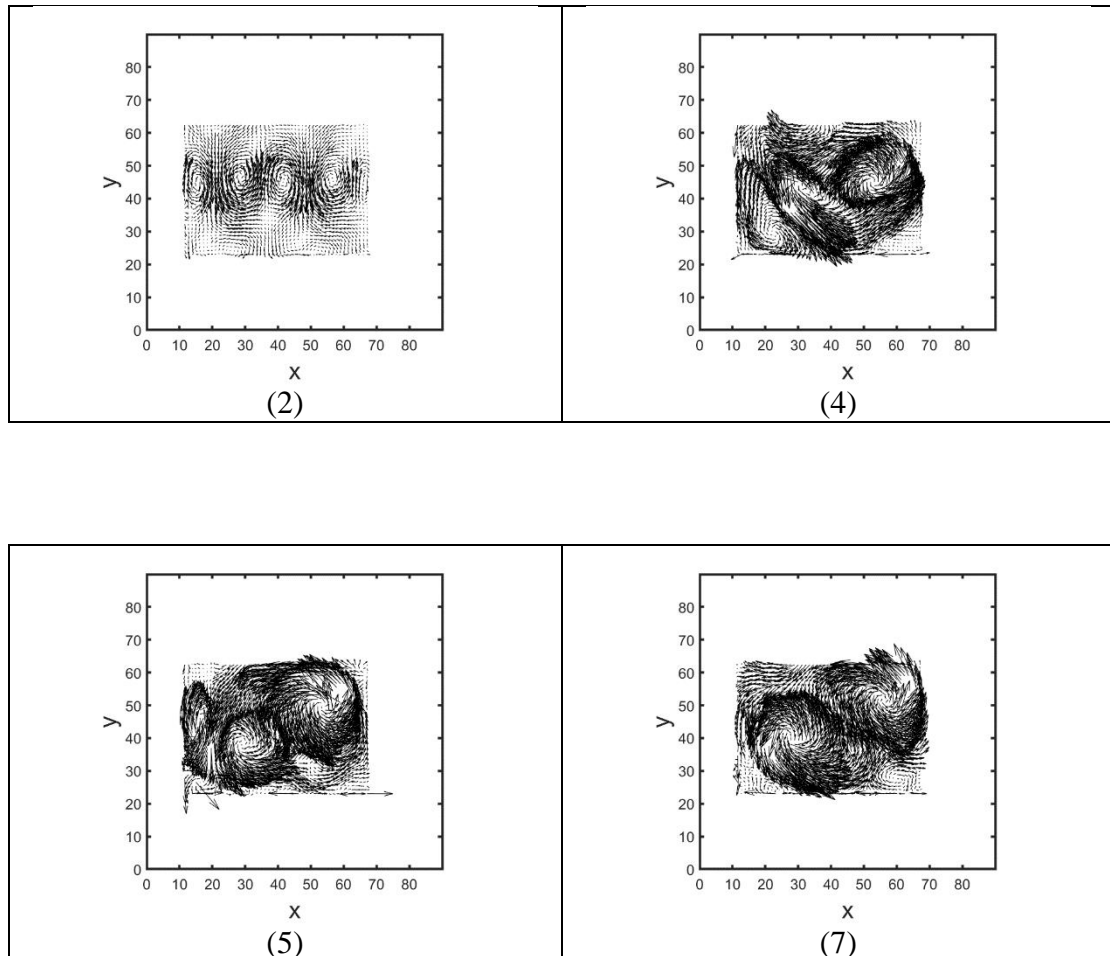
Σχ.5.2.στ.3 Στροβιλότητα του μέσου πεδίου ροής

Η κινητική ενέργεια του πεδίου φθάνει τα  $450 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  παρουσιάζοντας διακυμάνσεις, στο διάστημα  $350 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  με  $450 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.2.στ.4).



Σχ. 5.2.στ.4 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου συναρτήσει του χρόνου (10 μαγνήτες/9V)

Η χρονική εξέλιξη του πεδίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά δηλ. μειώνεται ο αριθμός των δινών και αυξάνει η έντασή τους (σχ. 5.2.στ.5).



Σχ.5.2.στ.5 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ). (10 μαγνήτες/9V)

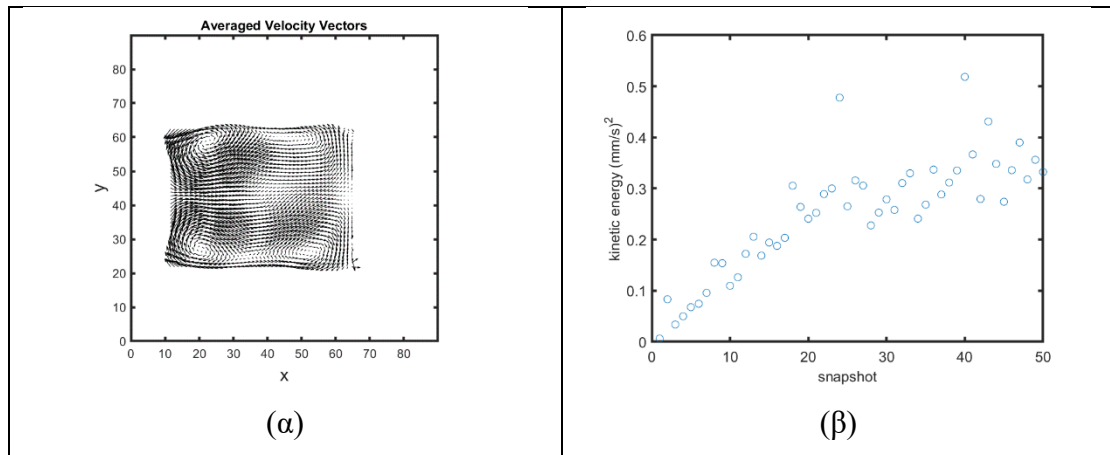
## 5.3 Τοροειδής Μαγνήτης

Ο τοροειδής μαγνήτης είναι τοποθετημένος κάτω από τη δεξαμενή έτσι ώστε το κέντρο του να ταυτίζεται με το κέντρο της δεξαμενής.

### 5.3.α Τοροειδής μαγνήτης-Τάση ηλεκτροδίων 1 V

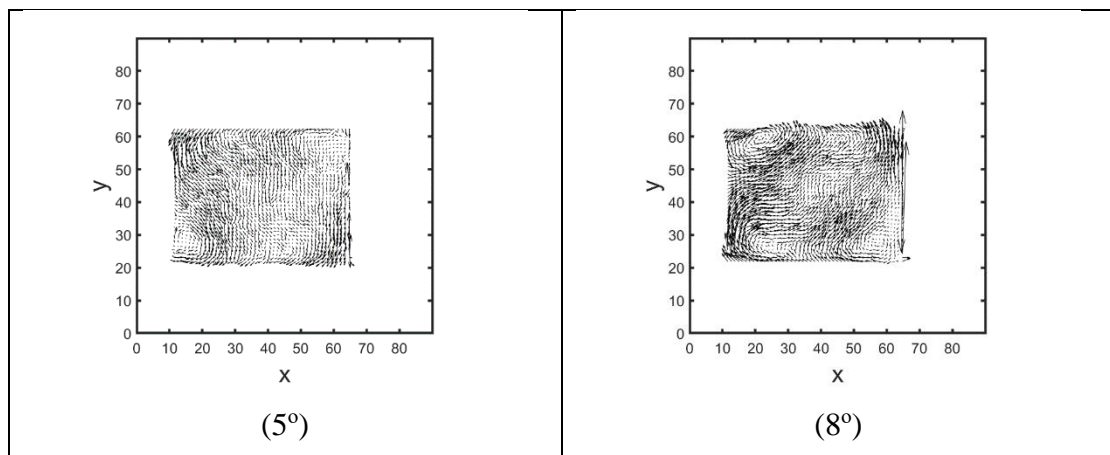
Για τάση 1V, το μέσο πεδίο ροής αποτελείται από δυο δίνες αντίθετης κυκλοφορίας προς την πλευρά  $x=0$  και άλλες δυο δίνες, ασθενέστερες, κοντά στην απέναντι πλευρά της δεξαμενής. Οι ταχύτητες του ρευστού είναι της τάξης του 1 mm/s με πολύ μικρές διακυμάνσεις (σχ.5.3.α.1,α). Ως επακόλουθο των χαμηλών ταχυτήτων, η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου παίρνει τιμές που δεν υπερβαίνουν το  $0.5 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ.5.3.α.1, β).

