

ΜΕΛΕΤΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΜΙΚΡΟΠΟΛΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΚΑΝΑΛΙ

Γ.Σοφιάδης¹ και Ι.Ε.Σαρρής²

¹ Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, sofiadisg@gmail.com

² Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, sarris@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της τυρβώδους μικροπολικής ροής σε κανάλι, μέσω άμεσων προσομοιώσεων (DNS), και η σύγκριση αποτελεσμάτων με προηγούμενα υπολογιστικά δεδομένα τυρβώδους ροής Νευτονικών και μη Νευτονικών ρευστών. Μελετήθηκε η συνήθης περίπτωση ροής σε Reynolds 4400 με βάση τη μέση ταχύτητα και το ύψος του καναλιού. Η μέθοδος που στηρίχθηκε στη βιβλιοθήκη OpenFoam έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα για την τυρβώδη υδροδυναμική περίπτωση σε κανάλι, σε σύγκριση με τη βιβλιογραφία και την στρωτή ροή σε μικροπολικό κανάλι. Ενδεικτικά αποτελέσματα των τυρβωδών ποσοτήτων τόσο για την ταχύτητα όσο και για τις μικροπολικές ιδιότητες της ροής παρουσιάζονται και συγκρίνονται. Διάφορα ρευστά, όπως για παράδειγμα το αίμα, κρατάνε τη μικροπολική συμπεριφορά σε μικρούς αλλά τυρβώδης αριθμούς.

Λέξεις Κλειδιά:

Μικροπολική ροή, τυρβώδες κανάλι, βισκοελαστικά ρευστά, DNS, OpenFoam

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μικροπολική θεωρία αναπτύχθηκε με σκοπό την μαθηματική και φυσική περιγραφή της συμπεριφοράς μη Νευτωνικών ρευστών με μικροδομές. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων ρευστών είναι το αίμα ζώων, τα πολυμερή καθώς και τα ρευστά τα οποία απαρτίζονται από διπολικά στοιχεία. Η πρώτη περιγραφή της ροής με μαθηματικές εξισώσεις τέτοιου είδους ρευστών ανήκει στον Enrígen (1965). Οι εξισώσεις αυτές βασίστηκαν στις αρχικές Navier-Stokes, αλλά με την προσθήκη της μικρο-περιστροφής και της μικρο-αδράνειας των σωματιδίων του ρευστού. Μια ακριβής ανάλυση τυρβώδους συμπεριφοράς τέτοιων ρευστών,

όπου οι κλασσικές εξισώσεις Navier-Stokes δεν μπορούν να ληφθούν υπ' όψη, δεν υπάρχει ακόμα στη βιβλιογραφία κατά την γνώση των συγγραφέων. Μια σειρά από μελέτες γύρω από τις βασικές ιδιότητες της μικροπολικής ροής έχει γίνει τα τελευταία χρόνια. Οι περισσότερες μελέτες, εξετάζουν τη μικροπολική ροή σε βασικά προβλήματα Couette και Poiseuille (Ashmawy 2012, Ariman & Cakmak 1968, Liu 1970).

Σε αρκετές περιπτώσεις η ελαστικο-πλαστική ροή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και ως μικροπολική. Στην έρευνα τους οι Dallas και Vassilicos (2010), διερεύνησαν τυρβώδη φαινόμενα σε τέτοιου είδους ροές. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μπορούν να εφαρμοσθούν μερικώς και στην μικροπολική περίπτωση. Παρόλα αυτά για πιο ακριβή αποτελέσματα οι εξισώσεις του Enrígen πρέπει να χρησιμοποιηθούν.

