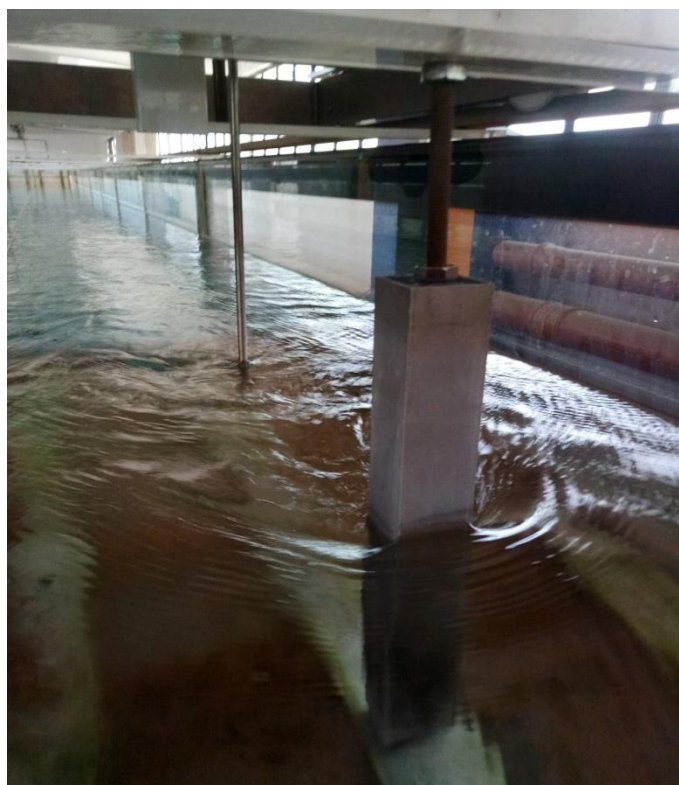




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ  
ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΗΝ  
ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ**



Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Νάρης

Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου

Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ  
ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΗΝ  
ΤΥΡΒΩΔΗ ΡΟΗ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ**

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

**Νικόλαος Νάρης**

nikosnaris1995@hotmail.com

Επιβλέπων : **Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου**

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

*Στους γονείς μου...*

## Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το τέλος των σπουδών μου ως Πολιτικός Μηχανικός στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Κλείνοντας ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια στην ζωή μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Παπανικολάου για την ανάθεση της εργασίας και για τη βοήθεια στη διεκπεραίωσή της. Οι επιστημονικές του γνώσεις και η εμπειρία του στάθηκαν πολύτιμα εργαλεία για την κατανόηση και την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας καθώς επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω και για την άψογη συνεννόηση και συνεργασία μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή κ. Αριστοτέλη Μαυρομμάτη για το χρόνο που αφιέρωσε ώστε να με βοηθήσει στην κατανόηση του τεχνικού κομματιού του εργαστηρίου καθώς επίσης και για τις θεωρητικές του γνώσεις που μου προσέφερε.

Δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου. Χωρίς την συναισθηματική και την οικονομική τους στήριξη δε θα μπορούσα να τελειώσω τις σπουδές μου. Το κουράγιο και η δύναμη που μου δίνουν με βοηθούν να ξεπερνάω όλες τις δυσκολίες, να είμαι αισιόδοξος και να προχωράω ομαλά στη ζωή

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου και συμφοιτητές μου που μέσα από τις χαρές, τις λύπες, τις όμορφες και άσχημες στιγμές με βοήθησαν επίσης στη πορεία μου ως φοιτητής αλλά και να εξελιχθώ ως άνθρωπος.



## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.1.1 Προβλήματα στις υδατογέφυρες .....	1
1.1.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων .....	2
1.2 Αντικείμενο της εργασίας .....	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	3
2. Θεωρητική ανάλυση-Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	4
2.1 Γενικά.....	4
2.2. Ανοιχτοί αγωγοί .....	4
2.2.1 Κατηγορίες ροής στους ανοιχτούς αγωγούς.....	5
2.2.2 Προφίλ ταχυτήτων σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια.....	7
2.3 Τυρβώδη ροή.....	8
2.3.1 Θεωρητική περιγραφή της τύρβης.....	8
2.3.2 Μαθηματική περιγραφή της τύρβης .....	10
2.3.4. Τυρβώδεις τάσεις.....	15
2.4 Δύναμη αντίστασης και συντελεστής αντίστασης με την εξίσωση ορμής .....	16
2.4.1 Αποκόλληση της ροής .....	16
2.4.2 Εξίσωση ορμής σε βάθρο .....	17
3. Πειραματική διαδικασία.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.1.1 Περιγραφή της διάρρυγας για την προσομοίωση της ροής.....	21
3.1.2 Τροφοδοσία διάρρυγας .....	22
3.1.3 Μέτρηση της παροχής .....	24
3.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας .....	25
3.2.1 Όργανο μέτρησης ταχυτήτων ADV.....	25
3.2.2 Μεσόβαθρα και θέσεις μετρήσεις.....	27
4. Ανάλυση και Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	30
4.1 Κατανομές ταχυτήτων στην διεύθυνση $x$ .....	31
4.1.1 Κύλινδρος διαμέτρου $D=5\text{cm}$ .....	31
4.1.2 Ορθογώνιο πλάτους $D=4\text{cm}$ και $L=10\text{cm}$ ( $L/D=2.5$ ).....	36
4.1.3 Ορθογώνιο πλάτους $D=3\text{cm}$ και $L=10\text{cm}$ ( $L/D=2$ ).....	41
4.1.4 Τετράγωνο πλευράς $D=4\text{cm}$ .....	46
4.1.5. Ρόμβος διαγωνίου $D=5.66$ .....	51
4.2 Τυρβώδεις τάσεις .....	57

4.2.1 Κύλινδρος διαμέτρου $D=5\text{cm}$ .....	57
4.2.2 Ορθογώνιο πλάτους $D=4\text{cm}$ και $L=10\text{cm}$ ( $L/D=2.5$ ).....	67
4.2.3 Ορθογώνιο πλάτους $D=3\text{cm}$ και $L=6\text{cm}$ ( $L/D=2$ ).....	77
4.2.4 Τετράγωνο πλευράς $D=4\text{cm}$ .....	87
4.2.5 Ρόμβος διαγωνίου $D=5.66\text{cm}$ .....	97
4.3 Ένταση τύρβης.....	107
4.3.1 Κύλινδρος διαμέτρου $D=5\text{cm}$ .....	107
4.3.2 Ορθογώνιο πλάτους $D=4\text{cm}$ και $L=10\text{cm}$ ( $L/D=2.5$ ).....	112
4.3.4 Ορθογώνιο πλάτους $D=3\text{cm}$ και $L=6\text{cm}$ ( $L/D=2$ ).....	117
4.3.4 Τετράγωνο πλευράς $D=4\text{cm}$ .....	122
4.3.5 Ρόμβος διαγωνίου $D=5.66\text{cm}$ .....	127
4.4 Τυρβώδη κινητική ενέργεια (ΤΚΕ) - Συγκεντρωτικά ανά ύψος.....	133
4.4.1 Ύψος $4,5\text{cm}$ .....	133
4.4.2 Ύψος $9\text{cm}$ .....	135
4.4.3 Ύψος $13,5\text{cm}$ .....	137
4.4.4 Ύψος $17.1\text{cm}$ .....	139
4.5. Δύναμη και συντελεστής αντίστασης.....	142
5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	145
5.1 Συμπεράσματα.....	145
5.2 Παρατηρήσεις σχετικά με τα πειράματα.....	147
5.3 Προτάσεις για το μέλλον.....	148
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	149

## **Κατάλογος σχημάτων**

**Σχήμα 2.1** Τρισδιάστατη απεικόνιση διαστάσεων ανοιχτού αγωγού

**Σχήμα 2.2** Κατακόρυφη κατανομή ταχυτήτων σε ανοιχτό αγωγό

**Σχήμα 2.3** Κατακόρυφη κατάντη κατανομή ταχυτήτων κοντά(near wake) και μακριά(far wake) από το εμπόδιο (Πηγή: Subharish Dey, Debshri Swargiary 2018)

**Σχήμα 2.4** Απεικόνιση τυρβώδους ροής σε ανοιχτό αγωγό

**Σχήμα 2.5** Παράδειγμα δημιουργίας στροβιλισμών κατάντη εμποδίου στη ροή (Νησιά Cape Verde) (Πηγή: Παπανικολάου 2016)

**Σχήμα 2.6** Διακύμανση της τιμής της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου (Πηγή Παπανικολάου 2016)

**Σχήμα 2.7** Μεταφορά μάζας μεταξύ των στρώσεων του υγρού σε δισδιάστατη ροή(Πηγή Παπανικολάου 2016)

**Σχήμα 2.8** Ζώνες αποκόλλησης σε συστολή, διαστολή της διατομής και μετά από εμπόδιο (Πηγή: Α. Νάνου, Σημειώσεις Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων: Υδραυλική κλειστών αγωγών υπό πίεση)

**Σχήμα 2.9** Δυνάμεις που ασκούνται σε βάθρο

**Σχήμα 2.10** Παράδειγμα εγκάρσιας κατανομή ταχυτήτων ανάντη και κατάντη εμποδίου

**Σχήμα 3.1** Διώρυγα και δεξαμενή

**Σχήμα 3.2** (α) Αντλία εργαστηρίου (β) Δικλείδα ασφαλείας για σωλήνα Φ35 (γ) Δικλείδα ασφαλείας για σωλήνα Φ50

**Σχήμα 3.3** Παροχή Venturi (πάνω) και μανόμετρου εργαστηρίου (κάτω)

**Σχήμα 3.4** Τρόπος λειτουργίας του οργάνου ADV

**Σχήμα 3.5** Απεικόνιση του οργάνου

**Σχήμα 3.6** Παράδειγμα μέτρησης σε σημείο με μεγάλη αναταραχή (πάνω) και με μικρή αναταραχή (κάτω)

**Σχήμα 3.7** Παραδείγματα βάθρων που χρησιμοποιήθηκαν

**Σχήμα 3.8** Θέση βάθρου και μετρήσεων στη διώρυγα

**Σχήμα 3.9** Καθ' ύψος μετρήσεις σε κάθε θέση του βάθρου

**Σχήμα 4.1** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής

**Σχήμα 4.2** Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής

**Σχήμα 4.3** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε ύψος 4,5cm σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής.

**Σχήμα 4.4** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.5** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.6** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.7** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13,5cm

**Σχήμα 4.8** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.9** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.10** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.11** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10

**Σχήμα 4.12** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10

**Σχήμα 4.13** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.14** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.15** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.16** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.17** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=7.5) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13,5cm

**Σχήμα 4.18** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.19** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=7.5) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.20** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.21** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-10) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6

**Σχήμα 4.22** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm (x/D=10) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6

**Σχήμα 4.23** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-10) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.24** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm (x/D=10) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.25** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-10) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.26** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm (x/D=10) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.27** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας (ux) σε απόσταση 30cm (x/D=-10) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.28** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm (x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.29** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-10) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.30** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm (x/D=10) κατόντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.31** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-7,5) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4

**Σχήμα 4.32** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2,5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7,5) κατόντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.33** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-7,5) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.34** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατόντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.35** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-7,5) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.36** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατόντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.37** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-7,5) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.38** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατόντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.39** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-7,5) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.40** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm (x/D=7.5) κατόντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.41** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-5.3) ανάντη ρομβοειδής διαγωνίου 5,66cm

**Σχήμα 4.42** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3) κατόντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66

**Σχήμα 4.43** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=-5.3) ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.44** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.45** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=5.3) ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.46** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.47** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=5.3) ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 13,5cm

**Σχήμα 4.48** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.49** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm (x/D=5.3) ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.50** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.51** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 30cm (x/D=6)

**Σχήμα 4.52** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε

**Σχήμα 4.53** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.54** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.55** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.56** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.57** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13,5cm

**Σχήμα 4.58** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.59** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.60** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.61** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 30cm (x/D=6)

**Σχήμα 4.62** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής

**Σχήμα 4.63** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.64** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.65** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.66** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.67** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.68** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.69** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.70** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.71** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 30cm (x/D=7,5)



**Σχήμα 4.72** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής 4X10 διατομής διατομής

**Σχήμα 4.73** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.74** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.75** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.76** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.77** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.78** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.79** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.80** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.81** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )

**Σχήμα 4.82** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής 4X10

**Σχήμα 4.83** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.84** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7,5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.85** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.86** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7,5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.87** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13,5cm

**Σχήμα 4.88** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7,5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.89** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.90** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7,5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.91** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ )

**Σχήμα 4.92** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3,33$ ), 20 ( $x/D=6,66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6

**Σχήμα 4.93** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.94** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.95** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.96** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.97** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.98** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.99** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.100** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.101** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )

**Σχήμα 4.102** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6

**Σχήμα 4.103** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.104** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.105** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.106** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.107** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.108** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.109** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.110** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.111** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 30cm ( $x/D=10$ )

**Σχήμα 4.112** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4

**Σχήμα 4.113** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.114** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.115** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.116** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.117** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.118** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.119** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.120** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.121** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4

**Σχήμα 4.122** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4

**Σχήμα 4.123** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

**Σχήμα 4.124** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.125** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.126** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.127** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.128** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.129** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.130** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.131** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου 5,66

**Σχήμα 4.132** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=1,76), 20 (x/D=3,53) και 30cm(x/D=5,3) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου 5,66

**Σχήμα 4.133** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66cm σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.134** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm(x/D=5.3) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66 σε ύψος 4.5cm

**Σχήμα 4.135** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66cm σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.136** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm(x/D=5.3) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66 σε ύψος 9cm

**Σχήμα 4.137** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66cm σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.138** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm(x/D=5.3) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66 σε ύψος 13.5cm

**Σχήμα 4.139** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66cm σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.140** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=1.76), 20 (x/D=3.53) και 30cm(x/D=5.3) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου D=5.66 σε ύψος 17.1cm

**Σχήμα 4.141** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε απόσταση  $30\text{cm}(x/D=5.3)$

**Σχήμα 4.142** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδούς διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$

**Σχήμα 4.143** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.144** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.145** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.146** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.147** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.148** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.149** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.150** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.151** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $30\text{cm}(x/D=7.5)$

**Σχήμα 4.152** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=2)$ ,  $20(x/D=4)$  και  $30\text{cm}(x/D=6)$

**Σχήμα 4.153** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.154** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=2)$ ,  $20(x/D=4)$  και  $30\text{cm}(x/D=6)$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.155** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.156** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=2)$ ,  $20(x/D=4)$  και  $30\text{cm}(x/D=6)$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.157** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $13,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.158** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=2)$ ,  $20(x/D=4)$  και  $30\text{cm}(x/D=6)$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.159** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.160** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=2)$ ,  $20(x/D=4)$  και  $30\text{cm}(x/D=6)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.161** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$

**Σχήμα 4.162** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$

**Σχήμα 4.163** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.164** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.165** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.166** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.167** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.168** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.169** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.170** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής  $4X10$  σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.171** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής  $3X6$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$

**Σχήμα 4.172** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$

**Σχήμα 4.173** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.174** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής σε απόσταση  $10(x/D=3.33)$ ,  $20(x/D=6.66)$  και  $30\text{cm}(x/D=10)$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.175** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.176** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $10(x/D=3.33)$ ,  $20(x/D=6.66)$  και  $30\text{cm}(x/D=10)$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.177** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.178** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $10(x/D=3.33)$ ,  $20(x/D=6.66)$  και  $30\text{cm}(x/D=10)$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.179** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.180** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής σε απόσταση 3X6  $10(x/D=3.33)$ ,  $20(x/D=6.66)$  και  $30\text{cm}(x/D=10)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.181** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $-30\text{cm}$

**Σχήμα 4.182** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$

**Σχήμα 4.183** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.184** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.185** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.186** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.187** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$



**Σχήμα 4.188** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.189** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $-30\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.190** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση  $10(x/D=2.5)$ ,  $20(x/D=5)$  και  $30\text{cm}(x/D=7.5)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.191** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $-30\text{cm}$

**Σχήμα 4.192** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$

**Σχήμα 4.1953** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$

**Σχήμα 4.194** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$

**Σχήμα 4.195** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.196** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  σε ύψος  $9\text{cm}$

**Σχήμα 4.197** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.198** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

**Σχήμα 4.199** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.200** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

**Σχήμα 4.201** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος  $4,5\text{cm}$  και σε απόσταση  $30\text{cm}$  ανάντη

**Σχήμα 4.202** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

**Σχήμα 4.203** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 20cm κατάντη

**Σχήμα 4.204** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 30cm κατάντη

**Σχήμα 4.205** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 30cm ανάντη

**Σχήμα 4.206** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

**Σχήμα 4.207** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 20cm κατάντη

**Σχήμα 4.208** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 30cm κατάντη

**Σχήμα 4.209** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 30cm ανάντη

**Σχήμα 4.210** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

**Σχήμα 4.211** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 20cm κατάντη

**Σχήμα 4.212** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 30cm κατάντη

**Σχήμα 4.213** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 30cm ανάντη

**Σχήμα 4.214** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

**Σχήμα 4.215** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 20cm κατάντη

**Σχήμα 4.216** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 30cm κατάντη

## **Κατάλογος πινάκων**

**Πίνακας 1** Συντελεστές σχημάτων κατά White

**Πίνακας 2** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης κυλίνδρου διαμέτρου  $D=5\text{cm}$  ανά απόσταση

**Πίνακας 3** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ορθογωνίου πλάτους  $D=4\text{cm}$  και μήκους  $L=10\text{cm}$  ανά απόσταση

**Πίνακας 4** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ορθογωνίου πλάτους  $D=3\text{cm}$  και μήκους  $L=6\text{cm}$  ανά απόσταση

**Πίνακας 5** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης τετραγώνου πλευράς  $D=3\text{cm}$  ανά απόσταση

**Πίνακας 6** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ρόμβου διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  ανά απόσταση

## Πίνακας συμβόλων

A	Εμβαδόν υγρής διατομής
$A_{\mu}$	Προβολή εμβαδού μεσόβαθρου σε επίπεδο κάθετο στη ροή
B	Πλάτος μεσόβαθρου (Charbeneau & Holley, 2001)
$B_p$	Πλάτος παρεμπόδισης της ροής
$C_D$	Συντελεστής αντίστασης
D	Πλάτος των εκάστοτε μεσόβαθρων που συναντά η ροή στον άξονα y
$F_D$	Δύναμη αντίστασης
$F_{p1}$	Δύναμη λόγω πίεσης στα ανάντη
$F_{p3}$	Δύναμη λόγω πίεσης στα κατόντη
$F_{t1}$	Δύναμη λόγω διατμητικών τάσεων στα ανάντη
$F_{t3}$	Δύναμη λόγω διατμητικών τάσεων στα κατόντη
Fr	Αριθμός Froude
g	επιτάχυνση βαρύτητας
h	ύψος ελεύθερης επιφάνειας
H	ομοιόμορφο βάθος
i	ένταση τύρβης
$I_t$	ένταση τύρβης (Charbeneau & Holley, 2001)