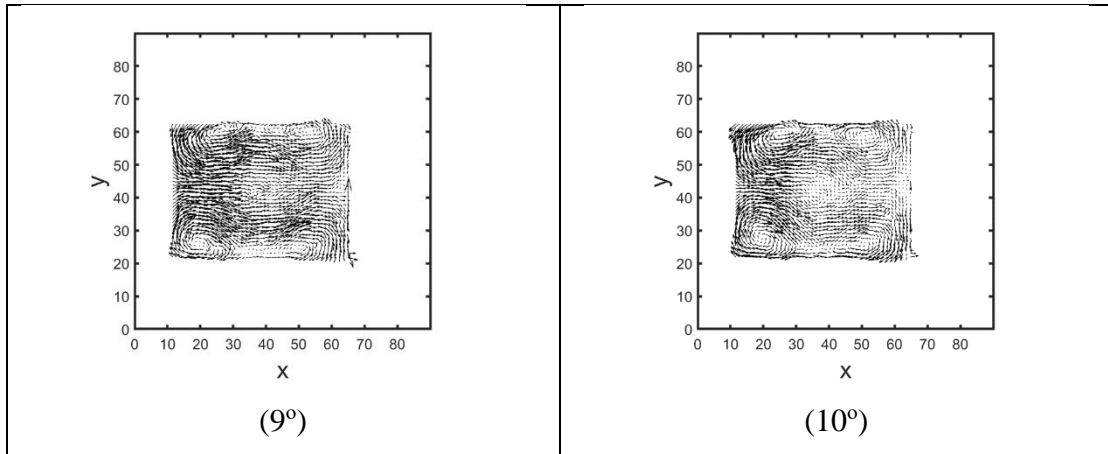
Η κύρια κατεύθυνση του ρευστού είναι προς τα δεξιά διότι οι μαγνητικές γραμμές κατευθύνονται από την ελεύθερη επιφάνεια προς τον πυθμένα της δεξαμενής.



Σχ.5.3.α.1 Μέσο χρονικά πεδίο (α). Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (β). (Τοροειδής μαγνήτης/1V)

Σχετικά με την χρονική εξέλιξη του πεδίου, παρατηρούμε ότι δημιουργούνται από μια δίνη κοντά στις τέσσερις γωνίες της δεξαμενής και καθώς περνά ο χρόνος ενισχύονται οι δυο από αυτές που βρίσκονται κοντά στη πλευρά  $x=0$ .

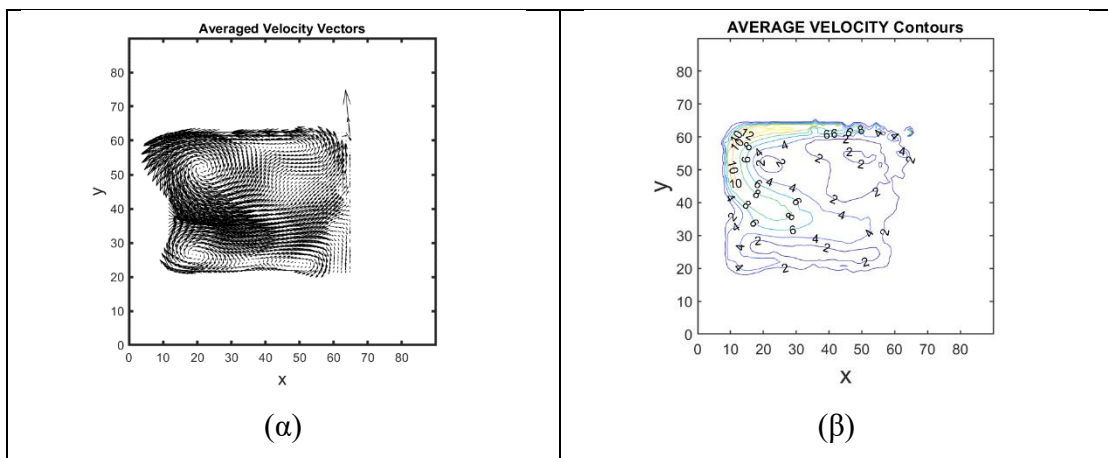




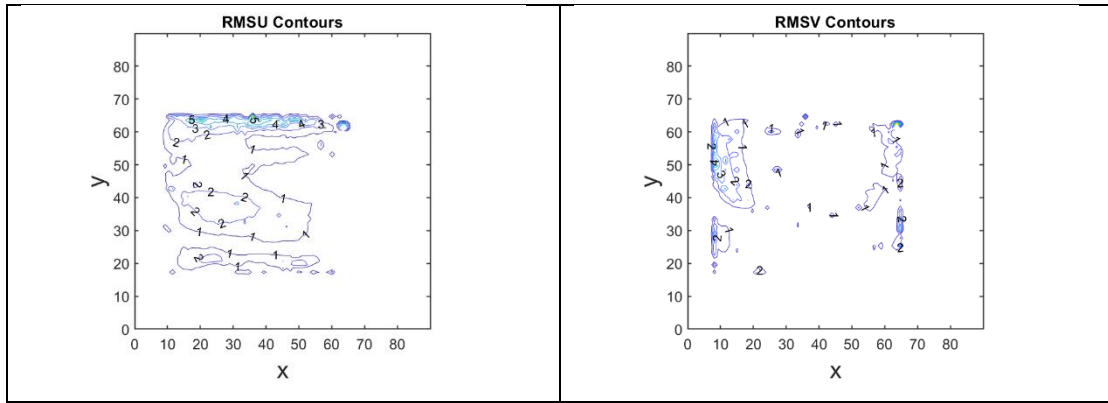
Σχ. 5.3.α.2 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής ( $5^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $10^\circ$ ). (Τοροειδής μαγνήτης/1V)

### 5.3.β Τοροειδής μαγνήτης-Τάση ηλεκτροδίων 2 V

Για τάση 2V, το μέσο πεδίο ροής αποτελείται από δυο δίνες αντίθετης κυκλοφορίας κοντά στην πλευρά  $x=0$  εκ των οποίων η μια είναι μεγαλύτερης κυκλοφορίας έναντι της άλλης (σχ.5.3.β.1,α). Οι ταχύτητες του ρευστού είναι της τάξης του 10 mm/s (σχ.5.3.β.1,α) με διακυμάνσεις της τάξης των 2mm/s (σχ.5.3.β.2).

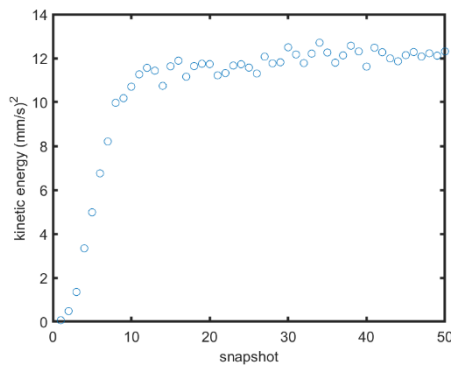


Σχ. 5.3.β.1 Μέσο χρονικά πεδίο ροής. (Τοροειδής μαγνήτης/2V)