Στην παρούσα μελέτη, μελετάτε η τυρβώδης μικροπολική ροή σε κανάλι με την άμεση μέθοδο προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation (DNS)). Οι μικροπολικές εξισώσεις εξήχθησαν από την αρχή και αδιαστατοποιήθηκαν, μια διαδικασία μέσω της οποίας προέκυψαν 4 διαφορετικοί αδιάστατοι αριθμοί συμπεριλαμβανομένου και του αριθμού Re. Μια παραμετρική μελέτη πραγματοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας αυτούς τους αδιάστατους αριθμούς με στόχο τη κατανόηση του βασικού μηχανισμού της ροής. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και με εκείνα των Dallas και Vassilicos. Η σύγκριση αυτή έδειξε παρόμοια χαρακτηριστικά στον σχηματισμό τύρβης ανάμεσα στην ελαστικο-πλαστική ροή και την μικροπολική.

Η μέθοδος της απευθείας επίλυσης, μπορεί να έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος, αλλά μπορεί να παρουσιάσει μια ακριβέστερη εικόνα για τα φυσικά φαινόμενα μιας ροής και τους βασικούς μηχανισμούς της. Σε αυτή την αρχική προσπάθεια που έγινε να μελετηθεί μικροπολική ροή με DNS χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν τα οποία μπορούν να ωφελήσουν επόμενες μελέτες στο πεδίο αυτό.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Οι μικροπολικές εξισώσεις έχουν βασιστεί στις Navier-Stokes, με την επιπλέον προσθήκη της μικροπεριστροφής και μικροαδράνειας των σωματιδίων του ρευστού (Eringen 1965). Οι εξισώσεις ορμής και μικροπεριστροφής για την συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla P + (\mu + \kappa) \nabla^2 \mathbf{u} + \kappa \nabla \text{rot} \boldsymbol{\omega} \quad (2)$$

$$\rho j \frac{D \boldsymbol{\omega}}{Dt} = \gamma \nabla^2 \boldsymbol{\omega} + \kappa \nabla \text{rot} \mathbf{u} - 2\kappa \boldsymbol{\omega} \quad (3)$$

όπου t ο χρόνος, P η πίεση, \mathbf{u} η ταχύτητα του ρευστού, $\boldsymbol{\omega}$ η περιστροφική ταχύτητα, μ το μοριακό ιξώδες, κ το περιστροφικό ιξώδες, γ παράμετρος του υλικού και j η μικρο-αδράνεια και ρ η πυκνότητα.

Η αδιάστατη μορφή των εξισώσεων που επιλύθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω:

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

$$\frac{du}{dt} = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 u + \frac{m}{Re} \nabla \text{rot} \omega \quad (5)$$

$$\frac{JN}{m} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega + \frac{N}{Re} \text{rot} u - 2 \frac{N}{Re} \omega \quad (6)$$

όπου οι αδιάστατοι αριθμοί είναι:

$$Re = \frac{\rho U_0 \delta}{\mu + \kappa}, \quad N = \frac{\kappa \delta^2}{\gamma}, \quad m = \frac{\kappa}{\mu + \kappa}, \quad J = \frac{j}{\delta^2} \quad (7)$$

Από τη στιγμή που η μέθοδος DNS επιλέχθηκε για την λύση των εξισώσεων, δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθεί κάποιο επιπλέον μοντέλο τύρβης. Σε κάθε επανάληψη οι εξισώσεις (4)-(6) λύνονται απευθείας για μια σταθερή γνωστή μέση ταχύτητα ενώ η πτώση πίεσης υπολογίζεται κάθε φορά.

3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, μια διαδεδομένη περίπτωση της τυρβώδους ροής σε κανάλι αφορά αριθμό $Re_\tau = 180$ με βάση την ταχύτητα τριβής και το ύψος του καναλιού (Kim et al. 1987). Η περίπτωση αυτή έχει ερευνηθεί αρκετά στη βιβλιογραφία, κυρίως με χρήση των κλασικών εξισώσεων Navier-Stokes για ασυμπίεστη ροή, ενώ τα στατιστικά αποτελέσματα αυτών των ερευνών είναι διαθέσιμα για σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων. Έτσι επιλέχθηκε $Re_\tau=180$ για την παρούσα υπολογιστική έρευνα.