$k_p$	τραχύτητα μεσόβαθρων
$L$	Μήκος μεσόβαθρων
$p$	στιγμιαία πίεση
$\bar{p}$	μέση πίεση
$p'$	διακύμανση της πίεσης
$Q$	Παροχή
$Re$	Αριθμός Reynolds
$T$	χρονική περίοδος
$TKE$	τυρβώδη κινητική ενέργεια
$U_{max}$	μέγιστη ταχύτητα στο εκάστοτε εξεταζόμενο ύψος στα ανάντη
$u$	στιγμιαία ταχύτητα στον άξονα x
$\bar{u}$	μέση ταχύτητα στον άξονα x
$u'$	διακύμανση της ταχύτητας στον άξονα x
$v$	στιγμιαία ταχύτητα στον άξονα y
$\bar{v}$	μέση ταχύτητα στον άξονα y
$v'$	διακύμανση της ταχύτητας στον άξονα y
$w$	στιγμιαία ταχύτητα στον άξονα z
$\bar{w}$	μέση ταχύτητα στον άξονα z
$w'$	διακύμανση της ταχύτητας στον άξονα z
$y_1$	ύψος ροής στα ανάντη
$y_3$	ύψος ροής στα κατόντη
$\overline{-u'v'}, \overline{-u'w'}, \overline{-v'w'}$	τυρβώδεις τάσεις Reynolds
$u_{std}, v_{std}, w_{std}$	τυπική απόκλιση ταχυτήτων u,v,w
$x$	διεύθυνση της ροής
$y$	εγκάρσια διεύθυνση
$z$	κάθετη διεύθυνση
$\beta$	συντελεστής συνόρθωσης
$\gamma$	ειδικό βάρος

$\mu$	ιξώδες νερού
$\nu$	κινηματική συνεκτικότητα
$\rho$	πυκνότητα νερού
$\tau_{xy}$	διατμητική τάση
$\sigma_{y,t}$	ορθή τάση

## Περίληψη

Στις μέρες μας ,με την πρόοδο της τεχνολογίας και της μηχανικής, δίνεται η δυνατότητα να συνδεθούν όλο και περισσότερες χερσαίες και υδάτινες επιφάνειες μέσω γεφυρών ανά τον κόσμο. Λόγω της ύπαρξης βάθρων γεφυρών μέσα σε υδάτινα στοιχεία, ιδίως σε υδατορεύματα, είναι δυνατό να προκληθούν μια σειρά από προβλήματα κυρίως λόγω της αλλαγής των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής. Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται πέντε διαφορετικές διατομές μεσόβαθρων διαφορετικού σχήματος και λήφθηκαν οι μετρήσεις της ταχύτητας ροής κατά μήκος σε τέσσερα συγκεκριμένα βάθη και σε τέσσερις συγκεκριμένες θέσεις, μία ανάντη και τρεις κατάντη του μεσόβαθρου. Οι μετρήσεις έγιναν με το όργανο ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) σε συνθήκες υποκρίσιμης και μόνιμης ροής χρησιμοποιώντας μια σταθερή παροχή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Μελετήθηκε η κατανομή των ταχυτήτων, η ένταση της τύρβης και οι τυρβώδεις τάσεις κυρίως κατάντη των μεσόβαθρων καθώς εκεί προκύπτουν κυρίως τα προβλήματα δημιουργεί η αλλαγή αυτών των χαρακτηριστικών. Επίσης μελετήθηκαν οι δυνάμεις και οι συντελεστές αντίστασης. Όλα τα διαγράμματα είναι σε αδιαστατοποιημένη μορφή για την εύκολη εξαγωγή και σύγκριση αποτελεσμάτων. Με την παράθεση αυτών των διαγραμμάτων γίνεται η προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για το πως τα διαφορετικά σχήματα εμποδίζουν παρακωλύουν τη ροή και τα χαρακτηριστικά της.

## Abstact

Nowadays, with the advancement of technology and engineering, it is possible to connect more and more land and water surfaces through bridges around the world. Due to the existence of bridge piers in water elements, especially in watercourses, it is possible that a number of problems can be caused mainly due to the change of the hydrodynamic characteristics of the flow. In the present work, five different cross-sections of intermediate shapes of different shapes are simulated and the measurements of the flow velocity were taken at four specific depths and at four specific positions, one upstream and three downstream, of the intermediate platform. The measurements were made with the ADV instrument (Acoustic Doppler Velocimeter) under hypocritical and constant flow conditions using a constant flow throughout the experiment. The distribution of the velocities, the intensity of the turbulence and the turbulent tendencies mainly downstream of the intermediate stages were studied as there arise any problems created by the change of these characteristics. The forces and coefficients of resistance were also studied. All diagrams are in dimensionless format for easy extraction and comparison of results. By presenting these diagrams, an attempt is made to draw conclusions about how the different barrier shapes hinder the flow and its characteristic

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι προσπαθούσαν να συνδέσουν διάφορες περιοχές που χωρίζονταν μεταξύ τους, είτε από χερσαίες ανωμαλίες της επιφάνειας, είτε από υδάτινα εμπόδια όπως ποτάμια. Η σημασία της σύνδεσης τους τόσο για οικονομικούς όσο και για πολιτικοκοινωνικούς λόγους είχε φανεί από τότε καθώς η προσφορά τους στην μεταφορά εμπορευμάτων και ανθρώπων είναι τεράστια.

Στην σύγχρονη εποχή, όπου η επικοινωνία και η μεταφορά εμπορευμάτων και ανθρώπων γίνεται όλο και πιο σημαντική, γέφυρες για πεζούς, επιβατικά και εμπορικά οχήματα, τρένα συναντώνται σε όλο τον κόσμο. Με την πρόοδο της επιστήμης και της τεχνολογίας γίνεται εφικτό να κατασκευαστούν γέφυρες με εκπληκτικό αντισεισμικό, υδροδυναμικό και αεροδυναμικό σχεδιασμό οι οποίες μάλιστα πολλές φορές ξεπερνούν τις συνήθεις προσδοκίες και καταφέρνουν να συνδέουν περιοχές, οι οποίες χωρίζονται από ένα εμπόδιο όπως η θάλασσα, που απέχουν έως και δεκάδες χιλιόμετρα μεταξύ τους.

Τα στοιχεία που συνθέτουν τις γέφυρες είναι κυρίως το κατάστρωμα, τα βάθρα και ο φορέας. Είναι σημαντικό τα επιμέρους στοιχεία να σχεδιάζονται για να αντέχουν συνεχείς και εναλλασσόμενες καταπονήσεις (για παράδειγμα ο άνεμος ,τα κύματα, η αλλαγή στην παροχή ενός υδατορεύματος). Γίνεται εμφανές ότι υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ του βάθρου και του στοιχείου που εμποδίζει την ροή του όπως στα υδατορεύματα όπου μπορεί να υπάρξει μεγάλη αλλαγή των χαρακτηριστικών της ροής και της διατομής του ανοιχτού αγωγού ανά τα χρόνια για διάφορους λόγους

### 1.1.1 Προβλήματα στις υδατογέφυρες

Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας και της μηχανικής, συνεχίζονται να εμφανίζονται προβλήματα στις γέφυρες με δυστυχώς αρκετές φορές να επέρχονται καταστροφικές συνέπειες όπως η κατάρρευση κάποιων από αυτών με σοβαρές ανθρώπινες απώλειες και οικονομικές επιπτώσεις.

Η παρουσία μεσόβαθρων στην κοίτη ενός ποταμού επιφέρει αναπόφευκτα αλλαγή στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά και στην γεωμετρία του αγωγού προκαλώντας στένωση οπότε υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρεύματος στην περιοχή γύρω από το μεσόβαθρο και δημιουργία έντονων στροβίλων κυρίως κατάντη του μεσόβαθρου λόγω της παρεμπόδισης και επιτάχυνσης της ροής που προκαλεί το βάθρο. Οι στροβιλισμοί που δημιουργούνται προκαλούν πιο έντονη διάβρωση εδάφους η οποία με την πάροδο του χρόνου μπορεί να προκαλέσει υποσκαφή στα



θεμέλια της γέφυρας άρα να επέλθει η κατάρρευση της. Επίσης ένα πρόβλημα που θα κληθούν οι μηχανικοί του παρόντος και του μέλλοντος να αντιμετωπίσουν είναι τα έντονα και απότομα καιρικά φαινόμενα ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής. Ισχυρές καταιγίδες μπορούν να επιφέρουν τεράστιους καταποντισμούς οπότε και εξαιρετικά μεγάλες παροχές σε υδατορεύματα που να υπερβαίνουν τις συνηθισμένες παροχές για τις οποίες μια γέφυρα σχεδιάστηκε να αντέχει.

Η υποσκαφή, μαζί με την υπέρβαση του ωφέλιμου φορτίου και τις προσκρούσεις αποτελούν τις κύριες αιτίες που αστοχούν οι γέφυρες. Στην Ευρώπη αλλά και στην Αμερική λόγω της παλαιότητας πολλών γεφυρών έχει παρατηρηθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό κινδυνεύει με υποσκαφή καθώς με τη πάροδο του χρόνου η διάβρωση είναι μεγάλη

### 1.1.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων

Ήδη αρκετές χώρες έχουν εκπονήσει πλήθος προγραμμάτων για την συντήρηση και ενίσχυση υπαρχουσών υδατογεφυρών. Έχει γίνει σαφές πως αυτό είναι επιτακτική ανάγκη για να αποφευχθούν μελλοντικές αστοχίες γεφυρών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρές ανθρώπινες και οικονομικές απώλειες. Επίσης έργα βελτίωσης των ιδίων των αγωγών μπορούν να υλοποιηθούν αλλάζοντας τη γεωμετρία της εκάστοτε κοίτης γύρω από το μεσόβαθρο προκειμένου να αποφευχθούν κίνδυνοι πλημμυρικών επεισοδίων από τη στένωση και επομένως την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρεύματος.

Επίσης μεγάλος αριθμός πειραμάτων και μελετών έχουν στρέψει την προσοχή τους στην κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τις υποσκαφές, δηλαδή της τυρβώδους ροής, με σκοπό τη δημιουργία όλο και πιο υδροδυναμικών μεσόβαθρων που θα εκτονώνουν καλύτερα τα συγκεκριμένα φαινόμενα ή θα επηρεάζονται λιγότερα από αυτά

Όλα τα παραπάνω πρέπει να γίνονται με γνώμονα τις όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον καθώς και της οικονομικής βιωσιμότητας της κάθε λύσης. Συνεπώς το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης όπου πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες

## 1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της εργασίας είναι η επίδραση του σχήματος του μεσόβαθρου στα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής ενός ποταμού σε συνθήκες υποκρίσιμης μόνιμης ροής. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικά σχήματα μεσόβαθρων και έγιναν μετρήσεις ταχυτήτων σε τέσσερα διαφορετικές αποστάσεις από το μεσόβαθρο και σε κάθε απόσταση εγκάρσιες μετρήσεις σε τέσσερα διαφορετικά βάθη

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται γενική περιγραφή της σημασίας των γεφυρών για τον άνθρωπο, των προβλημάτων που μπορούν να δημιουργήσουν και τρόποι αντιμετώπισης τους

Στο κεφάλαιο 2 παραθέτονται στοιχεία για τους ανοιχτούς αγωγούς, τους νόμους ροής που τους διέπουν και πραγματοποιείται θεωρητική και μαθηματική ανάλυση του φαινομένου της τύρβης, της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρονται στοιχεία και λεπτομέρειες του τρόπου διεξαγωγής των πειραμάτων, των βάθρων, τα όργανα και τις θέσεις μέτρησης της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, καθώς επίσης και λεπτομέρειες των πειραμάτων.

Στο κεφάλαιο 4 παραθέτονται τα διαγράμματα όλων των φυσικών μεγεθών που περιγράφουν το φαινόμενο της τυρβώδους ροής ανάντη και κατάντη των σχημάτων

Στο κεφάλαιο 5 κατατίθενται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη

## 2. Θεωρητική ανάλυση-Βιβλιογραφική επισκόπηση

### 2.1 Γενικά

Η κατασκευή μεσόβαθρων στην κοίτη ενός ποταμού προκαλούν μεγάλες αναταραχές στη ροή κυρίως στη περιοχή γύρω από το μεσόβαθρο. Σε μεγάλων διατομών κανάλια όπου κατασκευάζονται οι γέφυρες επικρατούν συνθήκες τυρβώδους ροής, δηλαδή η κίνηση των ρευστών σωματιδίων είναι ακανόνιστες, οι γραμμές ροής μεταβάλλονται από στιγμή σε στιγμή και υφίστανται έντονη μίξη γειτονικών στρώσεων. Το μεσόβαθρο δημιουργεί μία δύναμη αντίστασης στη ροή με αποτέλεσμα μεταβολές στην ορμή και μεγάλες απώλειες ενέργειας. Η στένωση στη διατομή του ανοιχτού καναλιού αναγκάζει τη ροή να επιταχύνεται σε αντίθεσή με τη σταθερή πορεία που θα είχε αν δεν υπήρχε το μεσόβαθρο. Επομένως η επιτάχυνση που δημιουργείται επηρεάζει ακόμα περισσότερο τις ήδη χαοτικές κινήσεις των μορίων του νερού και έτσι κατάντη του μεσόβαθρου δημιουργούνται έντονοι στροβιλισμοί καθ' ύψος και εγκάρσιως της διατομής του καναλιού. Η καμπύλωση των γραμμών ροής δηλαδή οι αλλαγές στην κατανομή των ταχυτήτων κατάντη του μεσόβαθρου που είναι το αποτέλεσμα τις επιτάχυνσης της ροής, είναι ουσιαστικά αυτή που δημιουργεί τους έντονους στροβιλισμούς κάτι που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στα θεμέλια της γέφυρας

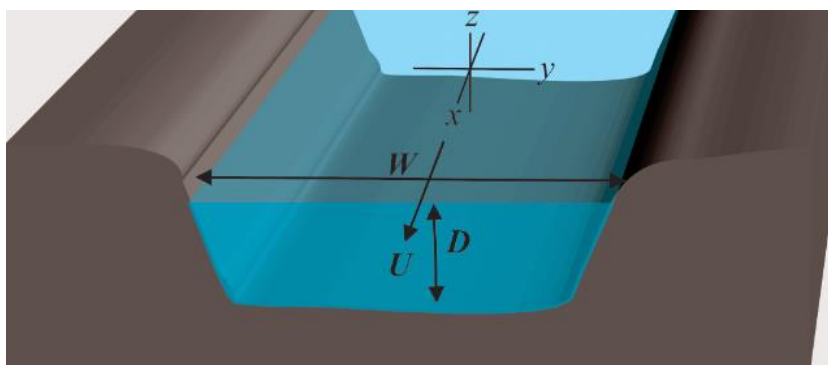
Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της τύρβης είναι η διατομή του εκάστοτε καναλιού, το σχήμα του μεσόβαθρου, παροχή του ποταμού, οι πιέσεις που δημιουργούνται, συνεκτικότητα του ρευστού. Η επιτάχυνση της ροής είναι ενδεικτική των σημαντικών απωλειών ενέργειας που συντελείται. Επίσης η επιτάχυνση αυτή δίνει τόσο τη δύναμη που χρειάζεται το νερό για να ξεπεράσει τη δύναμη αντίστασης του εμποδίου, όσο και μεγαλύτερη ενέργεια για να αντισταθμιστεί η απώλεια λόγω του μεσόβαθρου. Η αναταραχή της ροής και οι στροβιλισμοί συνεχίζονται για μεγάλη απόσταση κατάντη του μεσόβαθρου μέχρις ότου η ροή να ξαναγίνει πλήρως ανεπτυγμένη και να επανέλθει σε συνθήκες που επικρατούσαν πριν η ροή συναντήσει το εμπόδιο

### 2.2. Ανοιχτοί αγωγοί

Όπως προαναφέρθηκε, πληθώρα προβλημάτων που καλείται να αντιμετωπίσει ο πολιτικός μηχανικός περιλαμβάνουν ανοιχτούς αγωγούς δηλαδή αγωγούς όπου η ροή ορίζεται από τα στερεά όρια του αγωγού και από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η παροχή  $Q$  που διέρχεται από μία διατομή αγωγού ορίζεται γενικά ως:

$$Q=A \times V \quad (2.1)$$

όπου  $A$  το εμβαδόν της υγρής διατομής και  $V$  η μέση ταχύτητα νοούμενη κάθετη στη διατομή



**Σχήμα 2.1** Τρισδιάστατη απεικόνιση διαστάσεων ανοιχτού αγωγού

Οι ανοιχτοί αγωγοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τους φυσικούς και τους τεχνητούς. Οι φυσικοί αγωγοί μπορεί να είναι ρυάκια, ρεύματα, χείμαρροι, ποτάμια ενώ οι τεχνητοί αγωγοί μπορεί να είναι διώρυγες ναυσιπλοΐας και άρδευσης, τάφροι αποχέτευσης και στράγγισης, αγωγοί υπονόμων κλπ.

Η δυσκολία της αντιμετώπισης των προβλημάτων των ανοιχτών αγωγών γίνεται εμφανής διότι συνειδητοποιούμε από τα παραπάνω πώς το εμβαδόν μιας διατομής ορίζεται από την γεωμετρία του αγωγού η οποία μπορεί να είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη (π.χ. αλλαγή των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας της διατομής ενός ανοιχτού αγωγού με την πάροδο του χρόνου), με αποτέλεσμα την δυσκολία της πρόβλεψης της παροχής και άρα του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας που μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως πλημμυρικά επεισόδια.

### 2.2.1 Κατηγορίες ροής στους ανοιχτούς αγωγούς

Τη ροή στους ανοιχτούς αγωγούς τη διακρίνουμε με βάση κινηματικά και δυναμικά κριτήρια. Από άποψη χρονικών μεταβολών τη διακρίνουμε σε μόνιμη και μη μόνιμη ροή και από άποψη χωρικών μεταβολών η ροή χωρίζεται σε ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη ροή

Μόνιμη είναι η ροή όπου το βάθος ροής  $t$  είναι το ίδιο σε όλο το μήκος του αγωγού και παραμένει σταθερό, αμετάβλητο με το χρόνο. Συνεπώς το εμβαδόν  $A$  καθώς και η ταχύτητα  $V$  σε μια δοσμένη παροχή  $Q$  είναι αμετάβλητα στο χρόνο. Η μη μόνιμη ροή είναι όταν τα παραπάνω μεγέθη μεταβάλλονται με το χρόνο.

Η ροή καλείται ομοιόμορφη όταν σε μία δεδομένη χρονική στιγμή το βάθος ροής  $t$  είναι σταθερό σε κάθε θέση κατά μήκος του αγωγού. Όταν συμβαίνει το αντίθετο η ροή λέγεται ανομοιόμορφη. Με τη σειρά της διακρίνεται στην βαθμιαία

μεταβαλλόμενη ροή όπου το βάθος ροής μεταβάλλεται λίγο σε σχέση με το μήκος και οι γραμμές ροής μπορούν κατά προσέγγιση να θεωρηθούν παράλληλες διευκολύνοντας την επίλυση των προβλημάτων. Αντιθέτως, στην ταχεία μεταβαλλόμενη ροή η καμπύλωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι μεγάλη. Συνήθως η ροή αυτή πραγματοποιείται σε μικρά τμήματα κατά μήκος του αγωγού.

Όπως γίνεται αντιληπτό οι συνεχείς μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ανοιχτών αγωγών, ιδίως των φυσικών, και οι αλλαγές στις συνθήκες ροής κάνουν τα προβλήματα επίλυσης πολυπαραγοντικά. Οι γέφυρες οι οποίες χτίζονται συνήθως σε φυσικά ρέματα υπόκειται συνεχώς σε μεταβαλλόμενες συνθήκες με αποτέλεσμα να επηρεάζονται η λειτουργικότητα, η αντοχή της και πολλές φορές να απειλείται η ίδια η ύπαρξη της. Για αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη συνεχούς συλλογής στοιχείων για τα κλιματικά δεδομένα, τις αλλαγές στις διατομές των φυσικών αγωγών και η ανάπτυξη νέων μεθόδων, μέσω έρευνας για την γρηγορότερη και ευστοχότερη επίλυση αυτών των προβλημάτων.

Από δυναμικής άποψης η ροή διακρίνεται με βάση τις δυνάμεις αδράνειας και την σχέση τους με κάθε μία από τις δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνηση του ρευστού. Σε προβλήματα με ροή με ελεύθερη επιφάνεια οι δυνάμεις συνεκτικότητας και οι δυνάμεις βαρύτητας παίζουν σημαντικό ρόλο.