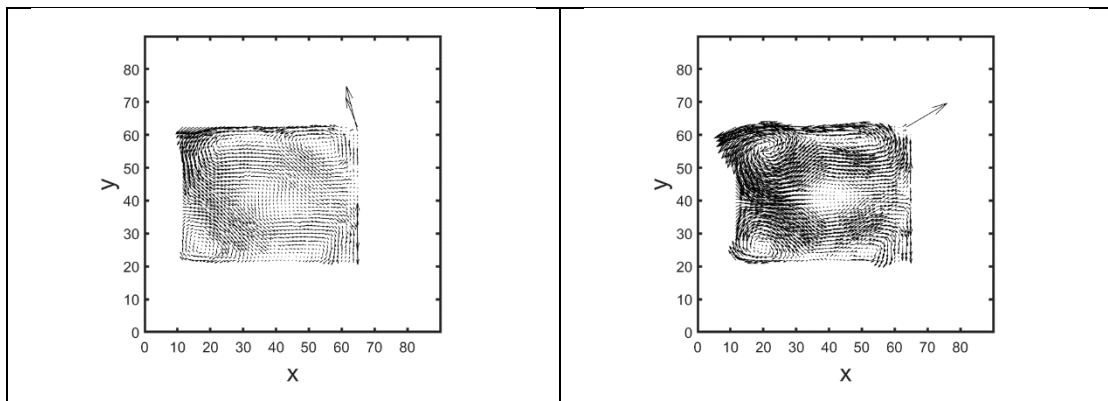
Σχ. 5.3.β.2 Κατανομή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας (Τοροειδής μαγνήτης/2V)

Η κινητική ενέργεια του πεδίου ροής αυξάνει αρχικώς και μετά από 14 στιγμιότυπα (~13sec) σταθεροποιείται στα  $12 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  (σχ. 5.3.β.3).

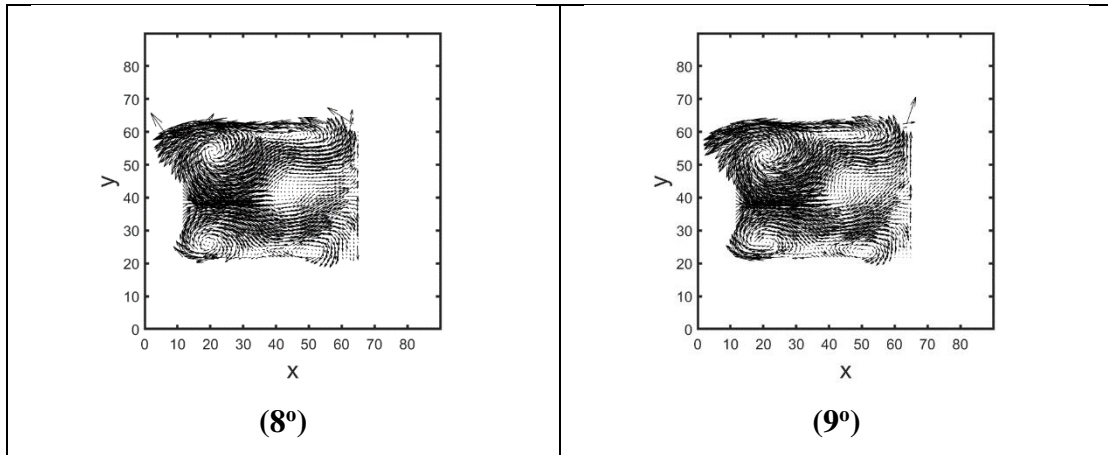


Σχ. 5.3.β.3 Μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου (Τοροειδής μαγνήτης/2V)

Σχετικά με την χρονική εξέλιξη του πεδίου, παρατηρούμε ότι δημιουργούνται σχεδόν από την αρχή τέσσερις δίνες κοντά στις τέσσερις γωνίες της δεξαμενής και καθώς περνά ο χρόνος ενισχύονται οι δυο από αυτές που βρίσκονται κοντά στη πλευρά  $x=0$ .



<b>(3°)</b>	<b>(5°)</b>
-------------	-------------

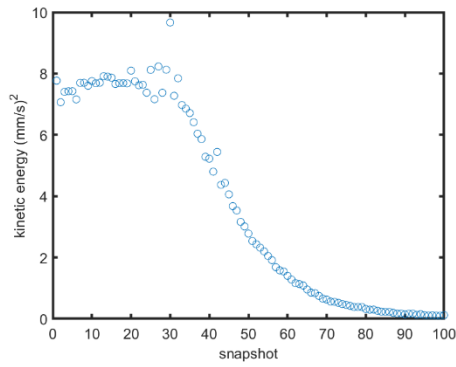


Σχ. 5.3.β.4 Τέσσερα στιγμιότυπα του πεδίου ροής (3°, 5°, 8°, 9°). (Τοροειδής μαγνήτης/2V)

### 5.3.γ Τοροειδής μαγνήτης-Τάση ηλεκτροδίων 1V-Επιβραδυνόμενη ροή

Στην περίπτωση αυτή, αλλάξαμε την πολικότητα της επιβαλλόμενης τάσης του 1V (για  $y=0$  η τάση να είναι θετική) με αποτέλεσμα η κίνηση του ρευστού να αλλάξει φορά. Επίσης, σε κάποια στιγμή έγινε αποσύνδεση της ηλεκτρικής πηγής με σκοπό την καταγραφή της εξέλιξης του πεδίου χωρίς την παρουσία ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί η ροή και να ακινητοποιηθεί το ρευστό μετά από παρέλευση 70 περίπου στιγμιότυπων που ισοδυναμεί σε χρόνο 36 sec. Στο σχ. 5.3.γ.1 δείχνεται η μείωση της κινητικής ενέργειας (η οποία ήταν περίπου  $8 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  πριν την αποσύνδεση των ηλεκτροδίων από την πηγή ρεύματος), αρχικώς με μεγαλύτερο ρυθμό (από το στιγμιότυπο 32° που έγινε η αποσύνδεση της πηγής ρεύματος έως το 50°) και στη συνέχεια με μικρότερο ρυθμό έως το 100° στιγμιότυπο, όπου πλέον μηδενίστηκε.