Ως συνήθως για το κανάλι το μέγεθος του υπολογιστικού πεδίου βασίστηκε στον αριθμό Re και στο γεγονός ότι θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί η τύρβη. Σύμφωνα με προηγούμενα υπολογιστικά πειράματα (Moser et al. 1999), οι διαστάσεις $3\pi\delta \times \delta \times \pi\delta$ στις x, y, z διευθύνσεις αντίστοιχα είναι αρκετό όπου $\delta = 2$. Επιπλέον ικανοποιητικές διαστάσεις πλέγματος για το υπολογιστικό πεδίο αυτό είναι $128 \times 132 \times 128$ κελιά στις αντίστοιχες διευθύνσεις. Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του πλέγματος η τεχνική των πολλαπλών block επιλέχθηκε, καθώς είναι καταλληλότερη για την πύκνωση του πλέγματος. Το πλέγμα πυκνώθηκε κατάλληλα στην διεύθυνση κάθετα στους τοίχους του καναλιού, ενώ στις άλλες δύο διευθύνσεις διατηρήθηκε ομοιόμορφο. Οι συντελεστές πύκνωσης του πλέγματος βασίστηκαν στην ταχύτητα u_τ , και είναι οι εξής: $\Delta x^+ \approx 12.6, \Delta z^+ \approx 5.6, \Delta y_{min}^+ \approx 0.6, \Delta y_{max}^+ \approx 4.6$, για την υδροδυναμική περίπτωση, ενώ για τις μικροπολικές περιπτώσεις φαίνονται στον Πίνακα 1. Το πρώτο στοιχείο από το πλαϊνό τοίχωμα είναι τοποθετημένο σε απόσταση $y^+ = 0.003$. Ένας σταθερός αριθμός $CFL = 1$ διατηρήθηκε σε όλη τη διάρκεια των υπολογιστικών πειραμάτων, ο οποίος αντιστοιχεί σε χρονικό βήμα $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u_\infty} \leq 0.07$. Σύμφωνα με τους Choi και Moin (1994), για να διασφαλιστεί η ακριβής πρόβλεψη των στατιστικών της τύρβης σε μια ροή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη $\Delta t^+ = \Delta t u_\tau^2 / \nu \leq 4$. Επομένως το χρονικό βήμα για τα παρόντα υπολογιστικά

πείραματα επιλέχθηκε να είναι $\Delta t = 0.02$ έτσι ώστε να πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις.

| Re_{bulk} | Re_{τ} | Δx^+ | $\Delta y_{min}^+ - \Delta y_{max}^+$ | Δz_{max}^+ |
|-------------|-------------|--------------|---------------------------------------|--------------------|
| 4400 | 180 | 12.6 | 0.6 – 4.6 | 5.6 |

Πίνακας 1: Παράμετροι πλέγματος σε κάθε διεύθυνση

Ο ρυθμός ροής της μάζας διατηρήθηκε σταθερός στη διάρκεια των πειραμάτων θέτοντας μία σταθερή μέση τιμή ταχύτητας $U_m = 1$ και κλίση πίεσης που μεταβάλλεται ανάλογα. Με αυτό τον τρόπο ο αριθμός Re μπορούσε να ρυθμιστεί μόνο μέσω του ιξώδους:

$$Re_{bulk} = \frac{U_m 2\delta}{\nu} \quad (8)$$

Για ιξώδες $\nu = 3 \cdot 10^{-4}$ ο μέσος αριθμός Reynolds προκύπτει ίσος με $Re_{bulk}=4400$ που αντιστοιχεί σε $Re_{\tau} \approx 180$ με βάση την ταχύτητα τριβής $u_{\tau}=0.066$ και το ύψος του καναλιού 2δ .