Η επίδραση της συνεκτικότητας εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds

$$Re=VL/v \quad (2.2)$$

Όπου  $V$  είναι η μέση ταχύτητα του της ροής στην διατομή,  $v=\mu/\rho$  είναι το κινηματικό ιξώδες του νερού (συνήθως  $v=1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) και  $L$  κάποιο χαρακτηριστικό μήκος. Συνήθως χρησιμοποιείται η υδραυλική ακτίνα της διατομής όπου  $R=A/P$ , με  $A$  το εμβαδόν της υγρής διατομής και  $P$  η βρεχόμενη περίμετρος

Η επίδραση της βαρύτητας εκφράζεται από τον αριθμό Froude,  $F$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας.

$$Fr=V/\sqrt{gL} \quad (2.3)$$

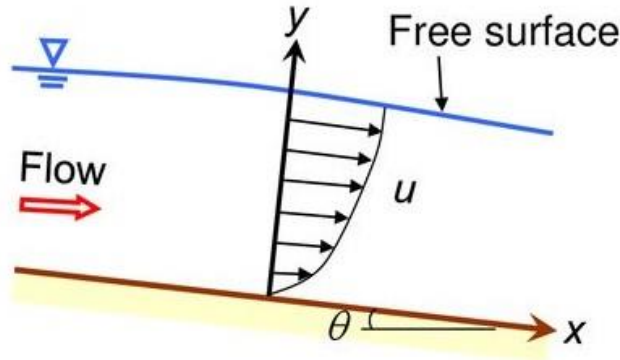
Για  $Fr < 1$  η ροή καλείται υποκρίσιμη. Η δύναμη της βαρύτητας είναι σημαντική σε σχέση με τις δυνάμεις αδράνειας, η ροή έχει σχετικά μικρή ταχύτητα και παρατηρείται στα χαμηλά τμήματα των ποταμών.

Για  $Fr > 1$  η ροή είναι υπερκρίσιμη. Οι δυνάμεις αδράνειας κυριαρχούν, αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες και παρατηρείται σε ρέματα με ισχυρή κατά μήκος κλίση.

Για  $Fr = 1$  η ροή είναι κρίσιμη.

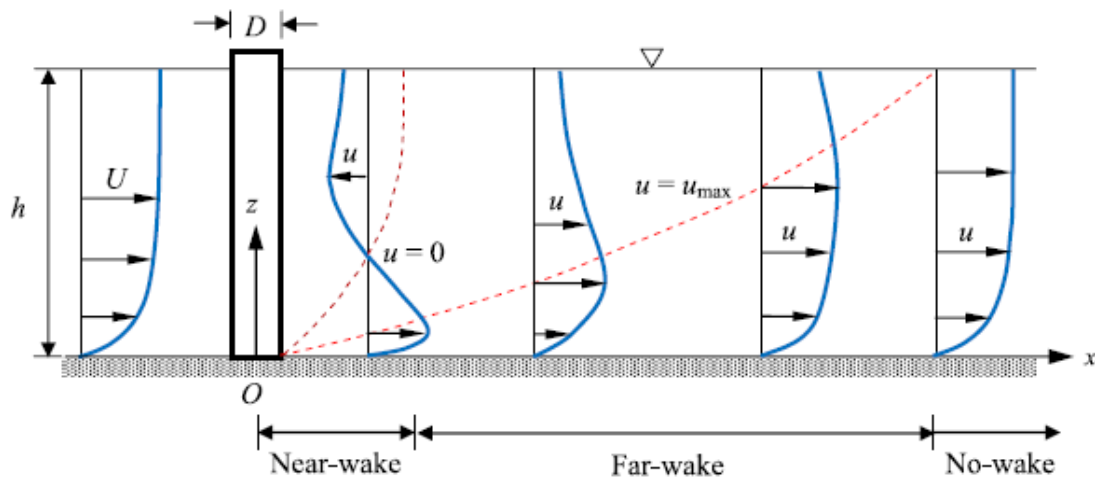
2.2.2 Προφίλ ταχυτήτων σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια

. Η θεωρητική κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει του ύψους είναι λογαριθμική. Οι διατμητικές δυνάμεις του πυθμένα του αγωγού και της αντίστασης του αέρα κοντά στην επιφάνεια ταχύτητας προκαλούν μία καμπύλωση του προφίλ της ταχύτητας με τη μέγιστη ταχύτητα να εμφανίζεται λίγο πιο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια.



Σχήμα 2.2 Κατακόρυφη κατανομή ταχυτήτων σε ανοιχτό αγωγό

Η παρουσία εμποδίου στη ροή διαταράσσει της συνθήκες της, προκαλώντας μεταβολή στην ορμή και στένωση στην διατομή του αγωγού όποτε και επιτάχυνση της ροής. Οι βίαιες και απότομες αυτές μεταβολές διαταράσσουν τα χαρακτηριστικά της ροής κατάντη του εμποδίου και ενεργοποιούν το μηχανισμό γένεσης των δινών και των στροβίλων που είναι υπεύθυνο για την διάβρωση του πυθμένα ενός φυσικού ανοιχτού αγωγού με καταστροφικά αποτελέσματα πολλάκις για τα βάρη των γεφυρών.



Σχήμα 2.3 Κατακόρυφη κατάντη κατανομή ταχυτήτων κοντά(near wake) και μακριά(far wake) από το εμπόδιο (Πηγή: S. Dey, D. Swargiary 2018)

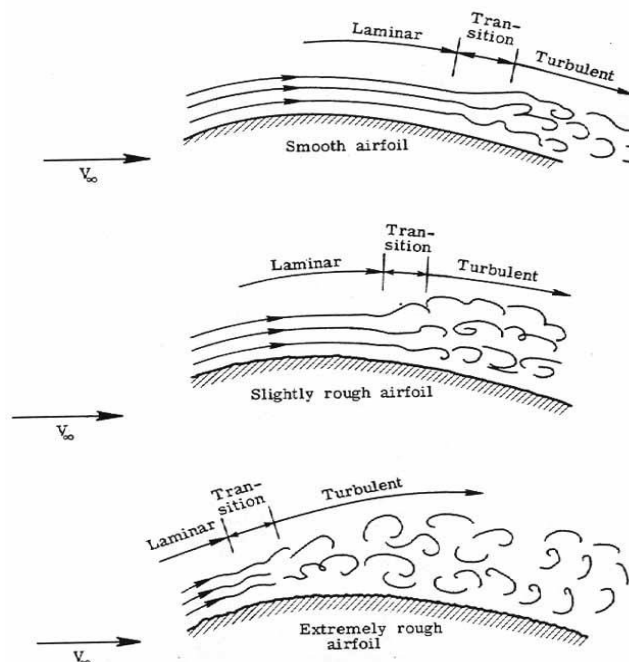
Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ έντονο εκατέρωθεν και κοντά στο εμπόδιο, συνεχίζει να υφίσταται για κάποια απόσταση μέχρι που η ροή αποκαθίσταται και επιστρέφει σε συνθήκες που επικρατούσαν πριν συναντήσει το εμπόδιο.

## 2.3 Τυρβώδη ροή

### 2.3.1 Θεωρητική περιγραφή της τύρβης

Τα ρευστά διακρίνονται σε πραγματικά και ιδεατά. Τα ιδεατά ρευστά είναι ρευστά ασυμπίεστα και χωρίς συνεκτικότητα. Παρά το γεγονός ότι τα ιδεατά ρευστά δε συναντώνται στη φύση, μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ότι ένα ρευστό συμπεριφέρεται ως ιδεατό καθότι αυτό διευκολύνει τα μαθηματικά μοντέλα και τους υπολογισμούς και έχουν πλήθος εφαρμογών στο πεδίο του μηχανικού, όπου η διαφορά με τον αν εφαρμοζόταν συνθήκες πραγματικών έναντι ιδεατών ρευστών είναι ασήμαντη. Σε περιπτώσεις όμως ανοιχτών αγωγών και ειδικά στην περίπτωση όπου υπάρχει εμπόδιο στη ροή, η ροή καθίσταται αποκλίνουσα, δηλαδή οι γραμμές ροής απομακρύνονται μεταξύ τους και οι δυνάμεις συνεκτικότητας δεν μπορούν να αποσβέσουν μικροδιαταραχές της ροής

Τρεις είναι οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται η ροή ενός πραγματικού ρευστού: στρωτή, μεταβατική και τυρβώδης ροή. Στρωτή ροή έχουμε όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας ενός ρευστού υπερβαίνουν τις δυνάμεις αδράνειας, τυρβώδης ροή όταν συμβαίνει το αντίθετο και μεταβατική όταν η ροή βρίσκεται στο ενδιάμεσο στάδιο.



**Σχήμα 2.4** Απεικόνιση τυρβώδους ροής σε ανοιχτό αγωγό (Πηγή Παπανικολάου 2016)

Η γένεση της τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής που οφείλεται είτε στις συνθήκες ροής είτε σε τυχόν διατάραξη όπως όταν η ροή συναντά ένα εμπόδιο.

Με βάση την περιοχή γένεσης διακρίνονται δύο είδη τύρβης

- Η τύρβη στερεού ορίου όπου δημιουργούνται σημαντικές κλίσεις ταχυτήτων, επομένως αξιόλογες διαφορές ταχύτητας μεταξύ γειτονικών στρώσεων
- Η ελεύθερη τύρβη που παρουσιάζεται μακριά από στερεά όρια και που είναι εξαιρετικά ασταθείς. Παράδειγμα ελεύθερης τύρβης είναι όταν το ρευστό συναντά ένα εμπόδιο στην κατεύθυνση του όπως το βάθρο μιας γέφυρας που εξετάζεται και στην παρών εργασία

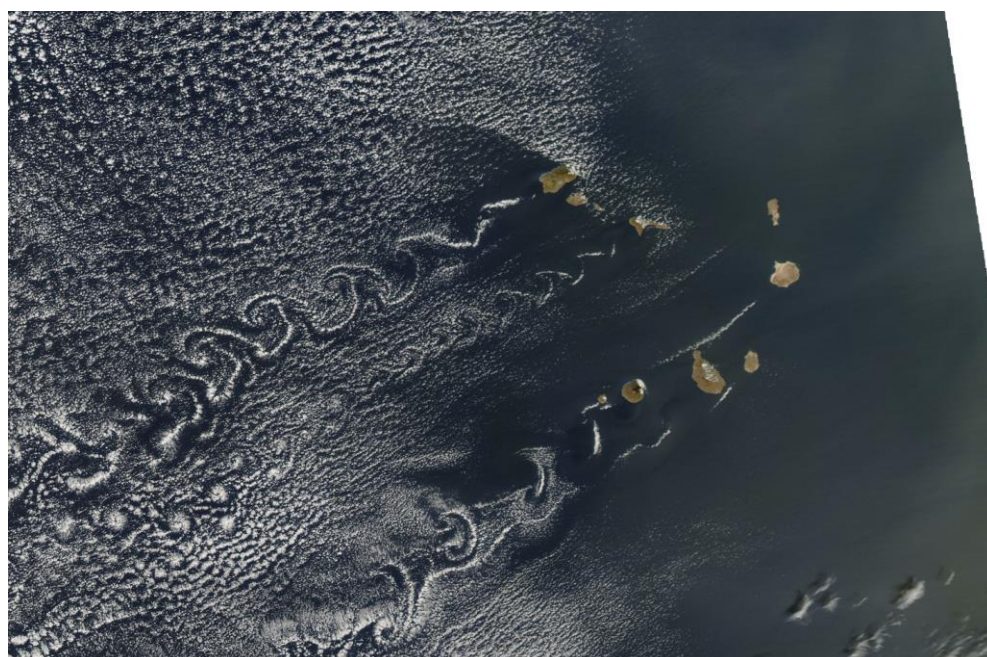
Γενικά είναι δύσκολο να δοθεί ένας ακριβής ορισμός της τύρβης. Μπορούμε όμως να περιγράψουμε το φαινόμενο μέσω γενικών χαρακτηριστικών που τη διέπουν.

-Η αταξία, που είναι ένα από τα πιο σημαντικά της χαρακτηριστικά, επιβάλλει δύσκολη ανάλυση και υπολογισμό του ροϊκού πεδίου σύμφωνα με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Το πρόβλημα επομένως προσεγγίζεται μέσω της στατιστικής ανάλυσης

-Διαχυτικότητα όπου παρατηρούνται έντονες μίξεις των γειτονικών γραμμών ροών με αυξημένες τυρβώδεις εγκάρσιες ροές ορμής, μάζας και θερμότητας.

-Η τύρβη είναι πάντα τρισδιάστατη ακόμα και αν το πεδίο ροής είναι μονοδιάστατο ή δισδιάστατο με την στροβιλότητα να επηρεάζει σημαντικά την αστάθεια της ροής

-Η τυρβώδη κινητική ενέργεια υφίσταται εκφυλισμό ή απορρόφηση. Για παράδειγμα όπως το ιξώδες μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε θερμότητα το ίδιο συμβαίνει με την τύρβη





**Σχήμα 2.5** Παράδειγμα δημιουργίας στροβιλισμών κατάντη εμποδίου στη ροή (Νησιά Cape Verde) (Πηγή: Παπανικολάου 2016)

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της τυρβώδους και της στρωτής ροής είναι ο χρονική διάρκεια και η συχνότητα όπου μια διαταραχή συμβαίνει μέσα στη ροή. Αν το πλάτος μια διαταραχής ελαττώνεται με το χρόνο τότε ομιλούμε περί στρωτής ροής ενώ όταν συμβαίνει το αντίθετο έχουμε τυρβώδη ροή.

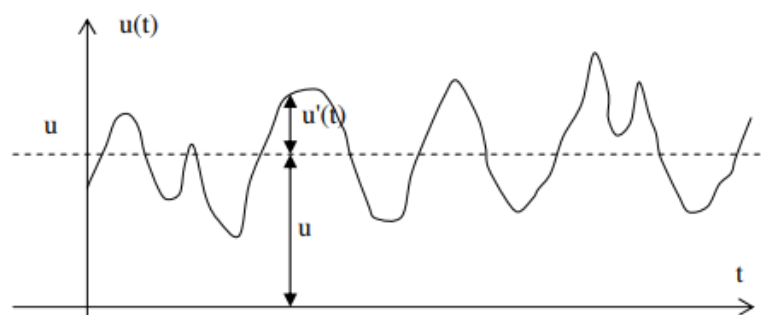
Παρά τον φαινομενικά χαοτικό χαρακτήρα της τύρβης, η δημιουργία της υπακούει σε νόμους που εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της ροής. Η τύρβη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο στροβίλων διαφόρων μεγεθών, συχνότητας γένεσης και προσανατολισμού στο χώρο. Αντίθετη προς το μηχανισμό γένεσης των στροβίλων είναι η διαδικασία απόσβεσής τους η οποία επιτυγχάνεται μέσω των διατμητικών τάσεων συνεκτικότητας

Η βασική παράμετρος με την οποία μία ροή χαρακτηρίζεται στρωτή ή τυρβώδης είναι ο αριθμός Reynolds

Για ανοιχτούς αγωγούς υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds ( $Re_c$ ) όπου η ροή χαρακτηρίζεται στρωτή ή τυρβώδης. Η τιμή αυτή είναι συνήθως  $Re_c=12500$ . Τα συντριπτικά προβλήματα στους ανοιχτούς αγωγούς που αφορούν τον μηχανικό έχουν να κάνουν με τυρβώδη ροή.

### 2.3.2 Μαθηματική περιγραφή της τύρβης

Το κύριο χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι ότι η ταχύτητα, η πίεση και κάθε άλλο μέγεθος μεταβάλλονται συνεχώς σε τυχόν σημείο του πεδίου με την πάροδο του χρόνου κατά τρόπο ακανόνιστο και φαινομενικά τυχαίο και στις τρεις χωρικές κατευθύνσεις. (Για την ταχύτητα  $u$  στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ ,  $v$  στην διεύθυνση  $y$  και  $w$  στη διεύθυνση  $z$ ). Η ταχύτητα  $u$  σε κάποιο σημείο συναρτήσει του χρόνου έχει την τυπική μορφή του σχήματος 1.1. Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά των υπόλοιπων συνιστωσών, της πίεσης, κλπ.



**Σχήμα 2.6** Διακύμανση της τιμής της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου (Πηγή Παπανικολάου 2016)

Η στιγμιαία ταχύτητα  $u$  μπορεί να γραφεί

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.3)$$

όπου  $\bar{u}$  είναι η μέση χρονική τιμή της ταχύτητας  $u$  στο δεδομένο σημείο υπολογιζόμενη για χρονική περίοδο  $T$  μεγαλύτερη από την κλίμακα των διακυμάνσεων:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (2.4)$$

Η διαφορά  $u' = u - \bar{u}$  αποτελεί την διακυμαινόμενη συνιστώσα της ταχύτητας και εξ ορισμού της  $\bar{u}$ , η μέση τιμή της είναι μηδέν

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u' dt = 0 \quad (2.5)$$

Επειδή η μέση τιμή των διακυμάνσεων είναι μηδέν ως μέτρο των διακυμάνσεων της τύρβης χρησιμοποιείται η τετραγωνική ρίζα των μέσων χρονικών τιμών των τετραγώνων των διακυμαινόμενων τιμών, π.χ.

$$\sqrt{\overline{u'^2}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T u'^2 dt \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Ο λόγος του μέσου όρου των τριών διακυμαινόμενων συνιστωσών της ταχύτητας προς τη μέση τιμή αυτής ορίζεται ως ένταση της τύρβης

$$i = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{|\bar{V}|} \quad (2.7)$$

### 2.3.3 Εξισώσεις συνέχειας και κίνησης για τυρβώδη ροή

Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις που διέπουν την τύρβη και περιγράφουν την τύρβη ονομάζονται εξισώσεις Navier-Stokes. Οι εξισώσεις αυτές εκφράζουν την διατήρηση της ορμής του ρευστού και στις τρεις διευθύνσεις x,y,z με αντίστοιχες ταχύτητες u,w,v

Η γενική μορφή της εξίσωσης Navier-Stokes είναι η εξής

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{f} - \text{grad} p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.8)$$

Ειδικότερα στο πεδίο βαρύτητας της γης είναι

$$\vec{f} = -\text{grad}(gh) \quad (2.9)$$

όπου h το υψόμετρο. Επομένως οι εξισώσεις γράφονται

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\text{grad}(p+\gamma h) + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.10)$$

Η σε αναλυτική μορφή

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \gamma \frac{\partial h}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \gamma \frac{\partial h}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

Οι διαφορικές εξισώσεις συνέχειας και κίνησης (Navier-Stokes) ισχύουν γενικά για τις στιγμιαίες τιμές των μεγεθών της ταχύτητας και της πίεσης. Για την τυρβώδη ροή όμως δεν έχουν κατά κανόνα ουσιαστική σημασία και για αυτό πρέπει να αναδιατυπωθούν συναρτήσει των μέσων τιμών  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\bar{p}$ . Εισάγουμε στις εξισώσεις τις σχέσεις

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p' \quad (2.14)$$

Η εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

γράφεται

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση χρονική τιμή της εξίσωσης και ότι ισχύει:

$$\frac{\partial \bar{u}'}{\partial x} = \frac{\partial \bar{v}'}{\partial y} = \frac{\partial \bar{w}'}{\partial z} = 0 \quad (2.17)$$

Προκύπτει

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.18)$$

Αφαιρώντας κατά μέλη έχουμε

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

Η εξίσωση συνέχειας στο πεδίο βαρύτητας  $x$  είναι

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

Προσθέτοντας στο αριστερό μέλος τον μηδενικό όρο λόγω συνέχειας

$$\rho u \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.21)$$

Η εξίσωση γράφεται

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial t} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.22)$$

Εισάγοντας τις σχέσεις (2.14) προκύπτει

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}w}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}w'}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) \quad (2.23)$$

ή

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \bar{u} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \right] = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}w'}{\partial z} \right) \quad (2.24)$$

Όμως λόγω συνέχειας είναι

$$\bar{u} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.25)$$

Οπότε τελικά έχουμε

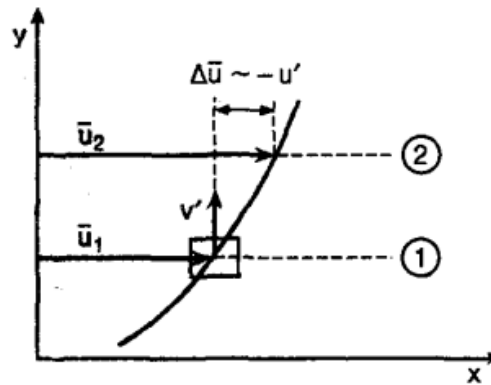
$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}v'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}w'}{\partial z} \right) \quad (2.26)$$

Ομοίως και για τις άλλες κατευθύνσεις y και z

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}w'}{\partial z} \right) \quad (2.27)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \gamma \frac{\partial h}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \rho \left( \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}u'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}v'}{\partial z} \right) \quad (2.28)$$

2.3.4. Τυρβώδεις τάσεις



**Σχήμα 2.7** Μεταφορά μάζας μεταξύ των στρώσεων του υγρού σε δισδιάστατη ροή (Πηγή Παπανικολάου 2016)

Στην τυρβώδη ροή λόγω της μεγάλης ανταλλαγής ποσότητας κίνησης μεταξύ των γειτονικών στρώσεων του ρευστού παρατηρείται σημαντική αύξηση των εσωτερικών τάσεων.