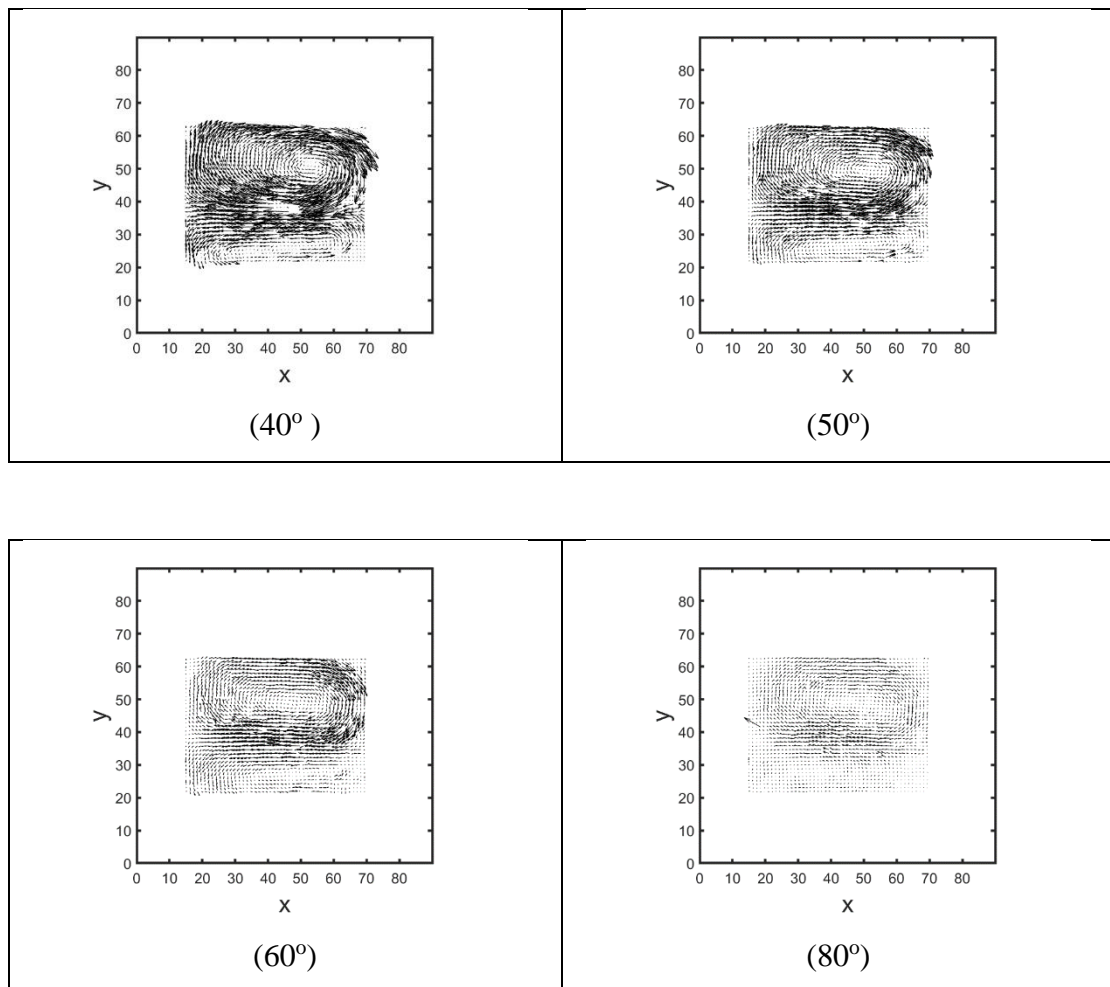




Σχ. 5.3.γ.1 Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής συναρτήσει του χρόνου.

Επιβραδυνόμενη ροή.

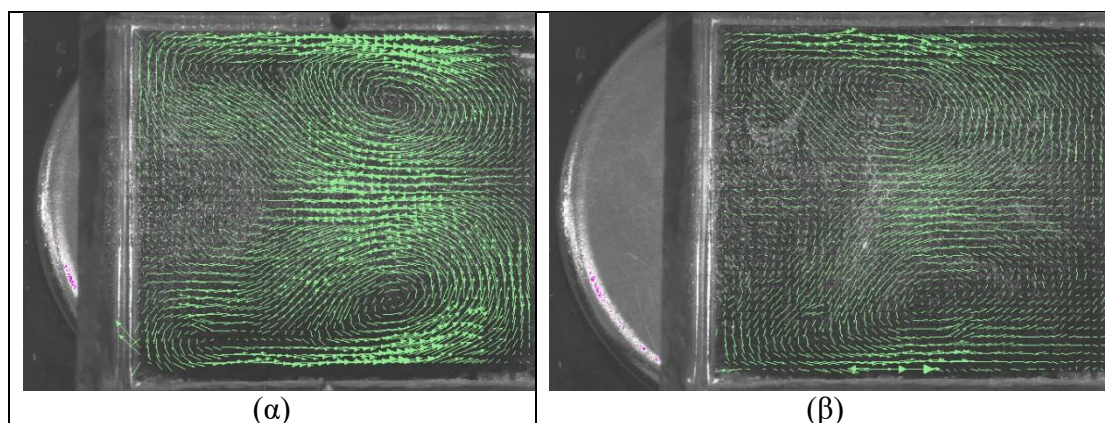
Τέσσερα στιγμιότυπα της επιβραδυνόμενης ροής (το  $40^0$ ,  $50^0$ ,  $60^0$  και  $80^0$ ) δείχνονται στο σχ. 5.3.γ.2 όπου το πεδίο ροής αρχικώς χαρακτηρίζεται από δυο ισχυρές δίνες, οι οποίες προοδευτικώς μετασχηματίζονται σε μια δίνη.



Σχ. 5.3.γ.2 Τέσσερα στιγμιότυπα της επιβραδυνόμενης ροής ( $40^0$ ,  $50^0$ ,  $60^0$ ,  $80^0$ )

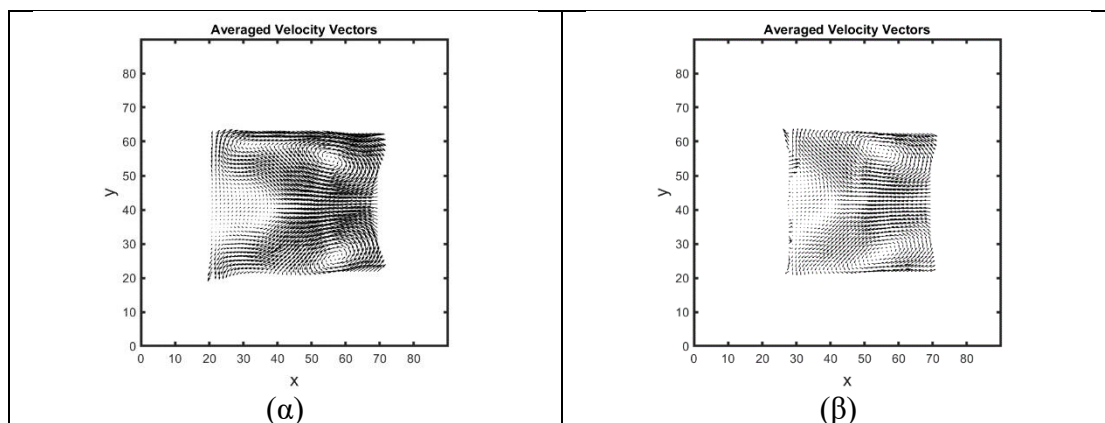
### 5.3.δ Τοροειδής μαγνήτης τοποθετημένος έκκεντρα ως προς το κέντρο της δεξαμενής

Έχοντας την θετική τάση στο επίπεδο  $y=0$  (όπως και στην περίπτωση 5.3.γ), εξετάσαμε δυο περιπτώσεις όπου ο τοροειδής μαγνήτης ήταν τοποθετημένος έκκεντρα ως προς το κέντρο της δεξαμενής και η τάση ήταν 1V. Στη μια περίπτωση η εκκεντρότητα ήταν μικρότερη και στην άλλη μεγαλύτερη όπως δείχνεται στο σχ. 5.3.δ.1 με τον τοροειδή μαγνήτη και τη δεξαμενή καθώς και το πεδίο ταχυτήτων. Σημειώνεται ότι η κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών είναι προς τον πυθμένα.

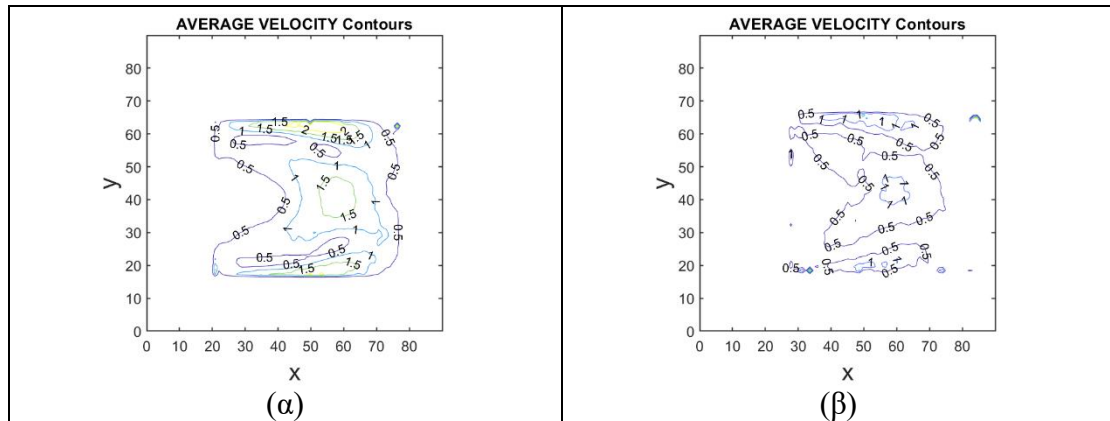


Σχ. 5.3.δ.1 Έκκεντρη τοποθέτηση τοροειδούς μαγνήτη. Μικρή εκκεντρότητα (α), και μεγάλη εκκεντρότητα (β). Τάση 1V.