Τέλος, περιοδικές συνοριακές συνθήκες επιλέχθηκαν για τα όρια του πεδίου στην διεύθυνση της ροής x , και στην κάθετη διεύθυνση z , ενώ συνθήκες μη ολίσθησης τέθηκαν στους τοίχους. Τα υπολογιστικά πειράματα χωρίστηκαν σε δύο περιόδους, αρχικά οι εξισώσεις επιλύθηκαν έως ότου αναπτυχθεί η ροή και έπειτα έγινε η συλλογή των στατιστικών τύρβης. Η διάρκεια κάθε περιόδου ήταν περισσότερο από 3 κύκλους ροής (eddy turn-over times) (Lee & Choi 2001). Στο τέλος των προσομοιώσεων συλλέγονται τα στατιστικά διαφόρων ποσοτήτων της ταχύτητας και της μικροπεριστροφής που ένα μέρος των οποίων αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

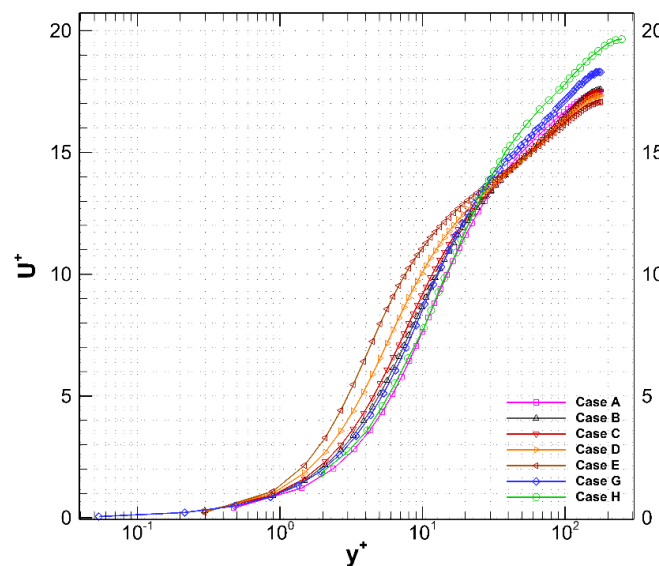
Εκτός από την βασική ροή νευτωνικού ρευστού, οι μικροπολικές παράμετροι έλαβαν κατάλληλες τιμές ώστε να προσομοιάζουν πραγματικό ρευστό όπως το αίμα. Επίσης ιδιότητες γενικευμένων μικροπολικών ρευστών λήφθηκαν υπ' όψη. Δύο διαφορετικά ποσοστά αιματοκρίτη χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα. Μια από τις βασικές παραμέτρους στις οποίες δόθηκαν διάφορες τιμές είναι το ιξώδες. Η αδιάστατη παράμετρος m , αναπαριστά ουσιαστικά το ποσοστό μικροπολικού ιξώδες προς το ολικό ιξώδες του ρευστού. Από φυσικής άποψης, αυτό σημαίνει πως όσο πιο κοντά στο 0 είναι το ποσοστό αυτό, το ρευστό πλησιάζει τη Νευτωνική συμπεριφορά, ενώ αντίθετα, όσο πιο κοντά βρίσκεται στο 1, την μικροπολική. Για την παραμετρική μελέτη, διάφορες τιμές του m συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από αντίστοιχες Νευτωνικές ροές (Kim et al. 1987) και ροές πολυμερών (Dallas & Vassilicos 2010). Για την αποφυγή σύγχυσης του αναγνώστη, σε όλη την υπόλοιπη παράγραφο των αποτελεσμάτων και της ανάλυσης τα ονόματα των διαφορετικών περιπτώσεων θα εμφανίζονται όπως στον Πίνακα 2.

| Περίπτωση | Τύπος ρευστού | m | N | J | Τύπος ροής |
|-----------|-----------------------|------|-------------------|--------------------|---|
| A | Γενικό μικροπολικό | 0.3 | 1 | 0.12 | Μικροπολική |
| B | Αίμα (Τύπου 1) | 0.3 | 8.3×10^4 | 1×10^{-5} | Μικροπολική |
| C | Αίμα (Τύπου 2) | 0.45 | 8.3×10^4 | 1×10^{-5} | Μικροπολική |
| D | Αίμα (Τύπου 3) | 0.9 | 8.3×10^4 | 1×10^{-5} | Μικροπολική |
| E | Αίμα (Τύπου 4) | 1.36 | 8.3×10^4 | 1×10^{-5} | Μικροπολική |
| G | Γενικό Νευτώνικό | - | - | - | Νευτώνική (Kim et al. 1987) |
| H | Γενικό πολυμερές | - | - | - | Ελαστο- πλαστική (Dallas & Vassilicos 2010) |