Ας θεωρήσουμε δισδιάστατη ροή με κατεύθυνση τον άξονα  $x$  και κλίση ταχύτητας κατά  $y$ . Λόγω της τυρβώδους διακύμανσης  $v'$  η στιγμιαία παροχή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας από τη στρώση 1 προς τη στρώση 2 είναι  $\rho v'$  και η ανά μονάδα οριζόντια επιφάνειας  $dE$  μεταφορά ποσότητα κίνησης κατά  $x$  είναι  $-\rho v' u'$  και κατά  $y$  είναι  $-\rho v'^2$ . Όμως η ανά μονάδα μεταβολή της ποσότητας κίνησης ισούται με τη δύναμη που προκαλεί τη μεταβολή αυτή ενώ η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας αποτελεί την αντίστοιχη τάση. Επομένως η  $-\rho v'^2$  εκφράζει ορθή τάση, κάθετη προς την θεωρούμενη οριζόντια διαχωριστική επιφάνεια  $dE$  μεταξύ των στρώσεων 1 και 2 και η ποσότητα  $-\rho v'^2$  εκφράζει διατμητική τάση (Γ. Νουτσόπουλος 2007)

Λαμβάνοντας υπόψη και τις μέσες χρονικές στιγμές έχουμε:

$$\tau_{xy,t} = -\overline{\rho u' v'} \quad (2.29)$$

$$\sigma_{y,t} = -\overline{\rho v'^2} \quad (2.30)$$

Ανάλογες εκφράσεις ισχύουν για τα λοιπά γινόμενα των διακυμαινόμενων τιμών των ταχυτήτων. Οι τάσεις αυτές λέγονται τυρβώδεις τάσεις ή τάσεις Reynolds. Οι τυρβώδεις τάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση από τις τάσεις συνεκτικότητας έτσι ώστε οι τελευταίες να είναι δυνατόν να αμεληθούν στη τυρβώδη ροή. Γενικά η ολική διατμητική τάση  $\tau_{x,y}$  είναι

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} - \overline{\rho u' v'} \quad (2.31)$$

αλλά γενικά ισχύει

$$-\overline{\rho u'v'} \gg \mu \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2.32)$$

### 2.3.4 Τυρβώδη κινητική ενέργεια (ΤΚΕ)

Η τυρβώδη κινητική ενέργεια εκφράζεται από τον τύπο

$$TKE = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (2.33)$$

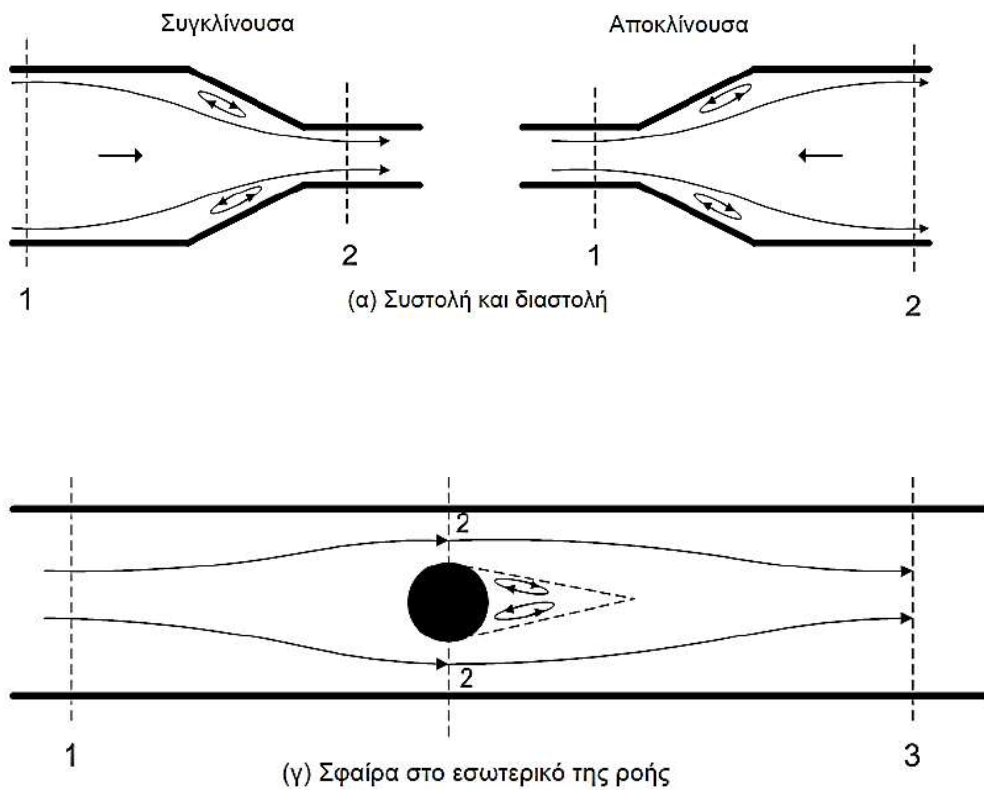
Δηλαδή προκύπτει από το άθροισμα των τετραγώνων των μέσων τιμών των διακυμάνσεων της ταχύτητας και στις τρεις χωρικές διευθύνσεις και σχετίζεται με τη δημιουργία των δινών. Παράγεται λόγω των διατμητικών τάσεων μεταξύ των στρώσεων του νερού, μεταφέρεται κατά μήκος της ροής και διαχέεται στο χώρο από της ιξώδες δυνάμεις σε μορφή θερμότητας

## 2.4 Δύναμη αντίστασης και συντελεστής αντίστασης με την εξίσωση ορμής

### 2.4.1 Αποκόλληση της ροής

Η αποκόλληση (ή διαχωρισμός) της ροής είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η οριακή γραμμή ροής όπου η ταχύτητα είναι μηδέν παύει να ταυτίζεται με το στερεό όριο και προχωρά στο εσωτερικό της ροής. Η αποκόλληση συμβαίνει όταν τα στερεά όρια είναι αποκλίνοντα κατά τη διεύθυνση της ροής. Είναι φανερό πως η αποκόλληση συμβαίνει σε απότομες μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής της ροής. Στις συνθήκες αυτές η αύξηση της πίεσης κατά την διεύθυνση της ροής δημιουργεί δυνάμεις λόγω της διαφοράς πίεσης αντίθετες προς την κίνηση του ρευστού. Λόγω της φυσικής οριακής συνθήκης του στερεού ορίου που επιβάλλει μηδενισμό της ταχύτητας η ποσότητα κίνησης είναι πολύ μικρή, επομένως όταν τα ρευστά αυτά σωματίδια συναντήσουν την αντίρροπη προς την κίνηση τους δυνάμεις πίεσης δεν μπορούν να προχωρήσουν και αντιστρέφουν την κίνηση τους.

Η περιοχή που δημιουργείται μεταξύ της οριακής γραμμής ροής και του στερεού ορίου ονομάζεται ζώνη αποκόλλησης ή δίνη και χαρακτηρίζεται από έντονους στροβιλισμούς με ανάστροφη ροή, υποπίεσεις και σημαντική απώλεια ενέργειας. Η ύπαρξη και η έκταση της ζώνης αποκόλλησης πίσω από σώματα που βρίσκονται σε κινούμενο ρευστό για τη δύναμη και το συντελεστή αντίστασης που ασκούνται σε αυτά. (Γ. Νουτσόπουλος 2007)



**Σχήμα 2.8** Ζώνες αποκόλλησης σε συστολή, διαστολή της διατομής και μετά από εμπόδιο (Α. Νάνου, Σημειώσεις Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων: Υδραυλική κλειστών αγωγών υπό πίεση)

Η αντίσταση ενός σχήματος είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς των πιέσεων ανάντη και κατάντη του σχήματος που οφείλεται στο φαινόμενο της αποκόλλησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή των υποπιέσεων τόσο μεγαλύτερος αναμένεται να είναι ο συντελεστής αντίστασης. Σώματα με βαθμιαία μεταβολή των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών (π.χ κύλινδρος, σώματα με αεροτομές) έχουν μικρό εύρος ζώνης αποκόλλησης ενώ το αντίθετο σε συμβαίνει σε σώματα με γωνίες και μικρό  $L/D$  (τετράγωνα, ορθογώνια)

#### 2.4.2 Εξίσωση ορμής σε βάθρο

Ο προσδιορισμός της δύναμης που ασκείται στο εμπόδιο είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί με τους νόμους της ρευστομηχανικής λόγω της πολυπλοκότητας της ροής γύρω από μεσόβαθρο. Η παρουσία εμποδίου στη ροή δημιουργεί απώλειες ενέργειας και οφείλεται στην αντίσταση λόγω της τριβής στο μεσόβαθρο και στη διαφορά πίεσης η οποία είναι μεγαλύτερη ανάντη και μικρότερη κατάντη του εμποδίου. Αυτό όπως αναφέρθηκε οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο της

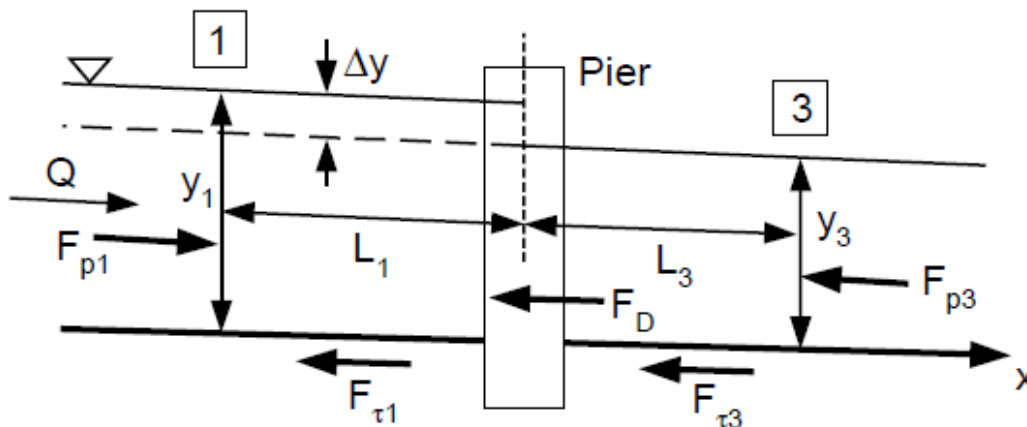


αποκόλλησης. Η δύναμη στο μεσόβαθρο μπορεί να εκφραστεί με την εμπειρική σχέση:

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A_\mu \quad (2.34)$$

όπου  $C_D$  είναι ο συντελεστής αντίστασης,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $A_\mu$  είναι η είναι η εκτεθειμένη στη ροή μετωπική επιφάνεια και  $V$  η ταχύτητα ροής. Οι αδιατάρακτες συνθήκες ροής χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το  $A_\mu$  και το  $V$ .

Η εξάρτηση των συντελεστών αντίστασης για ορθογωνικές διώρυγες μπορεί να γραφεί ως (Charbeneau & Holley, 2001):  $CD=f$  (σχήμα μεσόβαθρου,  $Rep$ ,  $kp/Bp$ ,  $I_T$ ,  $Fr$ ,  $Bp/B$ ,  $Bp/y$ ). Όπου  $Rep$  είναι ο αριθμός Reynolds για το μεσόβαθρο και υπολογίζεται από  $Rep=VBp/\nu$  και είναι σημαντικός κυρίως για μεσόβαθρα που έχουν καμπυλωμένες επιφάνειες,  $V$  είναι και εδώ η ταχύτητα ροής,  $Bp$  το πλάτος παρεμπόδισης της ροής,  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα,  $kp$  η τραχύτητα της επιφάνειας του μεσόβαθρου,  $kp/Bp$  (σχετική τραχύτητα),  $Bp/B$ ,  $Bp/y$  είναι βασικά γεωμετρικές παράμετροι,  $I_T$  η ένταση της τύρβης στην περιοχή κοντα στο μεσόβαθρο και τέλος  $Fr$  ο αριθμός Froude. Ο λόγος  $Bp/B$  εκφράζει το πόσο μπλοκάρεται η ροή. Όσο για τον λόγο  $Bp/y$  εκφράζει μια αναλογία που πιθανόν να μην είναι αρκετά σημαντική για τα μεσόβαθρα εφόσον δεν υπάρχει ροή πάνω ή κάτω από αυτά. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης είναι εξαιρετικά δυσχερές.



Σχήμα 2.9 Δυνάμεις που ασκούνται σε βάθρο

Στο παραπάνω σχήμα όπου  $y_1$  και  $y_3$  τα βάθη ροής ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου,  $L_1$  και  $L_3$  οι αποστάσεις που μετρήθηκαν τα βάθη ροής ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου αντιστοίχως και  $\Delta y$  η υπερύψωση.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση της ορμής της διατομής 1 και 2 προκύπτει:

$$F_{p1} - F_{p3} - F_{t1} - F_{t3} + F_D = \rho Q (\beta V_3 - \beta V_1) \quad (2.35)$$

Όπου  $F_p$  οι δυνάμεις λόγω πίεσης,  $F_t$  οι δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων,  $Q$  η παροχή και  $F_D$  η δύναμη αντίστασης

Ο συντελεστής συνόρθωσης της ορμής  $\beta$  εξαρτάται από την κατανομή των ταχυτήτων και υπολογίζεται ως εξής.

$$\beta = \frac{\int u^2 dA}{V^2 A} = \frac{\int u^2 dA}{V Q} \quad (2.36)$$

Για απλές γεωμετρικές διατομές και για τυρβώδη ροή της στη περίπτωση μας ο συντελεστής συνόρθωσης  $\beta$  είναι περίπου ίσος με τη μονάδα

Η αντίσταση τριβών εξαρτάται από την έκταση της επιφάνειας που ασκούνται οι διατμητικές τάσεις και τον προσανατολισμό της στη ροή. Η αντίσταση τριβών είναι σημαντική για μικρούς αριθμούς Reynolds όπου κυριαρχούν οι δυνάμεις συνεκτικότητας ενώ για περιπτώσεις με μεγάλους αριθμούς Reynolds μπορεί να αμεληθεί και η ολική αντίσταση να εξαρτάται ουσιαστικά από την αντίσταση του σχήματος

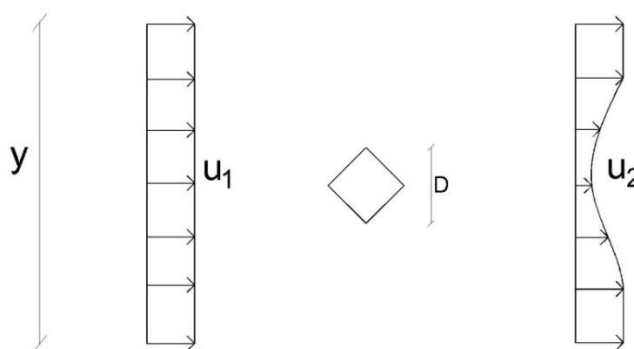
Αμελώντας της δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων και θεωρώντας συντελεστή συνόρθωσης  $\beta = 1$  η σχέση γίνεται

$$F_D = F_{p1} - F_{p3} + \rho \sum V_1 Q_1 - \rho \sum V_3 Q_1 = \rho \left( g \frac{y_1^2}{2} - g \frac{y_3^2}{2} + \int_A V_1^2 dA - \int_A V_3^2 dA \right) \quad (2.37)$$

Η ακριβέστερη εύρεση της οπισθέλκουσας  $F_D$  επιτυγχάνεται όταν η ολοκλήρωση των ταχυτήτων γίνεται εγκαρσίως της διατομής ανάντη και κατόντη. Η διαφορά της κατανομής της πίεσης μεταφράζεται στην επιτάχυνση της ροής κατόντη του εμποδίου. Παίρνοντας τις εγκαρσίως κατανομές ανά ύψος και έπειτα την μέση τιμή από την εκάστοτε υπολογισμένη δύναμη, εξάγεται η τιμή της  $F_D$ .

Συγκεκριμένα

$$F_D = \int_y u_1^2 dy - \int_y u_2^2 dy \quad (2.38)$$



**Σχήμα 2.10** Παράδειγμα εγκάρσιας κατανομής ταχυτήτων ανάντη και κατάντη εμποδίου

Οπότε

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 D} \quad (2.39)$$

όπου  $D$  το εγκάρσιο μήκος του εμποδίου που συναντάει η ροή

Ο Fr.h.White (2011, Fourth Edition) προτείνει τους εξής συντελεστές για διάφορα σχήματα

Σχήμα μεσόβαθρου	$C_D$
Κύλινδρος	1,2
Ορθογώνιο $L/D=2$	1,8
Ορθογώνιο $L/D=2,5$	1,4
Τετράγωνο	2,1
Ρόμβος	1,6

**Πίνακας 1** Συντελεστές σχημάτων κατά White

### 3. Πειραματική διαδικασία

#### 3.1 Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση του σχήματος μεσόβαθρου γέφυρας στην επιρροή και στην ένταση που προκαλεί στο φαινόμενο της τύρβης. Συγκεκριμένα εξετάζεται η κατανομή των ταχυτήτων κατακόρυφα και εγκάρσιως της διατομής του καναλιού, η ένταση της τύρβης και οι τυρβώδεις τάσεις που δημιουργούνται καθώς και η δύναμη αντίσταση που ασκεί το εμπόδιο στο νερό. Χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένη παροχή για την εύρεση των αποτελεσμάτων σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Οι θέσεις της οποίες έγιναν οι μετρήσεις ήταν τέσσερις σε απόσταση -30cm, +10cm, +20cm, +30cm από το μεσόβαθρο και σε κάθε θέση πάρθηκαν σε τέσσερα διαφορετικά βάθη οι εγκάρσιως τιμές.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (Αίθουσα «Γεώργιος Νουτσόπουλος») του Ε.Μ.Π. στο κτήριο Υδραυλικής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, υπό την εποπτεία της σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

##### 3.1.1 Περιγραφή της διώρυγας για την προσομοίωση της ροής

Η διώρυγα έχει μήκος 18m, σταθερή κατά μήκος ορθογωνική διατομή πλάτους 0,5m και ύψους 0,5m. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και γυαλί Ο πυθμένας είναι από plexiglass με κλίση 0,1% ενώ τα πλευρικά τοιχώματα είναι από γυαλί χωνευτό σε χαλύβδινες εσοχές, έτσι ώστε μήκος 10 cm από χάλυβα να διαδέχεται μήκος 1.30 m γυαλιού εναλλάξ. Τα πλευρικά τοιχώματα κάθετα στο επίπεδο του πυθμένα.