Στην περίπτωση της μικρής εκκεντρότητας οι ταχύτητες του ρευστού φαίνεται να είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την περίπτωση της μεγαλύτερης εκκεντρότητας (σχ.5.3.2.δ.2 και 5.3.2.δ.3) αλλά το πεδίο ροής παρουσιάζει παρόμοια εικόνα αποτελούμενη από δυο δίνες στην απέναντι πλευρά της  $x=0$ . Απλώς, η μετατόπιση του μαγνήτη προκαλεί μετατόπιση των κέντρων των δινών.

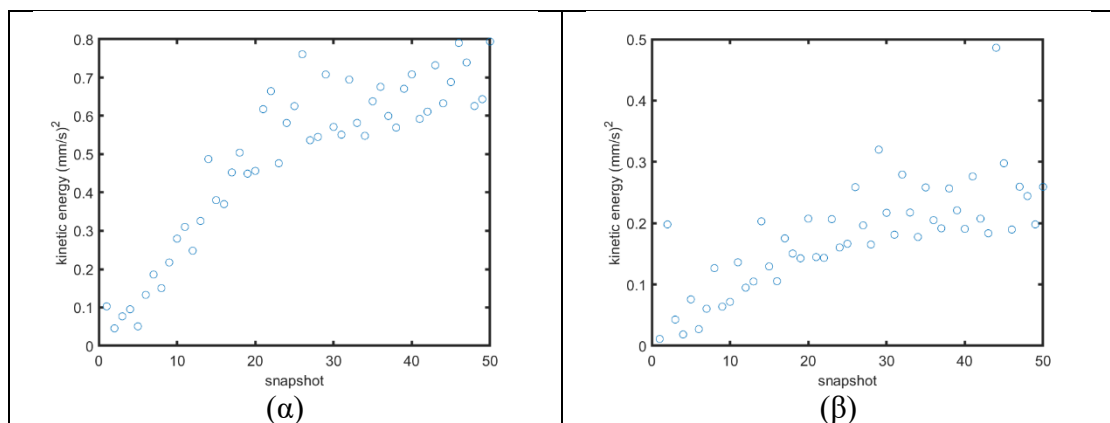


Σχ.5.3.δ.2 Μέσο πεδίο ροής. Μικρή εκκεντρότητα (α), και μεγάλη εκκεντρότητα (β).  
(Τοροειδής μαγνήτης/1V)



Σχ. 5.3.δ.2 Κατανομή τυπικής απόκλισης της ταχύτητας. Μικρή εκκεντρότητα (α), και μεγάλη εκκεντρότητα (β). (Τοροειδής μαγνήτης/1V)

Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής φθάνει σε μια μέγιστη τιμή  $0.8 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για την περίπτωση της μικρής εκκεντρότητας και  $0.3 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για την περίπτωση της μεγαλύτερης εκκεντρότητας.



Σχ. 5.3.δ.2 Μέση κινητική ενέργεια πεδίου ροής. Μικρή εκκεντρότητα (α), και Μεγάλη εκκεντρότητα (β). Τοροειδής μαγνήτης.

## 6. Συγκρίσεις – Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της πειραματικής αυτής εργασίας μελετήθηκε η ροή αλατόνευρου συγκέντρωσης 15% κατά βάρος (150 g άλατος ανά 1l απιονισμένου νερού) μέσα σε ριχή ανοικτή δεξαμενή, βάθους 6 mm, υπό την παρουσία κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου χωρικά μεταβαλλόμενου και οριζόντιου ηλεκτρικού ρεύματος. Για τη δημιουργία του ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν δυο κατακόρυφες πλάκες αλουμινίου πάχους 1 mm και σε απόσταση 45 mm μεταξύ τους, οι οποίες συνδέθηκαν με πηγή συνεχούς ρεύματος. Οι τάσεις που επιβλήθηκαν μεταξύ των ηλεκτροδίων κυμάνθηκαν στο διάστημα 2 V με 14 V και η ένταση του ρεύματος από 0.25 A έως 1.2 A. Για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου τοποθετήθηκαν μόνιμοι μαγνήτες κάτω από τη δεξαμενή, η οποία ήταν κατασκευασμένη από Plexiglas. Χρησιμοποιήθηκαν: α) 4 μαγνήτες διαστάσεων 25 mm x 12.5 mm x 3 mm με τη μεγαλύτερη διάστασή τους να είναι κάθετη προς τις πλάκες αλουμινίου και μαγνητικής επαγωγής 50 mT σε απόσταση 6 mm από την επιφάνειά τους. Οι 4 μαγνήτες ήταν κολλημένοι ο ένας με τον άλλον (μέσω των μαγνητικών δυνάμεων λόγω αντίθετης πολικότητας) δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο με κατακόρυφες μαγνητικές γραμμές των οποίων η φορά άλλαζε από μαγνήτη σε μαγνήτη, β) 10 ίδιοι μαγνήτες με τους προηγούμενους, και γ) έναν τοροειδή μαγνήτη.

Για κάθε διάταξη μαγνητών, η μεταβολή της τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων, προκαλούσε αλλαγή στο πεδίο ροής. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

### A) Διάταξη 4 μαγνητών

Για τις τάσεις που εξετάστηκαν δηλ. από 4 V έως 14 V με αντίστοιχες εντάσεις ρεύματος 0.25 A έως 1.2 A:

- το πεδίο ροής κατά την έναρξη της ροής αποτελείται από 8 δίνες (4 ζεύγη δινών αντίθετης κυκλοφορίας), των οποίων τα κέντρα βρίσκονται πάνω σε δυο γραμμές κάθετες στην κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Καθώς περνάει ο χρόνος ο αριθμός των δινών μειώνεται σε 4 ή 2 δίνες αντίθετης κυκλοφορίας.
- Αυξανόμενης της τάσης, οι ταχύτητες του ρευστού αυξάνουν από 14 mm/s σε 50 mm/s καθώς και οι διαταραχές της με τυπικές αποκλίσεις που φθάνουν τα 25 mm/s.

Μεταξύ των δυο συνιστωσών της ταχύτητας, η συνιστώσα που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος παρουσιάζει μεγαλύτερες διαταραχές.

- Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής αυξάνει με γρήγορο ρυθμό στην αρχή, αλλά στη συνέχεια τείνει προς κάποια τιμή με μικρές ή μεγάλες διακυμάνσεις. Οι τελικές τιμές της κινητικής ενέργειας αυξάνουν από  $70 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για τη τάση των  $4 \text{ V}$  σε  $500 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για την τάση των  $14 \text{ V}$ .

### **B) Διάταξη 10 μαγνητών**

Για τις τάσεις που εξετάστηκαν δηλ. από  $2 \text{ V}$  έως  $9 \text{ V}$  διαπιστώθηκαν τα εξής:

-Το πεδίο ροής κατά την έναρξη της ροής αποτελείται από 4 δίνες (2 ζεύγη δινών αντίθετης κυκλοφορίας), των οποίων τα κέντρα βρίσκονται σε μια ευθεία κάθετη προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Στη συνέχεια όμως, ο αριθμός των δινών μειώνεται σε 3 και τέλος σε 2 δίνες. Το μέσο πεδίο αποτελείται από δυο δίνες ίδιας φοράς κυκλοφορίας των οποίων τα κέντρα βρίσκονται σε μια ευθεία που σχηματίζει μικρή γωνία ως προς τις πλάκες των ηλεκτροδίων.

- Αυξανόμενης της τάσης, οι ταχύτητες του ρευστού αυξάνουν από  $5 \text{ mm/s}$  σε  $40 \text{ mm/s}$  καθώς και οι διαταραχές της ταχύτητας ιδιαίτερα για τάσεις πάνω από  $3 \text{ V}$ .

- Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής αυξάνει με γρήγορο ρυθμό στην αρχή, αλλά στη συνέχεια τείνει προς κάποια τιμή με μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε σχέση με την περίπτωση των 4 μαγνητών. Οι τελικές τιμές της κινητικής ενέργειας αυξάνουν από  $23 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για τη τάση των  $2 \text{ V}$  σε  $380 \text{ mm}^2/\text{s}^2$  για την τάση των  $9 \text{ V}$ . Συγκρίνοντας την κινητική ενέργεια του πεδίου υπό την παρουσία των 4 και 10 μαγνητών για τις ίδιες τάσεις, διαπιστώνουμε ότι στην περίπτωση των 10 μαγνητών η κινητική ενέργεια είναι σε μερικές περιπτώσεις πάνω από 2 φορές μεγαλύτερη, π.χ. για την τάση των  $4 \text{ V}$  η σχέση είναι  $150/70$ , για  $7 \text{ V}$  είναι  $350/150$  και για  $9 \text{ V}$  είναι  $380/230$ .

### **Γ) Τοροειδής Μαγνήτης**

Στην περίπτωση του τοροειδούς μαγνήτη εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις τοποθετώντας τον μαγνήτη στο κέντρο της δεξαμενής αλλά και σε δυο άλλες θέσεις με εκκεντρότητα. Η τάση που επεβλήθη στα ηλεκτρόδια ήταν  $1 \text{ V}$  και  $2 \text{ V}$ , αντίστοιχα. Τα βασικά συμπεράσματα είναι τα εξής:

-το πεδίο ροής αποτελείται από 4 δίνες με τα κέντρα τους κοντά στις 4 γωνίες της δεξαμενής εκ των οποίων οι δυο είναι πολύ ισχυρότερες. Η διαμόρφωση του πεδίου αρχίζει από τα πρώτες χρονικές στιγμές και δεν αλλάζει ιδιαίτερα με τον χρόνο σε αντίθεση με την περίπτωση των 4 και 10 μαγνητών.

- μεταβάλλοντας τη θέση του μαγνήτη μετατοπίζονται τα κέντρα των δινών χωρίς να αλλάζει η βασική εικόνα του πεδίου

#### **Δ) Επιβραδυνόμενη ροή**

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο τοροειδής μαγνήτης και έγινε αποσύνδεση της πηγής ρεύματος μετά από κάποιο χρονικό διάστημα που η ροή είχε αποκατασταθεί. Διαπιστώθηκε ότι όταν έπαψε να υπάρχει το ηλεκτρικό ρεύμα, η ροή άρχισε να επιβραδύνεται αρχικά με γρήγορο ρυθμό και στη συνέχεια με μικρότερο. Σχετικά με την εικόνα του πεδίου, ενώ αρχικώς υπήρχαν 4 δίνες, προοδευτικώς μειώθηκαν σε μια δίνη που καταλάμβανε όλο το πεδίο.

#### **Ε) Αδιάστατοι αριθμοί του πειράματος**

**-Αριθμός Hartmann:**  $Ha=LB(\sigma/\rho\nu)^{0.5}$ .

Αν θεωρήσουμε ως χαρακτηριστικό μήκος  $L = 3 \text{ mm}$ , το βάθος που έγιναν οι μετρήσεις του πεδίου όπου η μαγνητική επαγωγή είναι  $B=50 \text{ mT} = 50 \times 10^{-3} \text{ (kg/s}^2\text{A)}$ , η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ρευστού είναι  $\sigma=12(\text{S/m})=12 \text{ s}^3\text{A}^2/(\text{kg m}^3)$  και η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού  $\rho\nu=1.4 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$  (Chen et al., 1973), προκύπτει ότι

**Ha=0.014.** Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις Lorentz είναι πολύ μικρότερες από τις δυνάμεις ιξώδους.

**-Αριθμός Reynolds:**  $Re=UL/\nu = 0.05 \times 0.03/(1.3 \times 10^{-6})=230$ . Άρα, οι αδρανειακές δυνάμεις είναι αρκετά μικρότερες από τις δυνάμεις ιξώδους.

**-Μαγνητικός αριθμός Reynolds:**  $Re_m=UL\sigma\mu_0=0.05 \times 0.003 \times 12 \times 4\pi \times 10^{-7} =$

$=2.2 \times 10^{-9}$ . Επομένως, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία του ρευστού είναι πολύ ασθενέστερο από το μαγνητικό πεδίο των μαγνητών.

#### **Στ) Δύναμη Lorentz**

Για να εκτιμήσουμε την τάξη μεγέθους της δύναμης Lorentz, θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο της  $F=J \times B$ . Εφόσον η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι σταθερή, η δύναμη αυτή αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος. Για την μέγιστη ένταση του

ρεύματος 1.2 A, η πυκνότητα ρεύματος είναι  $J = 1.2 / (0.055 \times 0.006) = 3636 \text{ A/m}^2$ .  
Επομένως, η μέγιστη δύναμη Lorentz ανά μονάδα όγκου είναι:  $F = 3636 \times 50 \times 10^{-3} = 181 \text{ N/m}^3$ .

Επιγραμματικά μπορούμε να πούμε ότι ένα βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από την εργασία αυτή είναι ότι το πεδίο ροής χαρακτηρίζεται από δίνες των οποίων ο αριθμός μειώνεται με τον χρόνο ενώ αυξάνει το μέγεθός τους και οι διαταραχές της ταχύτητας. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα κατέληξαν και εργασίες άλλων ερευνητών, όπως όπως των J. Paret and P. Tabeling, 1998, των K. Messadek, R. Moreau, 2002 και των A. Potherat and J-P Schweitzer, 2011.

## Βιβλιογραφία

1. A. Shafelner, 2016. Introduction to Magnetohydrodynamics. Bachelor Thesis, Johannes Kepler Universitat.
2. Klein, R., 2010. MHD experiments on quasi two-dimensional and three-dimensional liquid metal flows. PhD Thesis, Coventry University.
3. Rossi, J. C. Vassilicos and Y. Hardalupas, J. 2006. ‘Electromagnetically controlled multi-scale flows’, J. Fluid Mech, 558, pp. 207–242.
4. Figueroa, F. Demiaux, S. Cuevas, E. Ramos, 2009. ‘Electrically driven vortices in a weak dipolar magnetic field in a shallow electrolytic layer’, J. Fluid Mech., 641, pp. 245–261.
5. T. Stan Gregory, Rui Cheng, Guoyi Tang, Leidong Mao, and Zion Tsz Ho Tse, 2016. The Magnetohydrodynamic Effect and its Associated Material Designs for Biomedical Applications:A State of the Art Review. Adv Funct Mater, 26 (22), 3942–3952
6. S. Rashidi, J. A. Esfahani, M. Maskaniyan, 2017. Applications of magnetohydrodynamics in biological systems-A review on the numerical studies. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 439, 358–37.
7. S. Kenjeres, 2008. Numerical analysis of blood flow in realistic arteries subjected to strong non-uniform magnetic fields. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29, 752-764.
8. K. Messadek, R. Moreau, 2002. An experimental investigation of MHD quasi-two-dimensional turbulent shear flows. J. Fluid Mech. (2002), vol. 456, pp. 137-159.
9. A. Potherat and J-P Schweitzer, 2011. A shallow water model for magnetohydrodynamic flows with turbulent Hartmann layers. Physics of Fluids, 23, 055108-1-11.
10. J. Paret and P. Tabeling, 1998. Intermittency in the two-dimensional inverse cascade of energy: Experimental observations. Physics of Fluids, 10, 3126-3136.
11. A. Thess, Instabilities in two-dimensional spatially periodic flows. Part I: Kolmogorov flow, 1992. Physics of Fluids, 4(7), 1385-1395.



12. J. Titohof, B. Suri, R. K. Pallantla, R. O. Grigorief, M. F. Schatz, 2018. Bifurcations in a quasi-two-dimensional Kolmogorof-like flow. *Journal of Fluid Mechanics*.
13. S.F. Chen, R.C. Chan, S.M. Read, L.A. Bromley, 1973. Viscosity of sea water solutions. *Desalination*, 13, 37-51.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται ο κώδικας γραμμένος σε περιβάλλον MATLAB βάσει του οποίου έγινε η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που ελήφθησαν με το σύστημα PIV και προέκυψε το πεδίο ταχυτήτων του ρευστού.