Πίνακας 2: Ορισμός Περιπτώσεων

Οι παράμετροι της γενικευμένης μικροπολικής περίπτωσης (A), επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αναπαριστούν ένα τυχαίο μικροπολικό ρευστό. Ενώ αντίθετα, για πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, επιλέχθηκε αίμα διαφόρων τύπων με περιεκτικότητα 40% ερυθρά αιμοσφαίρια, πάνω στο οποίο έχουν βασιστεί και προηγούμενες μικροπολικές μελέτες (Hogan & Henriksen 1989).

4.1 Στατιστικά μέσης ταχύτητας και διαταραχών



Σχήμα 1 Μέση ταχύτητα κανονικοποιημένη με την ταχύτητα διάτμησης

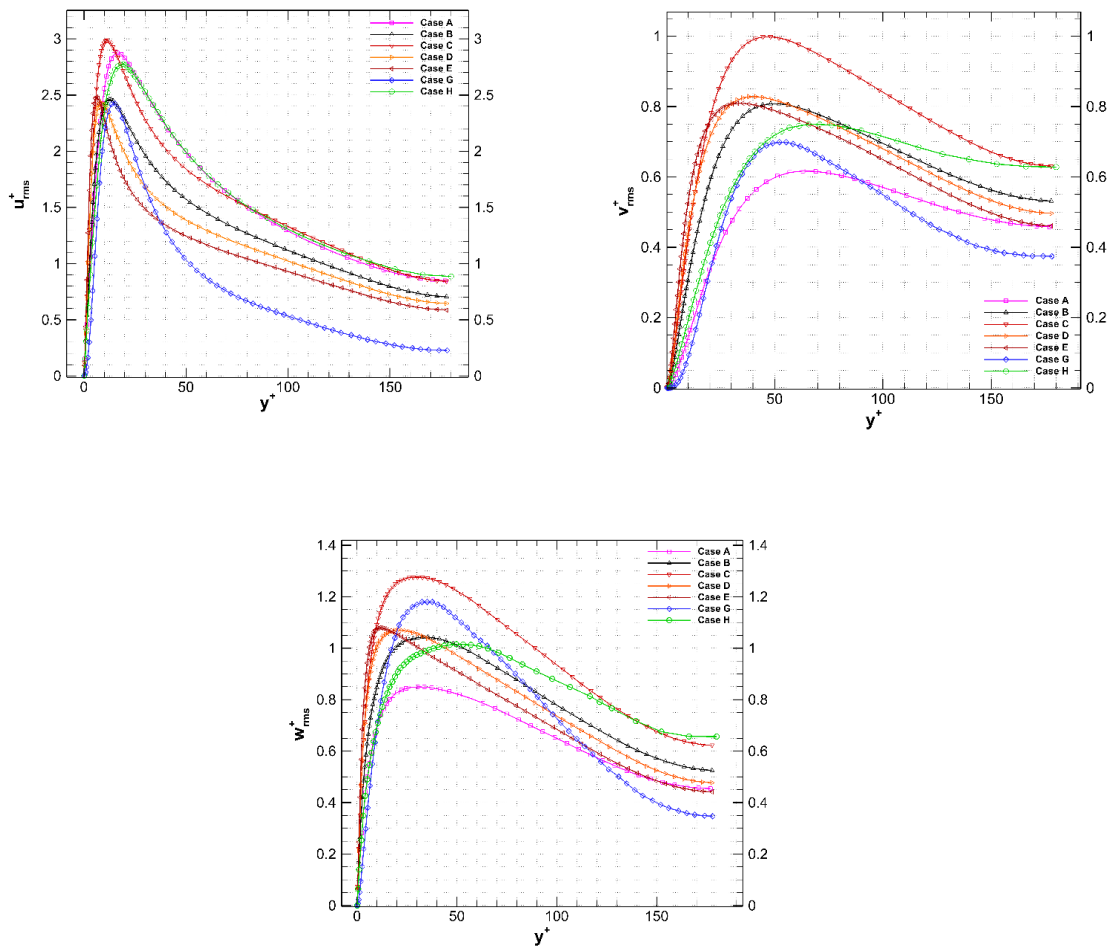
Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων γίνεται κυρίως μέσω της ανάλυσης των στατιστικών τύρβης του πεδίου. Ένα από τα πρώτα πεδία που αναλύονται στην ενότητα αυτή είναι εκείνο της ταχύτητας. Πιο συγκεκριμένα η κανονικοποιημένη ταχύτητα u^+ ως προς u_τ .