Στο ανάντη άκρο της διώρυγας, αμέσως μετά την είσοδο του νερού, είναι τοποθετημένη ειδική ξύλινη διάταξη με σκοπό τη μείωση των αναταράξεων και των κυματισμών στη ροή εξαιτίας της τροφοδοσία της διώρυγας με νερό.

Στο κατάντη άκρο είναι τοποθετημένος ένας υπερχειλιστής λεπτής στέψης από plexiglass για τον έλεγχο του βάθους και των συνθηκών ροής. Η αρχική του θέση είναι σε υψόμετρο 0 cm και υπάρχει η δυνατότητα αύξησης του ύψους του μέσω μιας χειρολαβής ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός έλεγχος στη ροή. Στα δικό μας πείραμα ο υπερχειλιστής βρίσκεται μόνιμα στη θέση +3cm καθώς έχουμε συγκεκριμένη παροχή και συνθήκες ροής

Η εκροή του καναλιού καταλήγει σε μια δεξαμενή συλλογής του νερού διαστάσεων 2.00x2.00x1.50 m. Το κανάλι αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να πραγματοποιείται ανακυκλοφορία του νερού μέσω της αντλίας και του αγωγού. Από τη δεξαμενή αντλείται νερό το οποίο εισάγεται στο ανάντη άκρο του καναλιού και στη συνέχεια αυτό υπερχειλίζει είτε ελεύθερα, είτε μέσω υπερχειλιστή λεπτής στέψης πάλι πίσω

στη δεξαμενή.



**Σχήμα 3.1** Διώρυγα και δεξαμενή

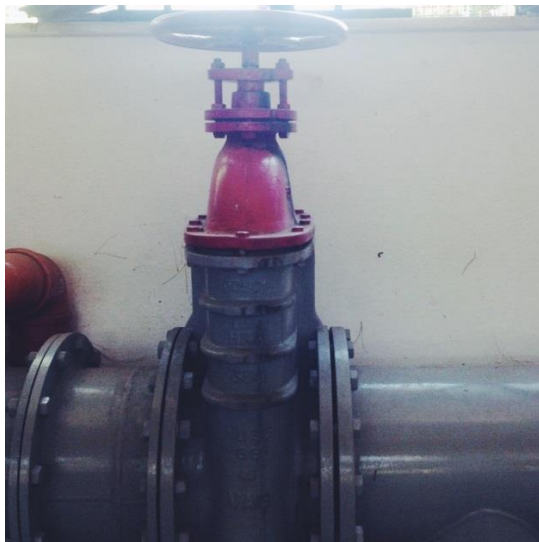
### 3.1.2 Τροφοδοσία διώρυγας

Η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται από τις δεξαμενές σταθερού φορτίου του εργαστηρίου με στάθμη σε ύψος 4 m περίπου σε σχέση με τον επίπεδο πυθμένα της διώρυγας, που τροφοδοτούνται με αντλία από τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού στο υπόγειο του εργαστηρίου. Από τις δεξαμενές σταθερού φορτίου με σωλήνα  $\Phi 350$  το νερό διέρχεται από συσκευή Venturi για τον προσδιορισμό της παροχής, απ' όπου εξέρχεται σε σωλήνα  $\Phi 250$  και από εκεί οδηγείται στη διώρυγα. Η τροφοδοσία της διώρυγας ελέγχεται με δύο δικλίδες.

Η πρώτη δικλείδα ανοίγεται τελείως, ενώ η δεύτερη δικλείδα βρίσκεται τοποθετημένη στην είσοδο του καναλιού χρησιμεύει για τη ρύθμιση της παροχής.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 3.2** (α) Αντλία εργαστηρίου (β) Δικλείδα ασφαλείας για σωλήνα  $\Phi 35$  (γ) Δικλείδα ασφαλείας για σωλήνα  $\Phi 50$

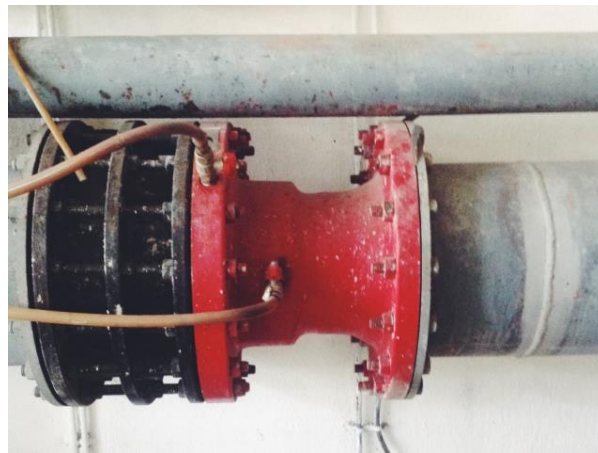


## 3.1.3 Μέτρηση της παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής Venturi τοποθετημένος οριζόντια στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας του εργαστηρίου με διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα (CCl<sub>4</sub>). Η παροχή προσδιοριζόταν από τη σχέση

$$Q=2.71776\sqrt{Dh'} \quad (3.1)$$

όπου Q η παροχή σε L/s και Δh η διαφορά στάθμης του μανομέτρου σε mm. Στη παρούσα εργασία η παροχή που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι σταθερή με Dh=227mm και άρα Q= 40.94L/s ή Q= 0.04094m<sup>3</sup>/s

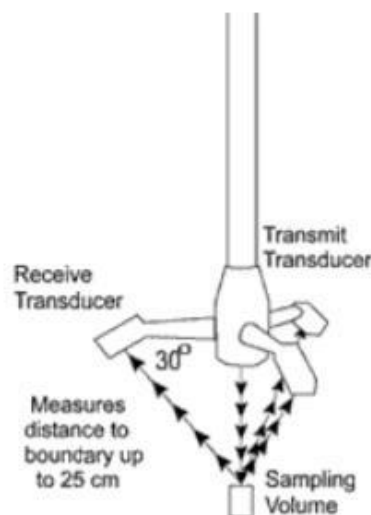


**Σχήμα 3.3** Παροχή Venturi (πάνω) και μανόμετρου εργαστηρίου (κάτω)

### 3.2 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

#### 3.2.1 Όργανο μέτρησης ταχυτήτων ADV

Για την μέτρηση των ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκε το όργανο ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Το Acoustic Doppler Velocimeter είναι όργανο μέτρησης και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας στο εργαστήριο, ή και στο πεδίο επειδή δεν παρουσιάζει ευαισθησία σε σχέση με την ποιότητα του νερού. Το ταχύμετρο αυτό χρησιμοποιεί τεχνικές αισθητήρων ήχου για μέτρηση της ροής σε όγκο ρευστού μακριά από τους αισθητήρες, με αποτέλεσμα να μη διαταράσσει το πεδίο ροής. Τα πειραματικά δεδομένα λαμβάνονται με ρυθμό 25 Hz, το δε μέτρο της ταχύτητας φθάνει τα 2.5 m/s. Ο ακουστικός αισθητήρας αποτελείται από έναν πομπό και τρεις δέκτες (βλ. σχήμα άνωθεν). Ο όγκος δειγματοληψίας (sampling volume) έχει διαστάσεις 9 mm ύψος και 3 mm πάχος. Η συχνότητα Doppler από την οποία υπολογίζεται η ταχύτητα οφείλεται στη σκέδαση του ήχου από μικροσωματίδια ή φυσαλίδες αέρα που μεταφέρει το νερό.



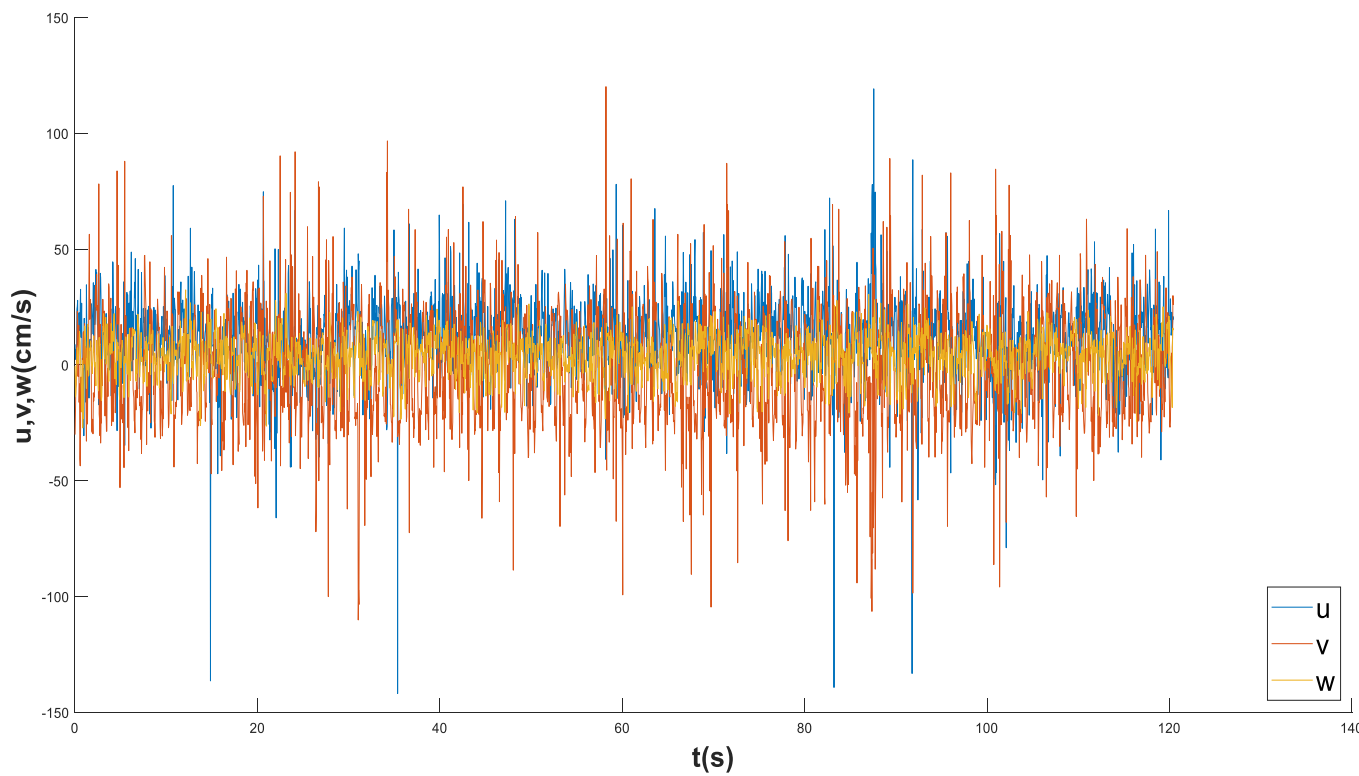
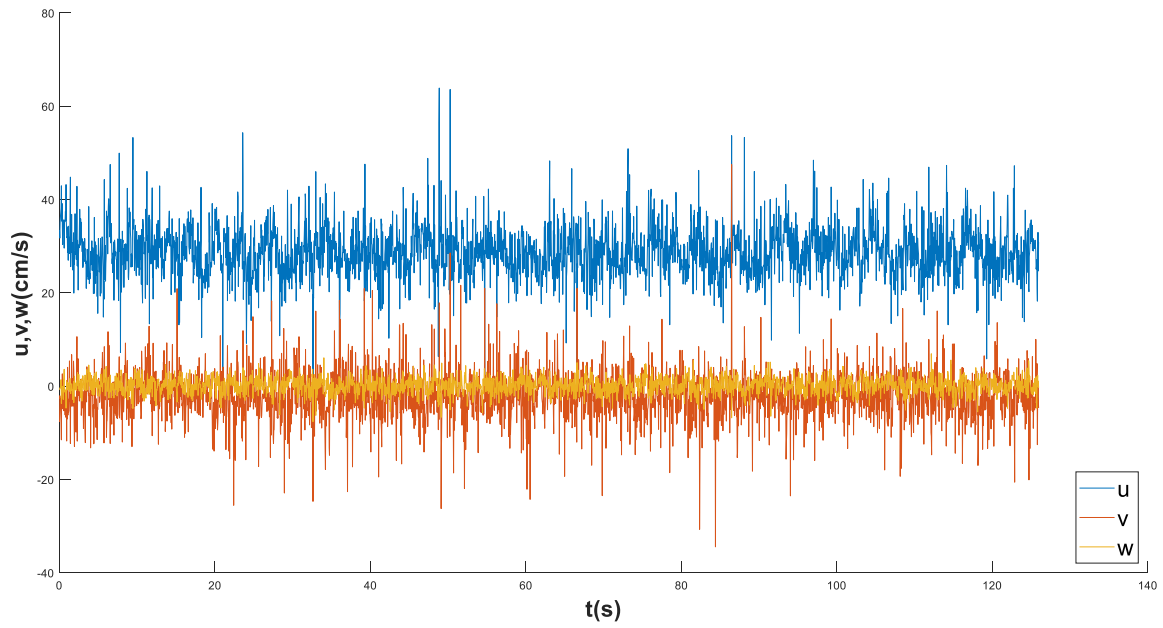
**Σχήμα 3.4** Τρόπος λειτουργίας του οργάνου ADV

Το ταχύμετρο ADV αποτελείται από τρία μέρη, από αριστερά: καλώδιο, αποκωδικοποιητής σήματος, αισθητήρας μέτρησης. Τα πειραματικά δεδομένα από τρία κανάλια οδηγούνται στον υπολογιστή για καταγραφή με ρυθμό 25 Hz.



**Σχήμα 3.5** Απεικόνιση του οργάνου





Σχήμα 3.6 Παράδειγμα μέτρησης σε σημείο με μικρή αναταραχή (πάνω) και με μεγάλη αναταραχή (κάτω)

### 3.2.2 Μεσόβαθρα και θέσεις μετρήσεις

Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επιρροή του σχήματος του βάρους, επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές διατομές βάρων (με τα εξής χαρακτηριστικά:

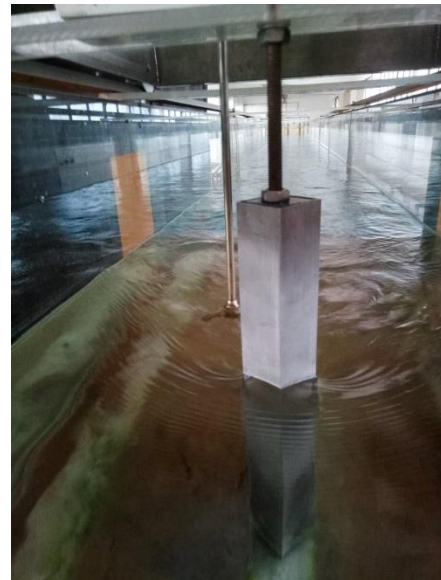
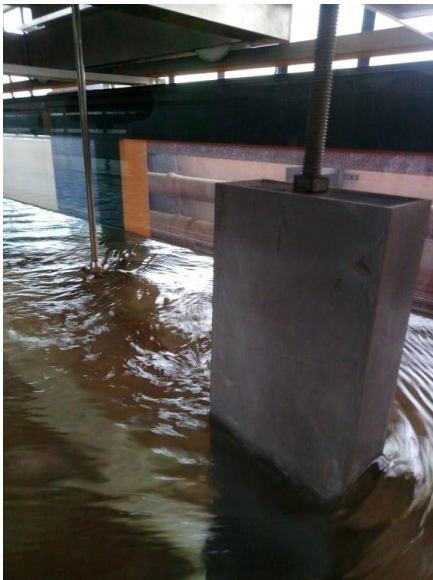
(α) τετραγωνική διατομή με μήκος  $D=4.00\text{cm}$  (λόγος πλευρών  $L/D=1$ )

(β) ρομβοειδής διατομή με διαγώνιο ίση με  $D=5.66\text{cm}$  (ουσιαστικά είναι η τετραγωνική στραμμένη κατά  $45^\circ$ )

(γ) κυλινδρική διατομή διαμέτρου  $D=5.00\text{ cm}$

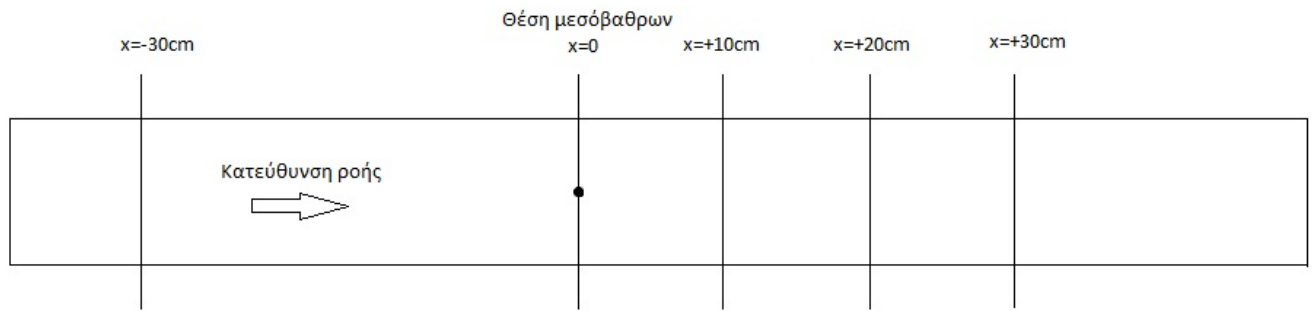
(δ) ορθογωνική διατομή διαστάσεων πλάτους  $D=3.00\text{ cm}$  και μήκους  $L=6.00\text{cm}$  (λόγος πλευρών  $L/D=2$ )

(ε) ορθογωνική διατομή διαστάσεων πλάτους  $D=4.00\text{cm}$  και μήκους  $L=10.0\text{ cm}$  (λόγος πλευρών  $L/D=2.5$ )



**Σχήμα 3.7** Παραδείγματα βάρων που χρησιμοποιήθηκαν

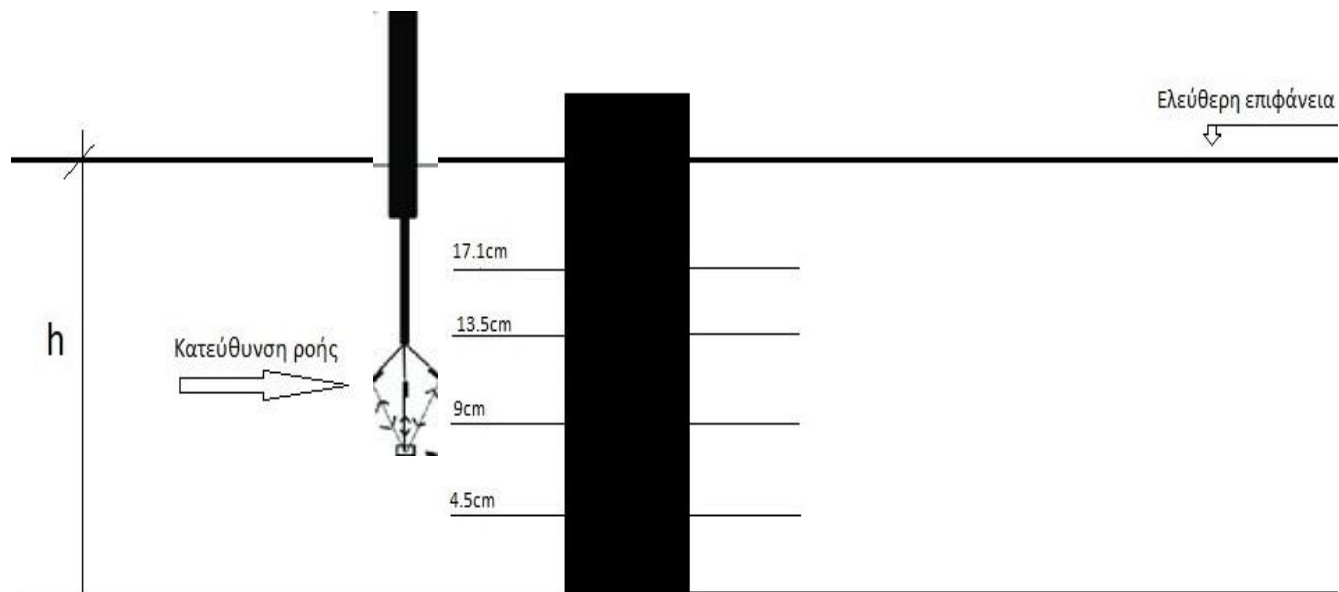
Τα μεσόβαθρα τοποθετούνται στη μέση του καναλιού, δηλαδή ο άξονας του κέντρου βάρους τους να απέχει 25cm από το δεξιό και αριστερό τοίχωμα, διότι εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες οπότε μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη διαταραχή της ροής. Οι μετρήσεις γίνονται σε τέσσερις διαφορετικές διατομές, μια ανάντη σε απόσταση 30 εκατοστά και σε τρεις κατάντη σε απόσταση 10,20 και 30 εκατοστά. Οι θέσεις αυτές επιλέχθηκαν για να συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά της ροής πριν συναντήσει το εμπόδιο και σε τρεις θέσεις μετά για να μελετήσουμε την απόσβεση του φαινομένου της τύρβης αφού έχει διαταραχθεί η ροή



**Σχήμα 3.8** Θέση βάθρου και μετρήσεων στη διώρυγα

Εφόσον έχουμε σταθερή παροχή το ομοιόμορφο βάθος είναι σταθερό σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Μετρήθηκε ίσο με  $H=22.5\text{cm}$ .