1. Τα σημεία μέτρησης προσδιορίζονται με δυο δείκτες (i, j) όπου i είναι ο αριθμός των γραμμών και j ο αριθμός των στηλών. Το σημείο (1,1) βρίσκεται στο άνω αριστερό άκρο της εικόνας. Υπενθυμίζεται ότι η αρχή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (x,y) βρίσκεται στο κάτω αριστερό άκρο της εικόνας δηλ. στο  $i=i_{\max}$  και  $j=1$ . Στην εφαρμογή αυτή, ο δείκτης i παίρνει τιμές στο διάστημα [1,63] και ο δείκτης j στο διάστημα [1,85]. Δηλαδή υπολογίζονται για κάθε πεδίο ροής συνολικά  $63 \times 85=5355$  διανύσματα. Επειδή η κάμερα κατέγραφε εκτός από το πεδίο ροής και ένα μέρος έξω από τη δεξαμενή, το πεδίο ροής βρίσκονταν στην περιοχή  $i \in [10,65]$  και  $j \in [10,60]$ .

2. Επειδή κάποια διανύσματα παίρνουν εσφαλμένα μεγάλες τιμές, χρησιμοποιήσαμε ένα κριτήριο βάσει του οποίου εάν οι ταχύτητες υπερβούν κάποια αυθαίρετη τιμή (U1,V1) τότε να μηδενίζονται. '

3. Η χρονική απόσταση των δυο αναλαμπών του Laser για τη λήψη του ζεύγους εικόνων βάσει του οποίου υπολογίζεται το πεδίο ταχυτήτων συμβολίζεται στο πρόγραμμα ως dt. Π.χ. η εντολή:  $dt=30000*10^{(-6)}$  σημαίνει ότι η χρονική απόσταση είναι 30000μsec δηλ. 3msec.

4. Η εντολή  $pixelmm=13.83$  σημαίνει ότι σύμφωνα με τη θέση της κάμερας ως προς το φωτιζόμενο επίπεδο, τον φακό της κάμερας και τον αριθμό των pixel της κάμερας, αντιστοιχούν 13.83 pixel της κάμερας σε μήκος 1mm στο φωτιζόμενο επίπεδο.

5. Η εντολή  $cd(pathinput)$  αλλάζει το directory που βρίσκεται αυτός ο κώδικας και μεταβαίνει στο directory που βρίσκεται το subdirectory 'Analysis' όπου είναι αποθηκευμένα τα αρχεία με τα δεδομένα του PIV. Τα ονόματα των αρχείων αυτών έχουν κατάληξη 'vec'.

6. Η παράμετρος 'numfile' είναι ο αριθμός των αρχείων με την κατάληξη 'vec'. Στην εργασία αυτή, πλην μιας περίπτωσης, τα αρχεία ήταν 50 και επομένως η παράμετρος αυτή έπαιρνε την τιμή 50.

7. Οι θέσεις μέτρησης της ταχύτητας συμβολίζονται με τις συντεταγμένες (x,y). Επειδή αυτές είναι αποθηκευμένες υπό μορφή αριθμού pixel, ο αριθμός αυτός διαιρείται με την παράμετρο pixelmm οπότε οι συντεταγμένες μετατρέπονται σε mm.
8. Οι μετατοπίσεις των σωματιδίων από τη μια εικόνα στη δεύτερη ενός ζεύγους εικόνων αποθηκεύονται υπό μορφή αριθμού pixel. Για να μετατραπούν σε ταχύτητες με μονάδες (mm/s), οι μετατοπίσεις διαιρούνται με το γινόμενο (pixelmm\*dt). Η παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα x συνιστώσα της ταχύτητας συμβολίζεται με u και η παράλληλη προς τον άξονα y, με v.
9. Η μέση τιμή της ταχύτητας για κάθε σημείο μέτρησης προκύπτει από τον μέσο όρο όλων των τιμών των αρχείων στην ίδια θέση. Η αντίστοιχη εντολή που πραγματοποιεί αυτόν τον υπολογισμό είναι nanmean.
10. Το μέτρο της ταχύτητας  $\sqrt{u^2 + v^2}$  συμβολίζεται από το velm(i)
11. Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας υπολογίζεται από την εντολή nanstd.
12. Επειδή οι τιμές των συντεταγμένων, των μέσων τιμών της ταχύτητας, της τυπικής απόκλισης και του μέτρου της αποθηκεύονται αρχικώς σε array με ένα μόνον δείκτη, για να μετατραπούν σε πίνακες με δυο δείκτες (i, j), χρησιμοποιείται η εντολή vec2mat δηλ. μετατρέπεται το διάνυσμα (vector) σε πίνακα (matrix). Υπό μορφή πινάκων, οι συντεταγμένες συμβολίζονται με (x1,y1), η μέση ταχύτητα με (u1,v1), η τυπική απόκλιση με (rmsu1,rmsv1) και το μέτρο της ταχύτητας με velmag.
13. Οι συνιστώσες της ταχύτητας υπο μορφή τρισδιάτων πινάκων δηλ. (i, j, m) όπου m ο χρόνος, συμβολίζονται ως uuu και vvv.
14. Η μέγιστη τιμή της μέσης τιμής της u συμβολίζεται με C1 και η μέγιστη τιμή της v με C2.
15. Η μέση κινητική ενέργεια του πεδίου ροής ενός στιγμιότυπου συμβολίζεται με kin.

## ΚΩΔΙΚΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PIV

```
close all

clear

%*****BASIC DATA*****

% ***** If (u,v) exceeds (U1, V1) set the velocity to not a number

U1=20;

V1=U1;

dt=30000*10(-6); % laser time interval

arrayDim =[85,63]; % number of measuring points along x and y, respectively

imax=63; % number of rows

jmax=85; % number of columns

cellcount=85*63; % total number of measuring points

pixelmm=13.83; % pixels per mm

scale=2; % scale for plotting velocities

% ***** study a part of the field of the camera *****

i1=10;

i2=45;

j1=10;

j2=60;

%***** READ DATA (x,y) in pixels and (u,v) in pixels *****

pathinput='c:\Users\mathew\Documents\AM\Magnets\Analysis\';

cd(pathinput)

fname=dir('*vec');

numfile=length(fname);

values=cell(numfile,1);

for k=1:numfile

values{k}=importdata(fname(k).name);

end

% ***** STORE DATA (x,y) in mm and (u,v) in mm/s *****

for i=1:cellcount
```

```

for k=1:numfile
    x{k}(i) = values{k}.data(i,1)/pixelmm;
    y{k}(i) = values{k}.data(i,2)/pixelmm;
    u{k}(i) = values{k}.data(i,3)/(pixelmm*dt);
    v{k}(i) = values{k}.data(i,4)/(pixelmm*dt);
    if abs(u{k}(i))> U1 | abs(v{k}(i))> V1
        u{k}(i)=NaN;
        v{k}(i)=NaN;
    end
end
end

% *****AVERAGED VELOCITIES *****

for i=1:cellcount
    for k=1:numfile
        av{i}(k) = u{k}(i);
        bv{i}(k) = v{k}(i);
    end
end

for i=1:cellcount
    uav(i)=nanmean(av{i});
    vav(i)=nanmean(bv{i});
end

% ***** VELOCITY MAGNITUDE *****

for i=1:cellcount
    velm(i)=(uav(i)^2+vav(i)^2)^0.5;
end

% ***** VELOCITY STANDARD DEVIATION *****

for i = 1:cellcount
    rmsu(i) = nanstd(av{i});
    rmsv(i) = nanstd(bv{i});
end