Στο Σχήμα 1, φαίνεται η μεταβολή της ταχύτητας u^+ για τις 7 περιπτώσεις που μελετήθηκαν, όπου προκύπτει κάθε περίπτωση μικροπολικού ρευστού να ακολουθεί και διαφορετική τάση καθώς απομακρύνεται από τον τοίχο σε $y^+ \approx 0$ και προς το κέντρο του καναλιού για $y^+ \approx 180$. Πιο συγκεκριμένα, για $y^+ \leq 10$, η περίπτωση B φαίνεται να προσεγγίζει την Νευτωνική περίπτωση ενώ η A την ελαστο-πλαστική. Μια τέτοια συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη. Αρχικά στην περίπτωση B, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν και παραπάνω, όσο η τιμή της παραμέτρου m πλησιάζει στο 0 τόσο η περίπτωση προσεγγίζει τη Νευτωνική. Από την άλλη πλευρά όσο αφορά την περίπτωση A, στην οποία και πάλι η παράμετρος m έχει χαμηλή τιμή, μια εξήγηση για ποιο λόγο προσεγγίζει την ελαστο-πλαστική περίπτωση, είναι ότι οι μικροπολικές παράμετροι N, J διατηρούν υψηλές τιμές.

Οι μέσες τιμές του μέτρου των διαταραχών κανονικοποιήθηκαν επίσης με την ταχύτητα τριβής και παρουσιάζονται σε γραφήματα ως προς το y^+ (Σχήμα 2) Αναλύοντας τις διαταραχές αυτές στην διεύθυνση της ροής παρατηρείται πως οι κορυφές για κάθε περίπτωση είναι υψηλότερες από την Νευτωνική. Επιπλέον όσο προχωράει η ροή μακριά από τον τοίχο, υπάρχει μια μονότονη πτώση η οποία είναι πιθανό να οφείλεται στην διόγκωση της μικροπολικής ή ελαστικής ζώνης. Οι παρατηρήσεις αυτές συμπίπτουν με προηγούμενες οι οποίες αναφέρονται από τους Dallas και Vassilicos (2010).

Μια παρόμοια τάση παρατηρείται στις διαταραχές της ταχύτητας, στις δύο άλλες διευθύνσεις (v_{rms}^+, w_{rms}^+). Για μια ακόμη φορά οι κορυφές κινούνται μονότονα όσο μεγαλώνουν οι μικροπολικές επιδράσεις, παρόμοια με τη συμπεριφορά των πολυμερών και ελαστο-πλαστικών ρευστών, όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενα πειράματα (White & Mugnal 2008). Τέλος, οι διαταραχές της ταχύτητας σε κάθε διεύθυνση είναι συνεπής με την γενική τάση των προφίλ μέσης ταχύτητας.