Σε κάθε μία από τις παραπάνω διατομές μετρούνται σε τέσσερα διαφορετικά βάθη οι κατά μήκος ταχύτητες της ροής ενώ υπολογίζεται και το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας στη μέση του καναλιού. Τα βάθη που επιλέχθηκαν είναι 20%, 40%, 60% και 80% του ομοιόμορφου βάθους δηλαδή 4.5, 9, 13.5 και 17.1 εκατοστά αντίστοιχα. Κανονικά οι υπολογισμοί θα έπρεπε να γίνουν στα 18 εκατοστά και κοντά στην επιφάνεια. Δυστυχώς όμως το όργανο ADV λόγω της τεχνολογίας με την οποία λειτουργεί δεν μπορεί στο συγκεκριμένο βάθος του πειράματος να δώσει μετρήσεις πάνω από 17,1 εκατοστά.



**Σχήμα 3.9** Καθ' ύψος μετρήσεις σε κάθε θέση του βάθρου

Θέτοντας ως σημείο αναφοράς 0 τον κεντρικό άξονα των μεσόβαθρων, οι μετρήσεις εγκαρσίως της διατομής και στα κατάντη της ροής, πραγματοποιήθηκαν κατά 0,5 εκατοστό εκατέρωθεν του άξονα μέχρι τα 4 εκατοστά, κατά ένα εκατοστό μέχρι τα 8 εκατοστά και κατά 2 εκατοστά από εκεί και έπειτα. Αυτό έγινε διότι ακριβώς πίσω

από το εμπόδιο η αναταραχή της ροής είναι πολύ μεγάλη και είναι σημαντική η καταγραφή όλο και περισσότερων μετρήσεων της ταχύτητας για την ακριβέστερη περιγραφή του φαινομένου της τύρβης.

Οι μετρήσεις στα κατακόρυφα προφίλ της ταχύτητας έγιναν και ανάντη και κατόντη ανά ένα εκατοστό από το πυθμένα μέχρι τα 17,1 εκατοστά.

## 4. Ανάλυση και Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας σταθερή παροχή  $Q = 40.94 \text{ L/s}$ , όπου βάσει αυτής της παροχής προκύπτει αριθμός Reynolds=40825 και αριθμό Froude,  $Fr=0.327$ .

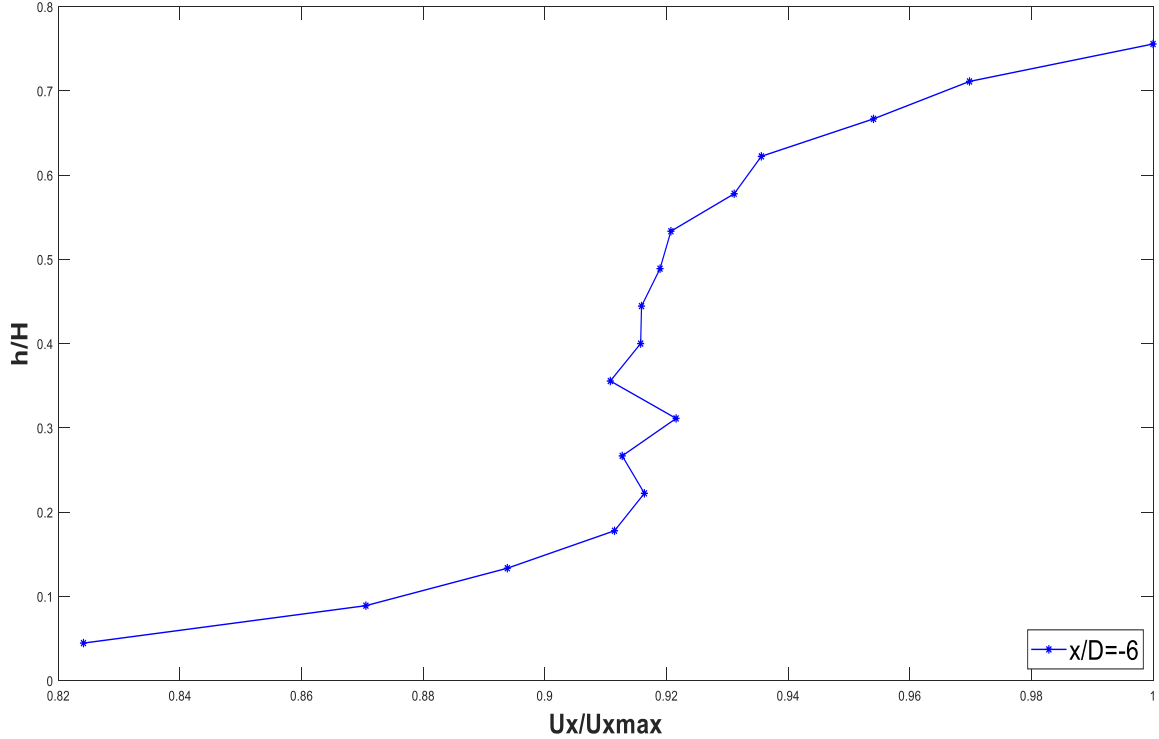
Η επίλυση γίνεται με βάση τις ταχύτητες που μετρήθηκαν σε διαφορετικά σημεία με το όργανο ADV. Το όργανο σε κάθε σημείο μετρούσε επί δύο λεπτά, δηλαδή περίπου 3000 μετρήσεις για τις ταχύτητες  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ούτως ώστε να υπάρχει ικανοποιητικός όγκος μετρήσεων για να αποφευχθεί η πιθανή λανθασμένη εκτίμηση των μέσων τιμών τους ιδιαίτερα σε περιοχές αμέσως μετά το μεσόβαθρο όπου η ροή μόλις έχει συναντήσει το εμπόδιο και υπάρχει μεγάλη αναταραχή. Γίνεται στατιστική ανάλυση για το κάθε σημείο (μέσες τιμές, τυπική απόκλιση) από όπου εφαρμόζοντας του τύπους που προαναφέρθηκαν προκύπτουν τα προφίλ των ταχυτήτων οριζοντίως και καθέτως και κατ'επέκταση οι τυρβώδεις τάσεις, η ένταση της τύρβης, η δύναμη και ο συντελεστής αντίστασης για τα πέντε διαφορετικά σχήματα μεσόβαθρων που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα ευρέθησαν χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Στις εγκάρσιες μετρήσεις παρατηρήθηκε πως δεν υπάρχει συμμετρία στις κατά μήκος ταχύτητες. Συγκεκριμένα στα αριστερά κατά τη διεύθυνση της ροής οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες από ότι στα δεξιά. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε ελαφριά κλίση που μπορεί να έχει πάρει ο πυθμένας της διώρυγας.

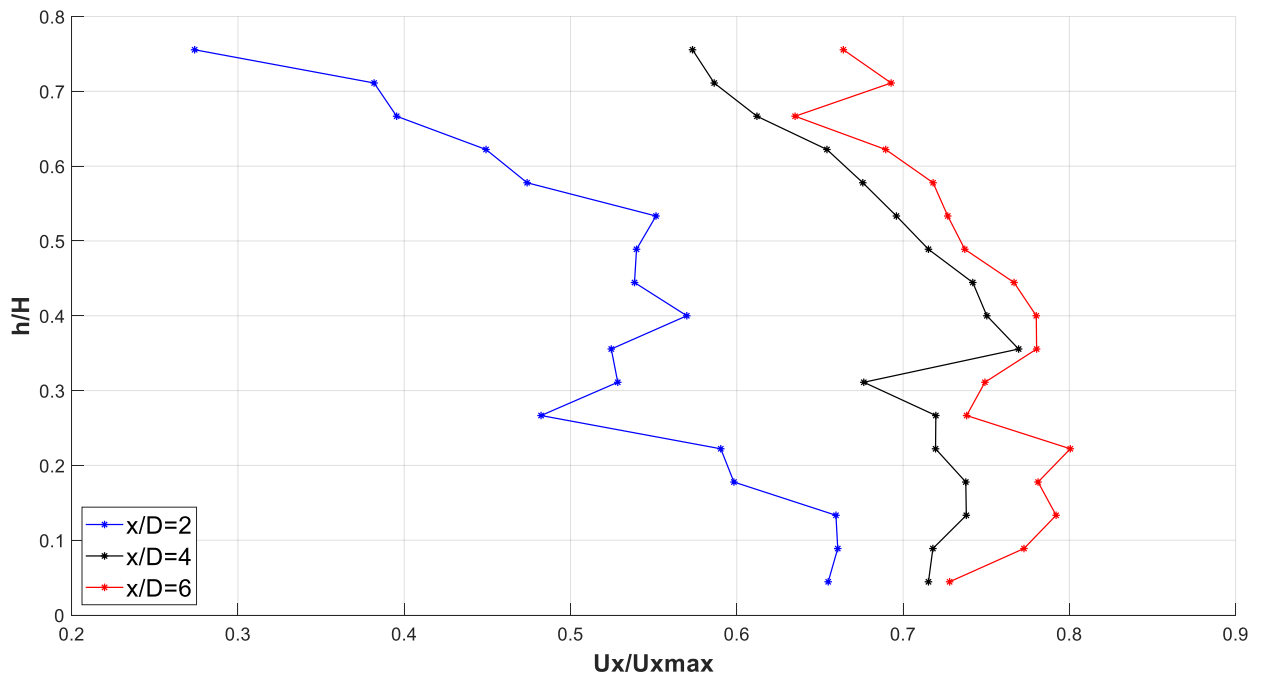
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα είναι σε αδιαστατοποιημένη μορφή έτσι ώστε να είναι εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

### 4.1 Κατανομές ταχυτήτων στην διεύθυνση x

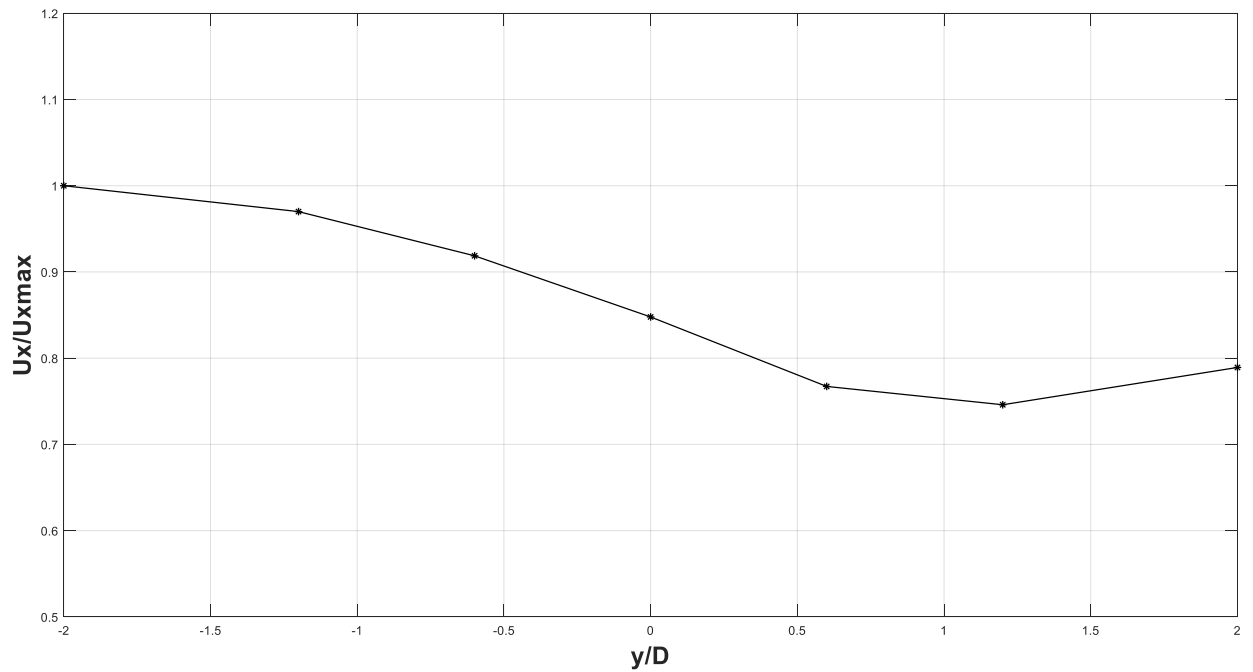
#### 4.1.1 Κύλινδρος διαμέτρου D=5cm



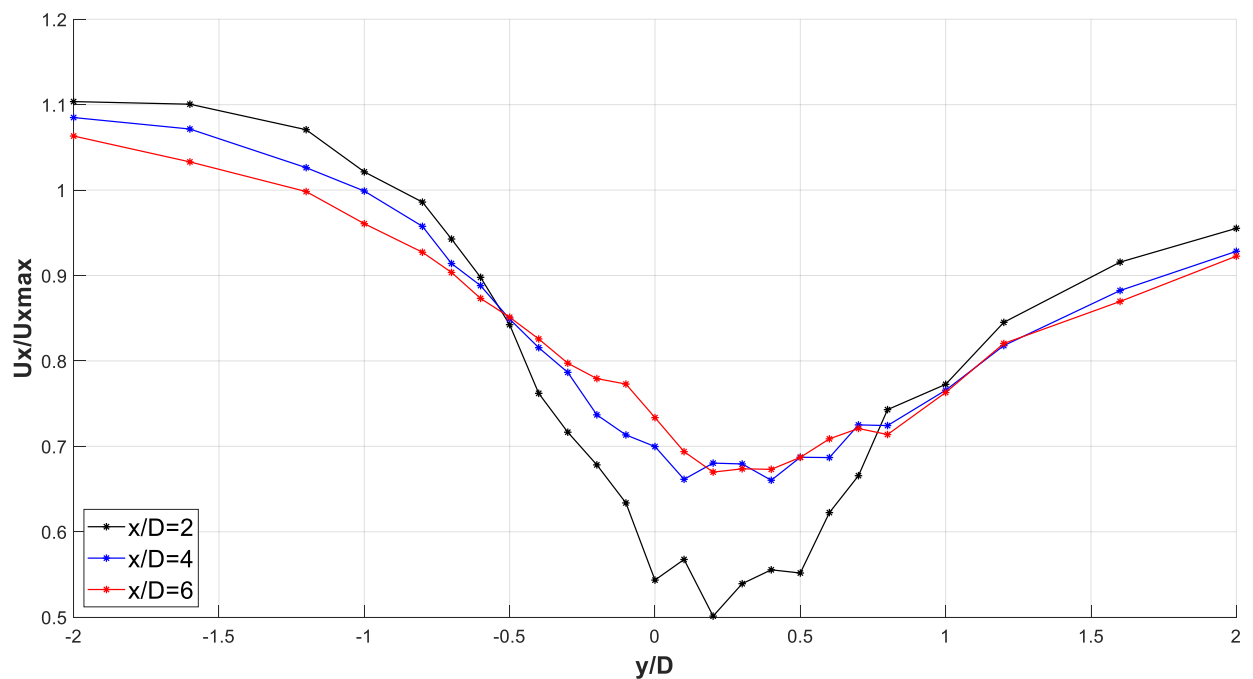
**Σχήμα 4.1** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητα σε απόσταση 30cm ( $x/D=-6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής



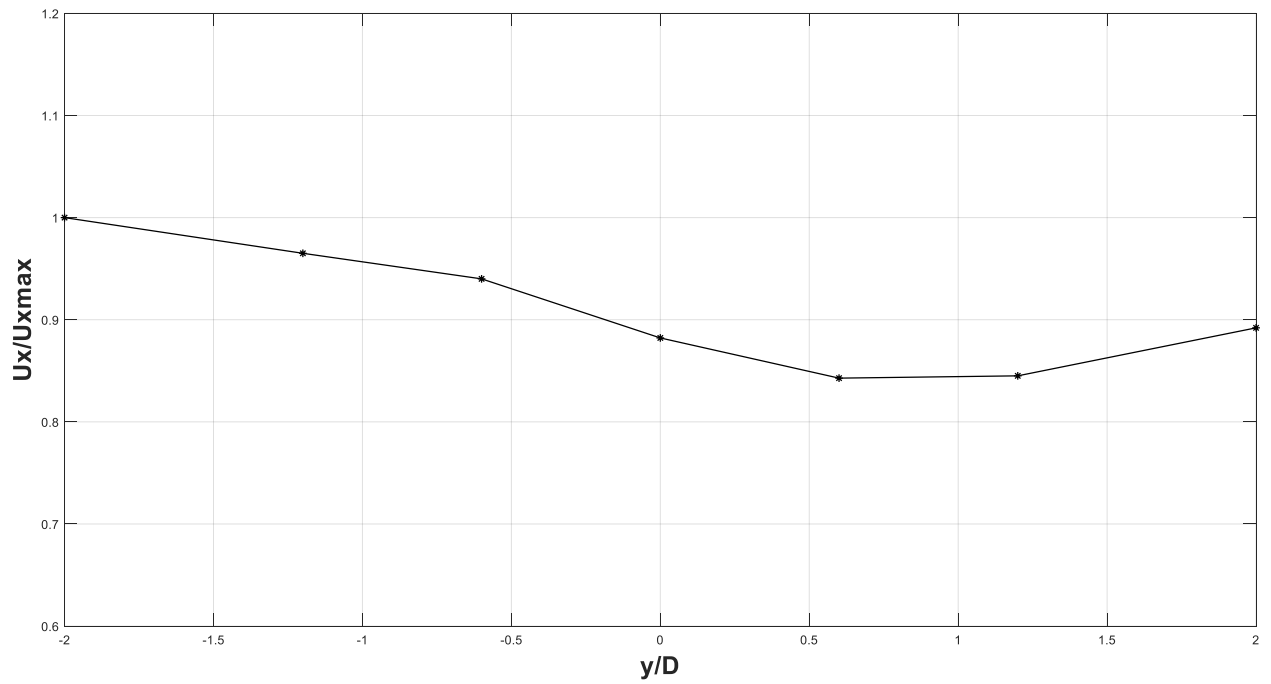
**Σχήμα 4.2** Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής



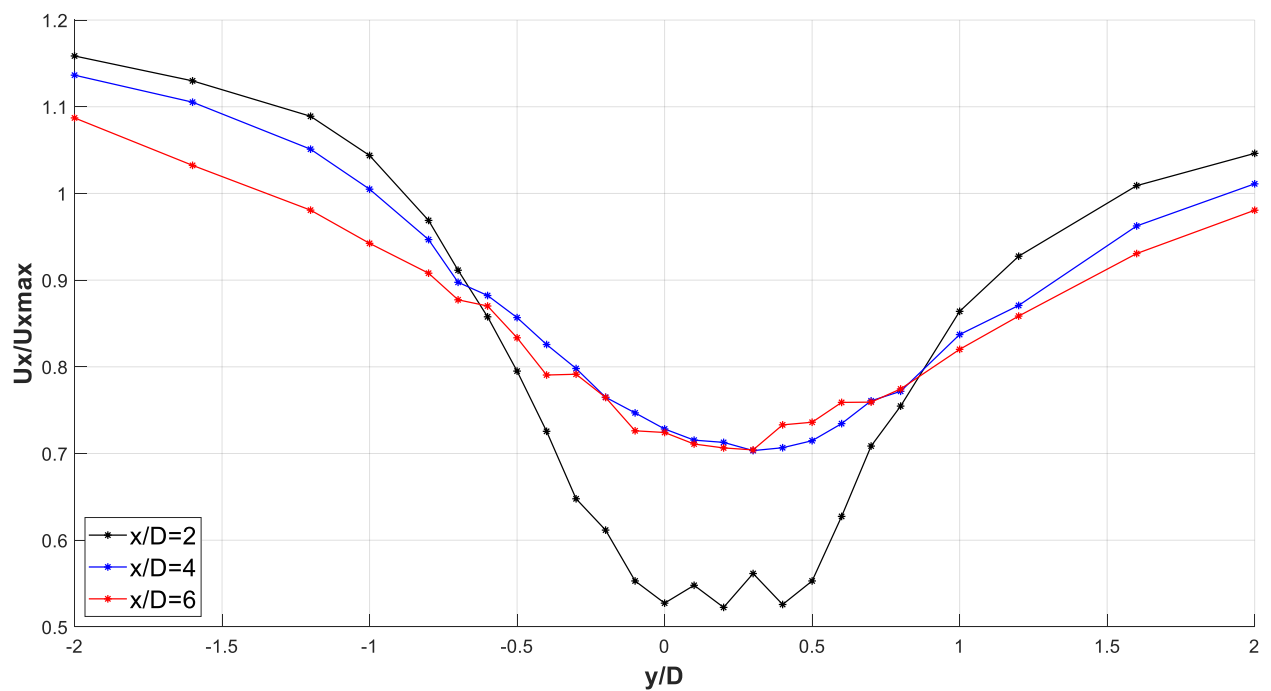
**Σχήμα 4.3** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε ύψος 4,5cm σε απόσταση 30cm ( $x/D=-6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής.



**Σχήμα 4.4** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm

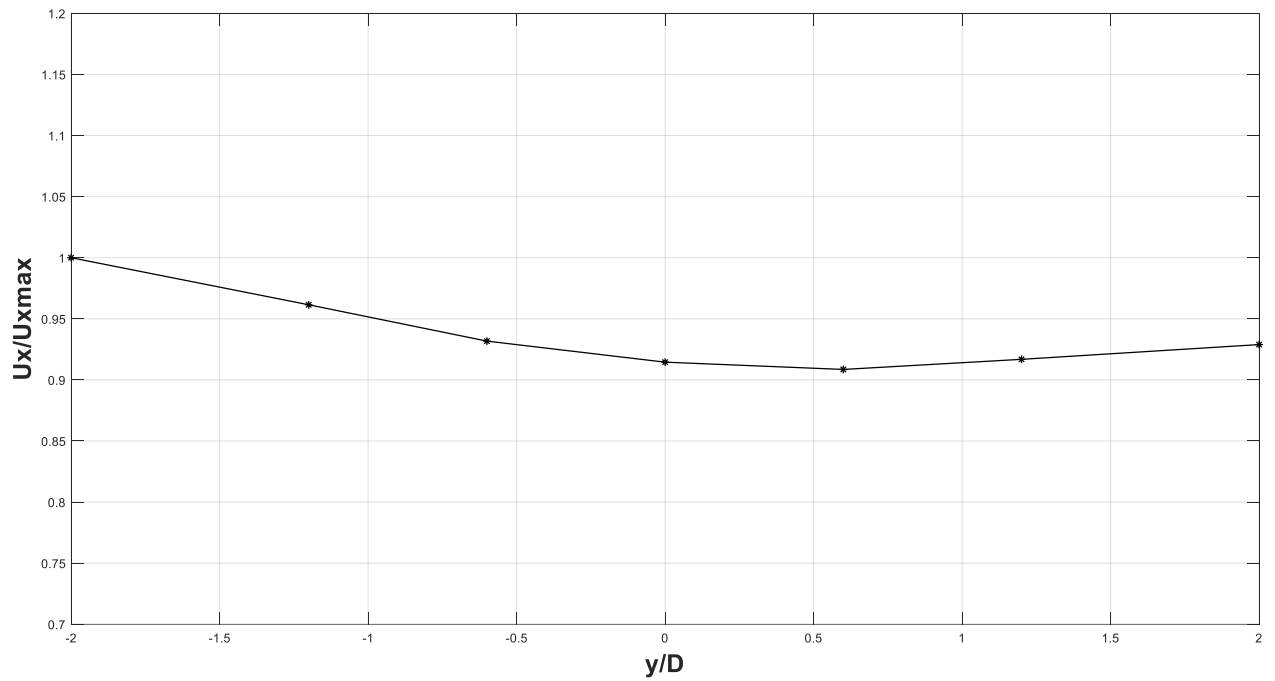


**Σχήμα 4.5** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

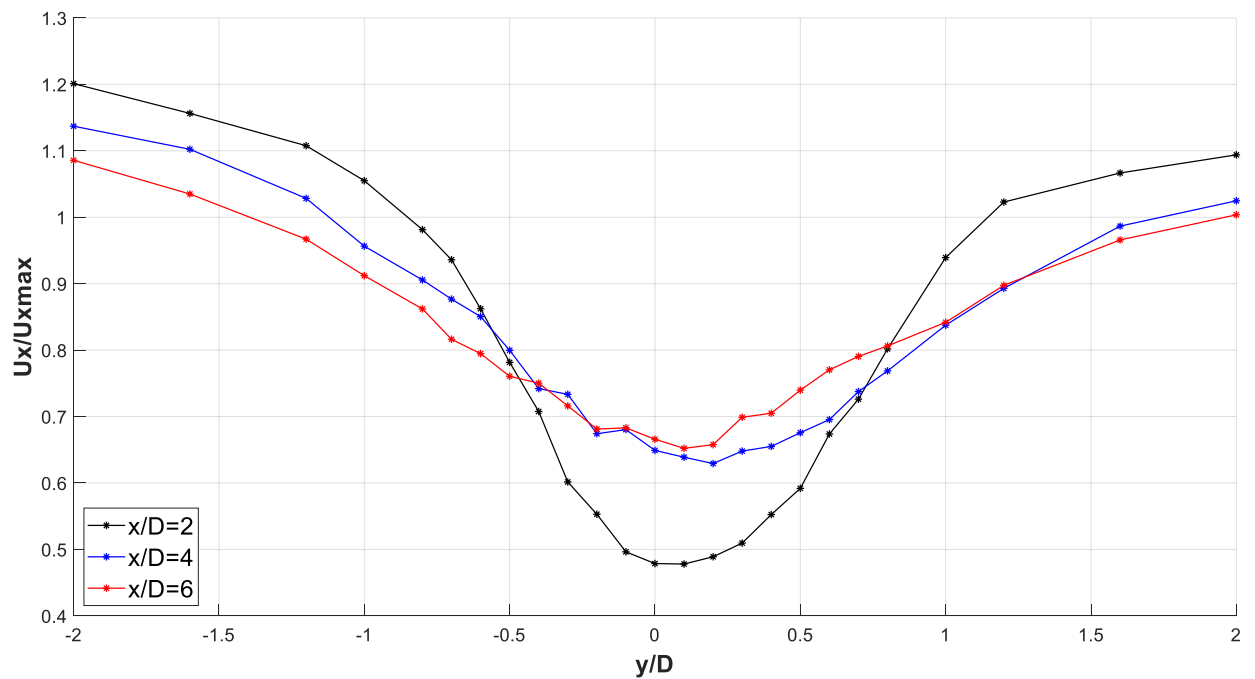


**Σχήμα 4.6** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

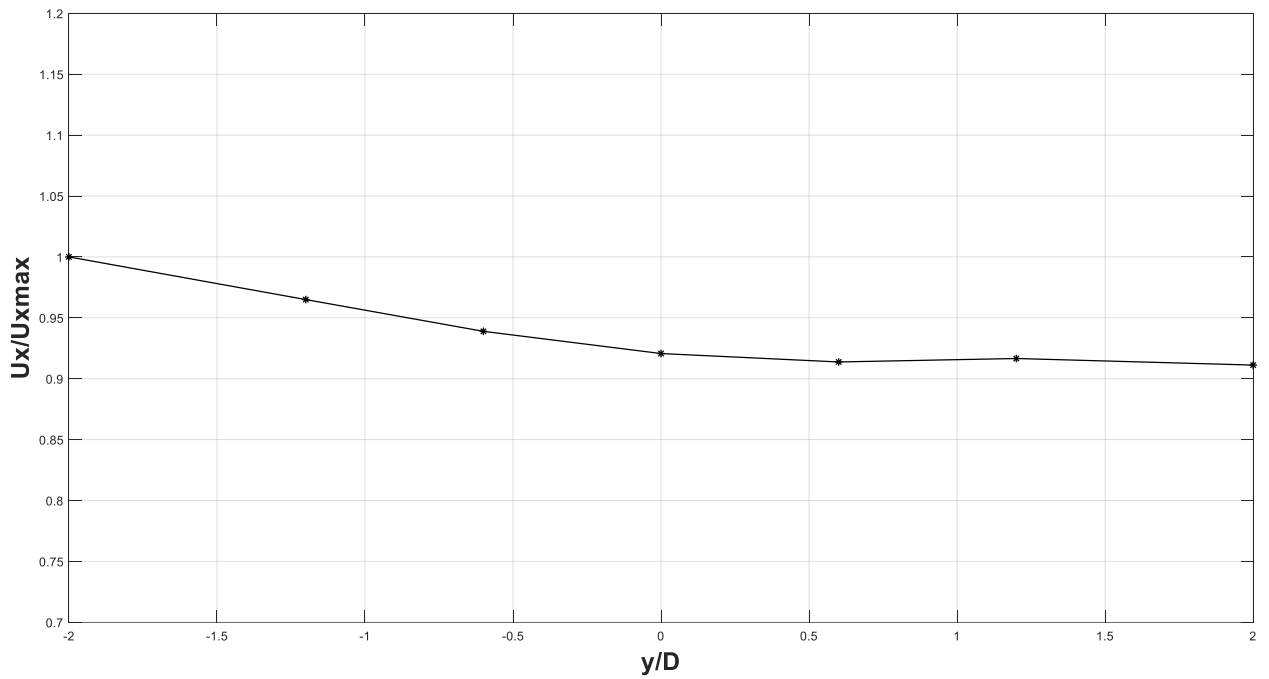




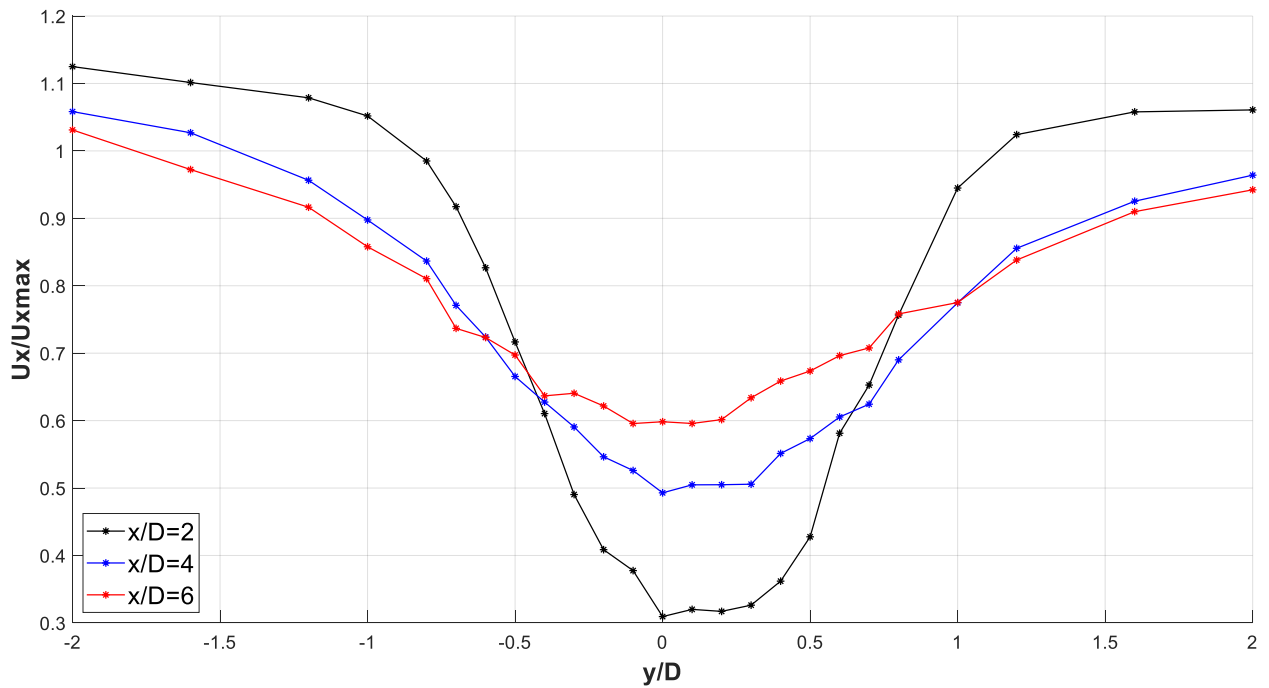
**Σχήμα 4.7** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13,5cm



**Σχήμα 4.8** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

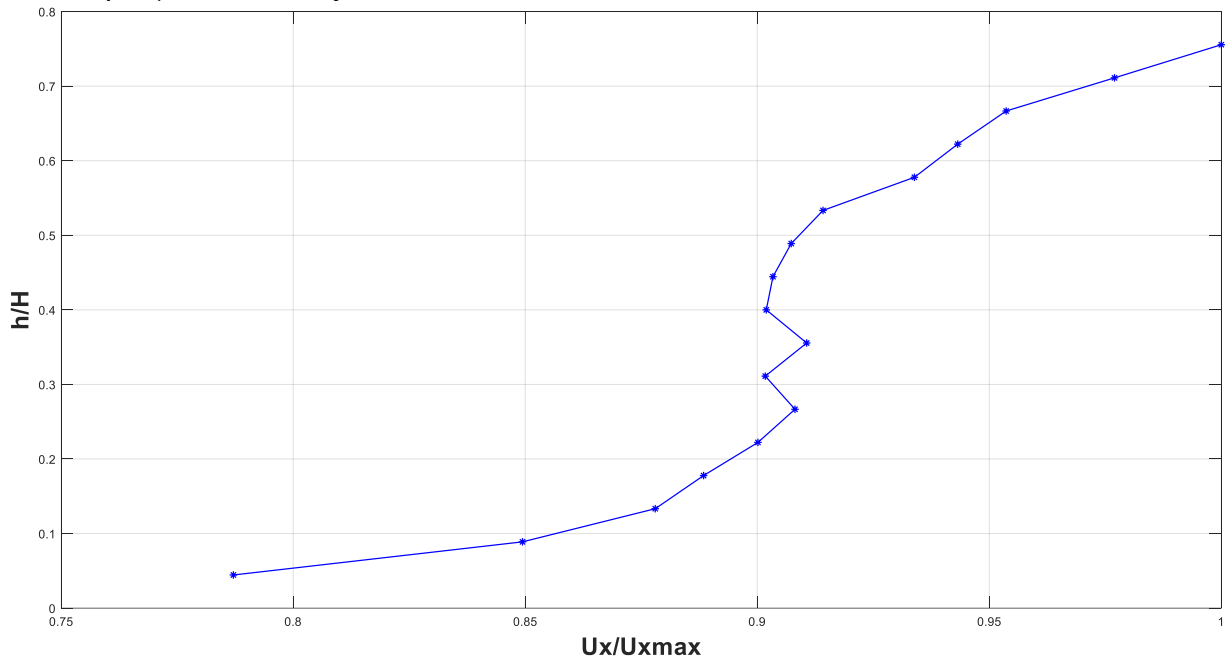


**Σχήμα 4.9** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-6$ ) ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

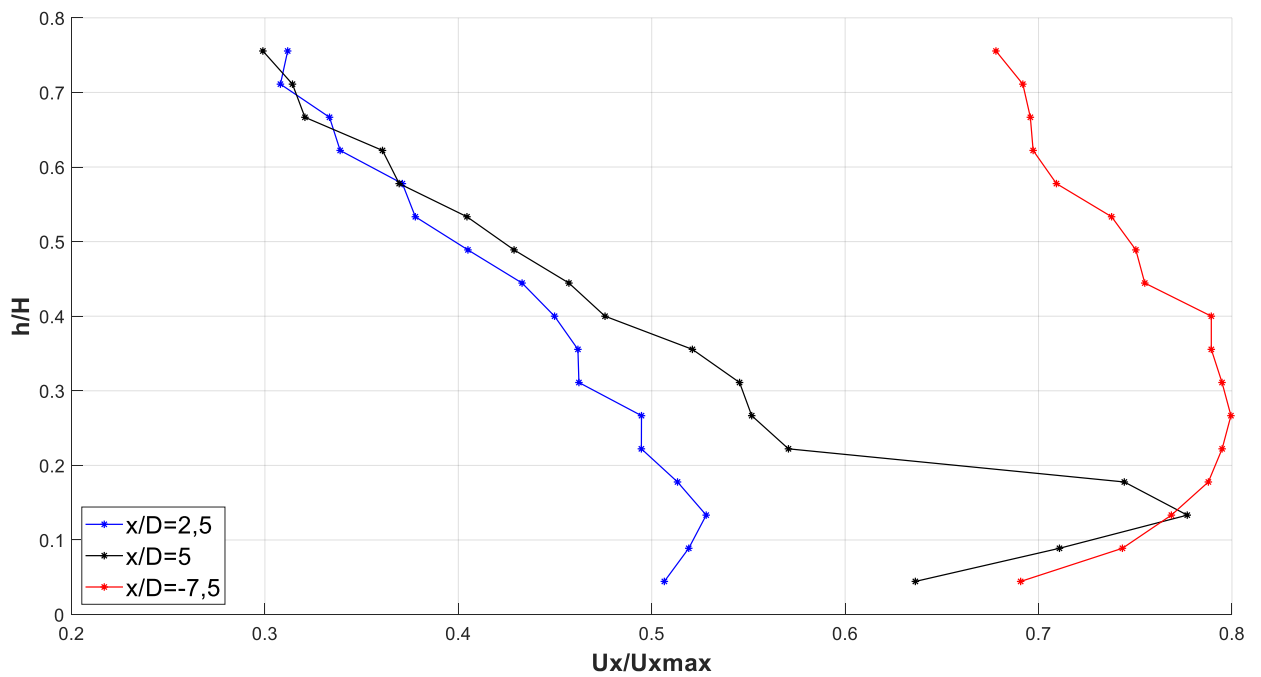


**Σχήμα 4.10** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη της κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