```

```

end
%*****CONVERT TO TABLES*****
x1=vec2mat(x{1},arrayDim(1));
y1=vec2mat(y{1},arrayDim(1));
u1=vec2mat(uav,arrayDim(1));
v1=vec2mat(vav,arrayDim(1));
rmsu1=vec2mat(rmsu,arrayDim(1));
rmsv1=vec2mat(rmsv,arrayDim(1));
velmag=vec2mat(velm,arrayDim(1));
for k=1:numfile
    uuu(:,k)=vec2mat(u{k},arrayDim(1));
    vvv(:,k)=vec2mat(v{k},arrayDim(1));
end
%***** STORE VELOCITY AVERAGED VALUES*****
ddd=[reshape(x1,1,[]);reshape(y1,1,[]);reshape(u1,1,[]);reshape(v1,1,[])];
fileID = fopen('c:\Users\mathew\Documents\AM\Magnets\Analysis\14V-4MAGN-
AVG.txt','w');
fprintf(fileID,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',ddd);
fclose(fileID);
%*** STORE SNAPSHOT DATA (x,y,u,v) in (mm and mm/s) in txt files*****
for k=1:numfile
ddd=[reshape(x1,1,[]);reshape(y1,1,[]);reshape(uuu(:,k),1,[]);reshape(vvv(:,k),1,[]);
];
fileID = fopen(sprintf('4MAGN-14V-%d.txt',k),'w');
fprintf(fileID,'%12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',ddd);
fclose(fileID);
clear ddd
end
% **MAXIMUM AVERAGED VELOCITY COMPONENTS U & V*****
% finds the maximum of the maxima of all columns*****
c1=max(max(abs(u1(i1:i2,j1:j2))))

```

```

c2=max(max(abs(v1(i1:i2,j1:j2))))
% ***** PLOT SOME SNAPSHOTS *****
for m=1:10
    figure(m)
    quiver(x1(i1:i2,j1:j2),y1(i1:i2,j1:j2),uuu(i1:i2,j1:j2,m)*scale,vvv(i1:i2,j1:j2,m)*scale,
    0,'k')
        axis equal
        xlim([0 90])
        ylim([0 90])
        set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2)
        xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
        xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
        yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
        yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
        xlabel('x','FontSize',20,'LineWidth',2)
        ylabel('y','FontSize',20,'LineWidth',2)
    imagefile = sprintf('14V-4MAGN-SNAP-%d.png',m);
    print('-dpng','-r150',imagefile);
    end
% ***** PLOT AVERAGED VELOCITY FIELD *****
figure(m+1)
hold on;
quiver(x1(i1:i2,j1:j2),y1(i1:i2,j1:j2),u1(i1:i2,j1:j2)*scale,v1(i1:i2,j1:j2)*scale,0,'k')
    axis equal
    xlim([0 90])
    ylim([0 90])
    set(gca,'Box','on', 'LineWidth',2)
    title('Averaged Velocity Vectors');
    xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
    xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])

```

```

yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    xlabel('x','FontSize',15,'LineWidth',2)
    ylabel('y','FontSize',15,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-AVG-VECTORS-%d.png',m+1);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% ***** KINETIC ENERGY *****
for l=1:numfile
    sum=0;
    n=0;
    for i=1:i2
        for j=j1:j2
            n=n+1;
            if isnan(uuu(i,j,l)) | isnan(vvv(i,j,l))
                uuu(i,j,l)=0;
                vvv(i,j,l)=0;
            end
            n=n-1;
        end
        sum=sum+0.5*(uuu(i,j,l)^2+vvv(i,j,l)^2);
    end
    kin(l)=sum/n;
end
% *****PLOT KINETIC ENERGY OF SNAPSHOTS *****
figure(m+2)
hold on
snap=1:numfile;
plot(snap,kin,'o')
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2,'Box','on')
xticks([0 10 20 30 40 50])

```



```

xticklabels({'0','10','20','30','40','50'})
    xlabel('snapshot','FontSize',12,'LineWidth',2)
    ylabel('kinetic energy (mm/s)^2','FontSize',12,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-KINETIC-%d.png',m+2);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% ***CALCULATION OF VORTICITY (Forward scheme)***
l=0;
for i=i1:i2-1
    l=l+1;
    n=0;
    for j=j1:j2-1
        n=n+1;
        xxq(l,n)=x1(i,j);
        yyq(l,n)=y1(i,j);
        dx=abs(x1(i,j+1)-x1(i,j));
        dy=abs(y1(i+1,j)-y1(i,j));
        dudy(l,n)=(u1(i+1,j)-u1(i,j))/dy;
        dvdx(l,n)=(v1(i,j+1)-v1(i,j))/dx;
        vort(l,n)=dvdx(l,n)-dudy(l,n);
    end
end
% *****PLOT VORTICITY CONTOURS *****
figure(m+3)
hold on
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2,'Box','on')
v=[-10 -5 -2.5 0 2.5 5 10];
[c,h]=contour(xxq,yyq,vort);
clabel(c,h,v);
title('Vorticity Contours');

```

```

axis equal
    xlim([0 90])
    ylim([0 90])
set(gca,'FontSize',12,'LineWidth',1,'Box','on')
xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    xlabel('x','FontSize',20,'LineWidth',2)
    ylabel('y','FontSize',20,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-VORTICITY-%d.png',m+3);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% *****DRAW STREAMLINES*****
figure(m+4)
hold on
startx=0:2:90;
starty=0:2:90;
streamline(x1(i1:i2,j1:j2),y1(i1:i2,j1:j2),u1(i1:i2,j1:j2),v1(i1:i2,j1:j2),startx,starty)
[stax,stay]=ginput(2);
streamline(x1,y1,u1,v1,stax,stay)
axis equal
    xlabel('x','FontSize',15,'LineWidth',2)
    ylabel('y','FontSize',15,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('figure-streamline-%d.png',m+4);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% *****RMS of U *****
figure(m+5)
hold on

```

```

set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2,'Box','on')
v=[0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20];
[c,h]=contour(x1,y1,rmsu1);
clabel(c,h, 'manual');
title('RMSU Contours');
axis equal
    xlim([0 90])
    ylim([0 90])
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',1,'Box','on')
xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    xlabel('x','FontSize',20,'LineWidth',2)
    ylabel('y','FontSize',20,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-RMSU-%d.png',m+5);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
%*****RMS of V *****
figure(m+6)
hold on
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2,'Box','on')
v=[0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20];
[c,h]=contour(x1,y1,rmsv1);
clabel(c,h,'manual');
title('RMSV Contours');
axis equal
    xlim([0 90])
    ylim([0 90])
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',1,'Box','on')

```

```

xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    xlabel('x','FontSize',20,'LineWidth',2)
    ylabel('y','FontSize',20,'LineWidth',2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-RMSV-%d.png',m+6);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% *****
figure(m+7)
hold on
% *****U- Velocity at a given point versus time *****
for k=1:numfile
nn(k)=k;
ut(k)=uuu(28,49,k);
end
plot(nn,ut,'-o')
xlabel('snapshot-number','FontSize',20,'LineWidth',2)
    ylabel('u (mm/s)','FontSize',20,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',1,'Box','on')
imagefile = sprintf('14V-U(t)-%d.png',m+7);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
% *****
figure(m+8)
hold on
% *****V - Velocity at a given point versus time *****
for k=1:numfile
nn(k)=k;

```

```

vt(k)=vzv(28,49,k);
end
plot(nn,vt,'-o')
xlabel('snapshot-number','FontSize',20,'LineWidth',2)
    ylabel('v (mm/s)','FontSize',20,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',1,'Box','on')
imagefile = sprintf('14V-V(t)-%d.png',m+8);
print('-dpng','-r150',imagefile);
hold off
%*****
figure(m+9)
hold on
%*****average u contours
%*****AVERAGE VELOCITY CONTOURS *****
figure(m+9)
hold on
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',2,'Box','on')
v=[4 12 16];
[c,h]=contour(x1,y1,velmag);
clabel(c,h,'manual');
title('AVERAGE VELOCITY Contours');
axis equal
    xlim([0 90])
    ylim([0 90])
set(gca,'FontSize',12, 'LineWidth',1,'Box','on')
xticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
xticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
yticks([0 10 20 30 40 50 60 70 80])
yticklabels({'0','10','20','30','40','50','60','70','80'})
    xlabel('x','FontSize',20,'LineWidth',2)

```

```
ylabel('y',FontSize,20,LineWidth,2)
imagefile = sprintf('14V-4MAGN-VEL-AVERAGE-CONTOUR%d.png',m+9);
print('-dpng','-r150',imagefile);
```