Η βασική καινοτομία που εισάγει η παρούσα έρευνα είναι η μελέτη των μικροπολικών χαρακτηριστικών μιας τέτοιας ροής, με τη βοήθεια της μεθόδου απευθείας επίλυσης. Γι' αυτό το λόγο η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών πειραμάτων και η ανάλυσή τους, μπορεί να δώσει μια πρώτη εκτίμηση για την συμπεριφορά της ιδιαίτερης κατηγορίας των ρευστών αυτών.



Σχήμα 2: Κανονικοποιημένες μέσες τιμές των τετραγωνικών ριζών των συντελεστών ταχύτητας α) u_{rms}^+ β) v_{rms}^+ γ) w_{rms}^+

Μέσω της τρισδιάστατης αναπαράστασης, γίνεται αντιληπτό πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση δινών βρίσκεται κοντά στα τοιχώματα του καναλιού, όπως βρέθηκε αλλά δεν παρουσιάζεται εδώ λόγω χώρου, η μικροπολική ταχύτητα εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές της. Επιπλέον κάποιες πρώτες παρατηρήσεις γύρω από τη φυσική της ροής μπορούν να γίνουν μέσα από τις προαναφερθείσες εικόνες. Όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενες μελέτες για τη Νευτωνική ροή, σε χαμηλές ταχύτητες και αριθμούς Re_τ (180 στη συγκεκριμένη περίπτωση), οι δίνες της ταχύτητας ακολουθούν τη διεύθυνση της ροής και εμφανίζονται συνήθως με τη μορφή μικρών ράβδων (Li 2006). Οι παρατηρήσεις αυτές συμπίπτουν με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας σε ποιοτικό επίπεδο, δείχνοντας πως η έρευνα κινείται προς την σωστή κατεύθυνση.

Καθώς πρόκειται για μια καινοτόμος έρευνα στην τυρβώδη μικροπολική ροή, τα αποτελέσματα βρίσκονται ακόμα σε αρχικό στάδιο, αλλά και η σύγκριση μπορεί να γίνει μόνο με αποτελέσματα της Νευτωνικής ροής ή πολυμερούς, καθώς δεν υπάρχουν προηγούμενα αποτελέσματα αντίστοιχης ροής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα ερευνητική δραστηριότητα μελετήθηκε για πρώτη φορά η τυρβώδης μικροπολική ροή σε κανάλι με τη μέθοδο της απευθείας επίλυσης (DNS). Για την ανάλυση της ροής και την περιγραφή των μικροπολικών ρευστών χρησιμοποιήθηκαν οι πρότυπες εξισώσεις του Eringen οι οποίες αποτελούν τροποποίηση των Navier-Stokes. Μια πρώτη παραμετρική μελέτη εκτελέστηκε όπου δόθηκαν διάφορες τιμές στις μικροπολικές ιδιότητες των ρευστών και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα νευτωνικής και πολυμερούς ροής.

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τα υπολογιστικά πειράματα, βασίστηκε στη βιβλιοθήκη OpenFoam. Για να πιστοποιηθεί η σωστή λειτουργία του κώδικα εκτελέστηκαν προσομοιώσεις σε τυρβώδης Νευτωνική ροή τα οποία συγκρίθηκαν με προηγούμενα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και παρουσίασαν απόλυτη σύγκλιση. Στη συνέχεια έγιναν τα υπολογιστικά πειράματα για την τυρβώδης μικροπολική ροή σε $Re_{\tau}=180$. Η παραμετρική μελέτη των συγκεκριμένων ρευστών ήταν σχετικά σύντομη και αφορούσε τους αδιαστατοποιημένους μικροπολικούς αριθμούς των εξισώσεων βασικής ροής. Παρόλα αυτά ήδη από αυτή τη περιορισμένη παραμετρική μελέτη τα αποτελέσματα παρουσίασαν τεράστιο ενδιαφέρον στη σύγκρισή τους με αντίστοιχα Νευτωνικά και πολυμερή. Η σύγκριση έδειξε πως ανάλογα με τις τιμές που δόθηκαν στους μικροπολικούς αδιάστατους αριθμούς, τα ρευστά προσέγγιζαν τη Νευτωνική ροή ή εκείνη των πολυμερών. Επιπλέον στα γραφήματα των ταχυτήτων παρατηρείται η μονότονη πτώση των καμπυλών μακριά από τον τοίχο. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με τη φυσική των πολυμερών και μπορεί να αποδοθεί σε μια αντίστοιχη διόγκωση της μικροπολικής ζώνης στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Τέλος, η αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των μικροπολικών ιδιοτήτων έγινε μέσα από τρισδιάστατα γραφήματα. Με αυτόν τον τρόπο, μια πρώτη ποιοτική εικόνα είναι διαθέσιμη για ανάλυση. Στα γραφήματα αυτά δόθηκε έμφαση στο σχηματισμό δινών στο κανάλι λόγω της μικροπολικής ταχύτητας αλλά και στην κατανομή της. Το αποτέλεσμα ήταν σύμφωνο με αντίστοιχες μελέτες σε ίδιους αριθμούς Re για Νευτωνικές ροές. Για την καλύτερη κατανόηση βέβαια των φυσικών φαινομένων και τη ποσοτική και ποιοτική ανάλυση, περαιτέρω υπολογιστικά πειράματα είναι απαραίτητα. Η παραμετρική μελέτη θα πρέπει να συμπεριλάβει περισσότερες τιμές όσο αφορά τις μικροπολικές σταθερές αλλά και των αριθμό Re . Οι πρώτες ενδείξεις είναι ενθαρρυντικές τόσο για τον νέο κώδικα όσο και για την κατεύθυνση της ερευνητικής δραστηριότητας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ariman T. and Cakmak A.S, "Some basic viscous flows in micropolar fluids", Rheological Acta, Band 7, Heft 3 (1968).

Ashmawy E.A, "Unsteady Couette flow of a micropolar fluid with slip", Meccanica 47:85-94, (2012).

Choi H. and Moin P., "Effects of the computational time step on numerical solutions of turbulent flow", Journal of Computational Physics, 113, p.1-4 (1994).

Dallas V. and Vassilicos J.C, "Strong polymer-turbulence interactions in viscoelastic turbulent channel flow", Physical Review E 82, (2010).

Eringen A.C, "Theory of micropolar fluids", Technical Report No.27, Purdue University, Indiana, (1965).

Hogan H.A. and Henriksen M., "An evaluation of a micropolar model for blood flow through an idealized stenosis", J. Biomechanics Vol.22, No.3, pp. 211-218, (1989).

Kim J., Moin P. and Moser R., "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number", J. Fluid Mechanics Vol.177, pp. 133-166, (1987).

Lee D. and Choi H., "Magnetohydrodynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number", J. Fluid Mechanics Vol.439, pp. 367-394, (2001).

Li. C., Sureshkumar R. and Khomani B., "Influence of rheological parameters on polymer induced turbulent drag reduction", J. Non-Newtonian Fluid Mechanics Vol.140, pp. 23 -40, (2006).

Liu C.Y., "On turbulent flow of micropolar fluids", Int. J. Engng Sci. Vol.8, pp. 457-466, (1970).

Moser R.D., Kim J. and Mansour N.N., "Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_{\tau}=590$ ", Physics of Fluids Vol.11, Number 4, (1999).

White C.M. and Mungal G.M., "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives", Annu. Rev. Fluid Mechanics, 40:235-56, (2008).

TURBULENT MICROPOLAR CHANNEL FLOW

SUMMARY

In the present study turbulent micropolar channel flow is investigated through direct numerical simulations (DNS) and results are compared with previous ones from Newtonian and non Newtonian turbulent flows. The well-researched case of $Re_{bulk}=4400$ has been studied, where Re_{bulk} has been based on channel height and mean velocity. This case that has been based on OpenFoam library, provided satisfying results of turbulent hydrodynamic channel flow in comparison to previous studies and laminar micropolar channel flow. Representative results of turbulent fields, such as velocity and micropolar variables, are presented and compared. Various fluids, such as blood, sustain micropolar behavior in small but turbulent numbers.