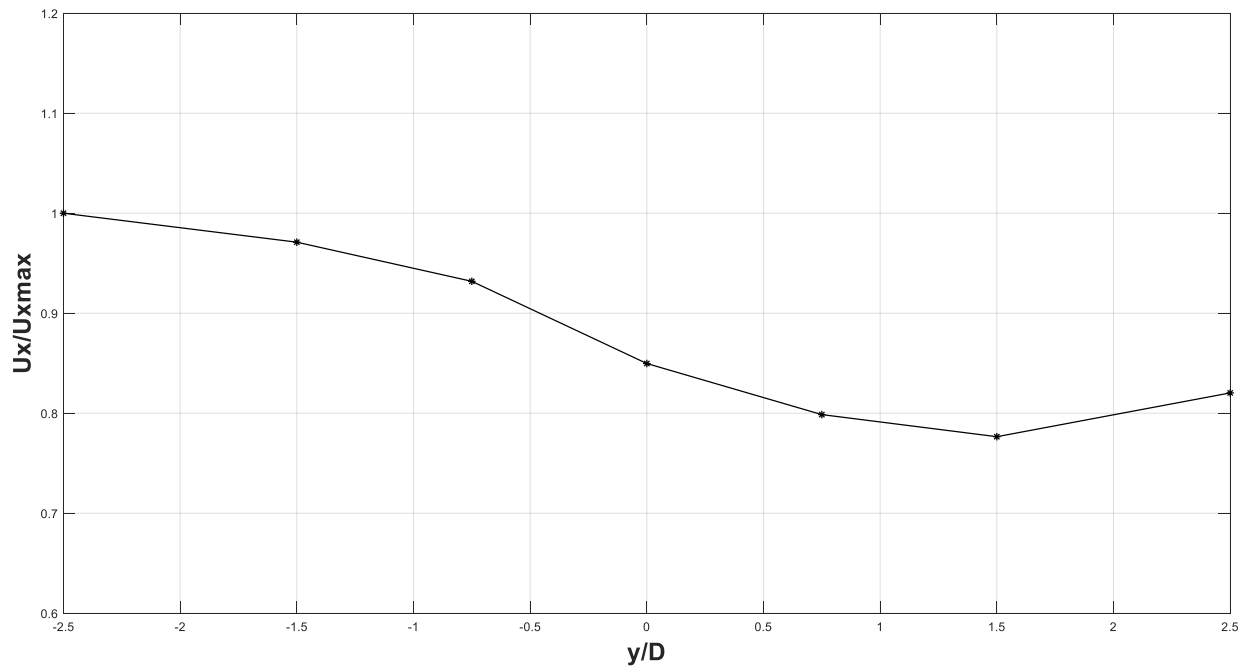
4.1.2 Ορθογώνιο πλάτους  $D=4\text{cm}$  και  $L=10\text{cm}$  ( $L/D=2.5$ )



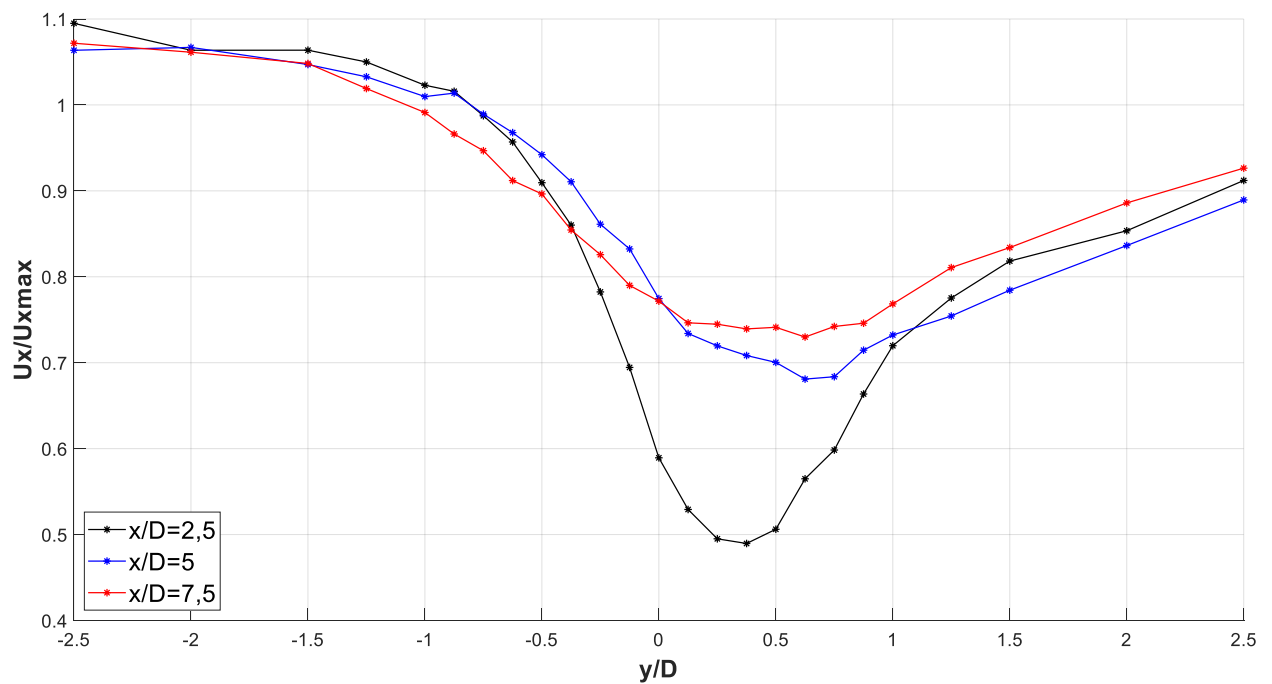
**Σχήμα 4.11** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7,5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10



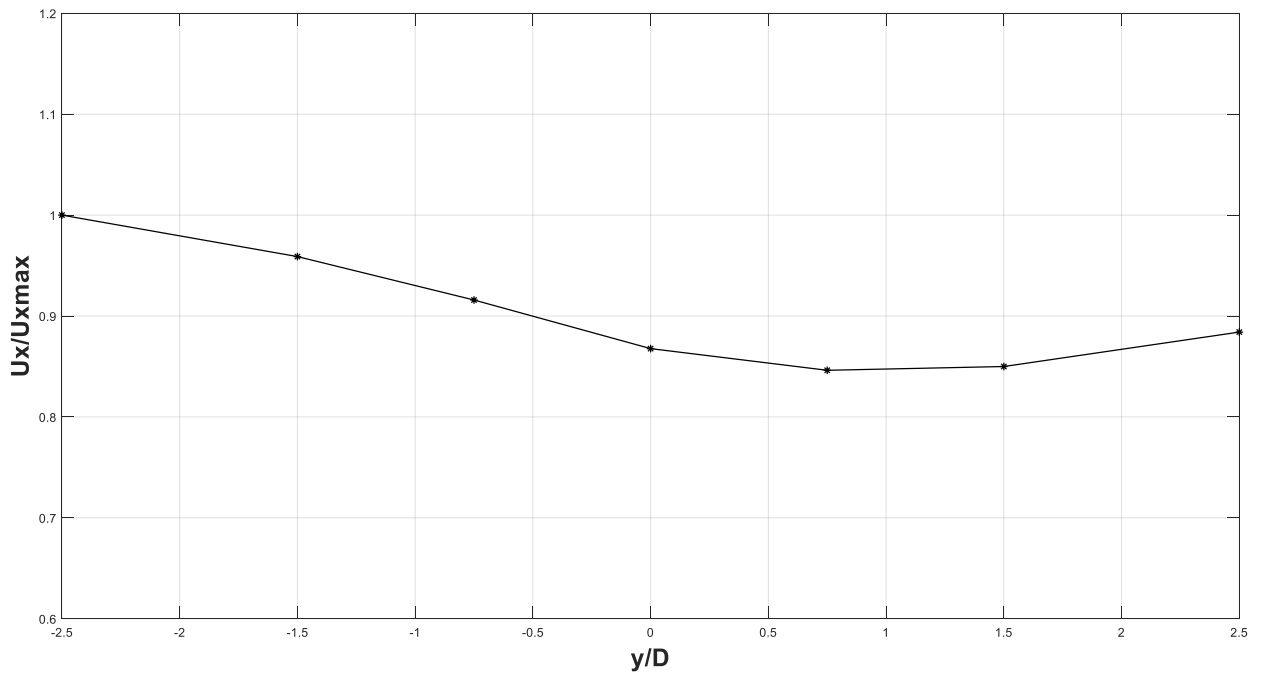
**Σχήμα 4.12** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm



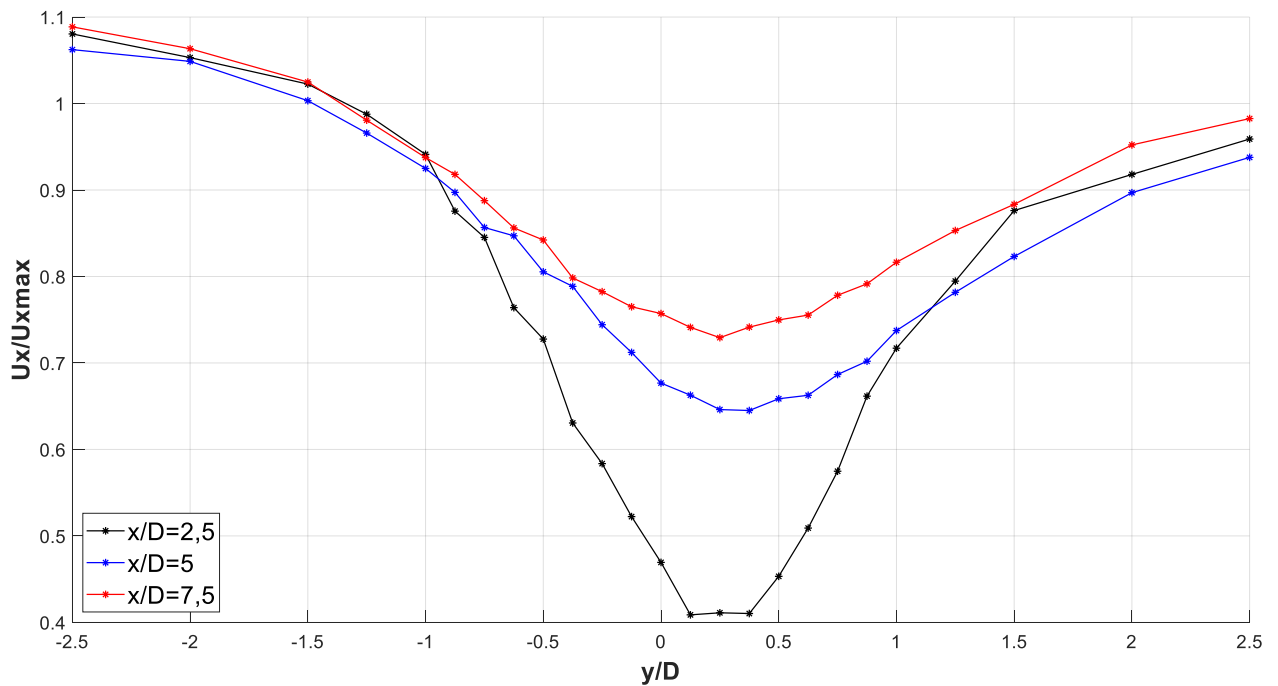
**Σχήμα 4.13** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm



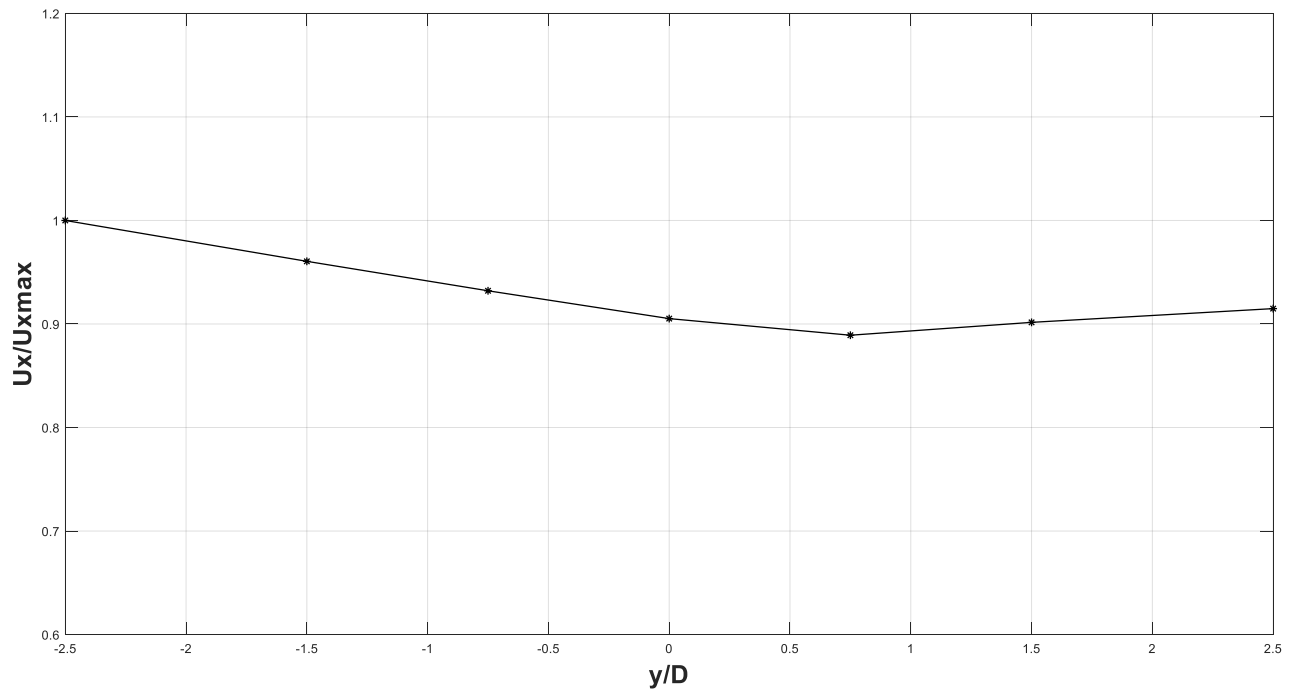
**Σχήμα 4.14** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm



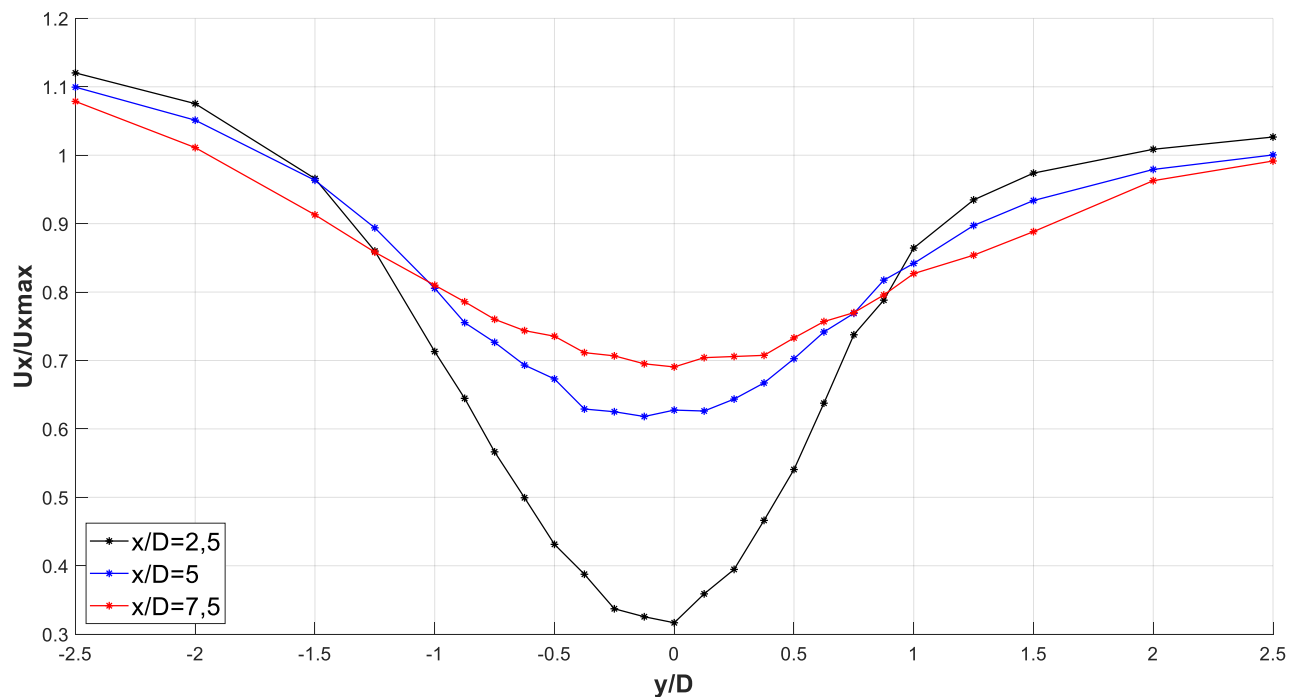
**Σχήμα 4.15** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



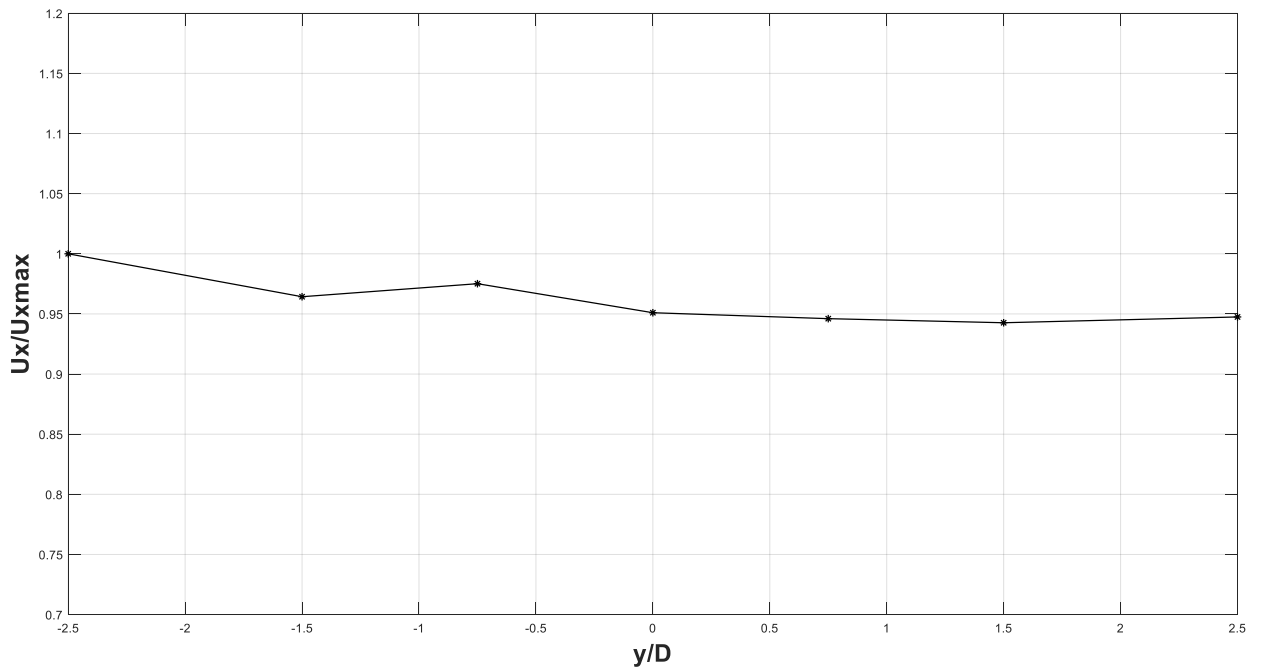
**Σχήμα 4.16** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



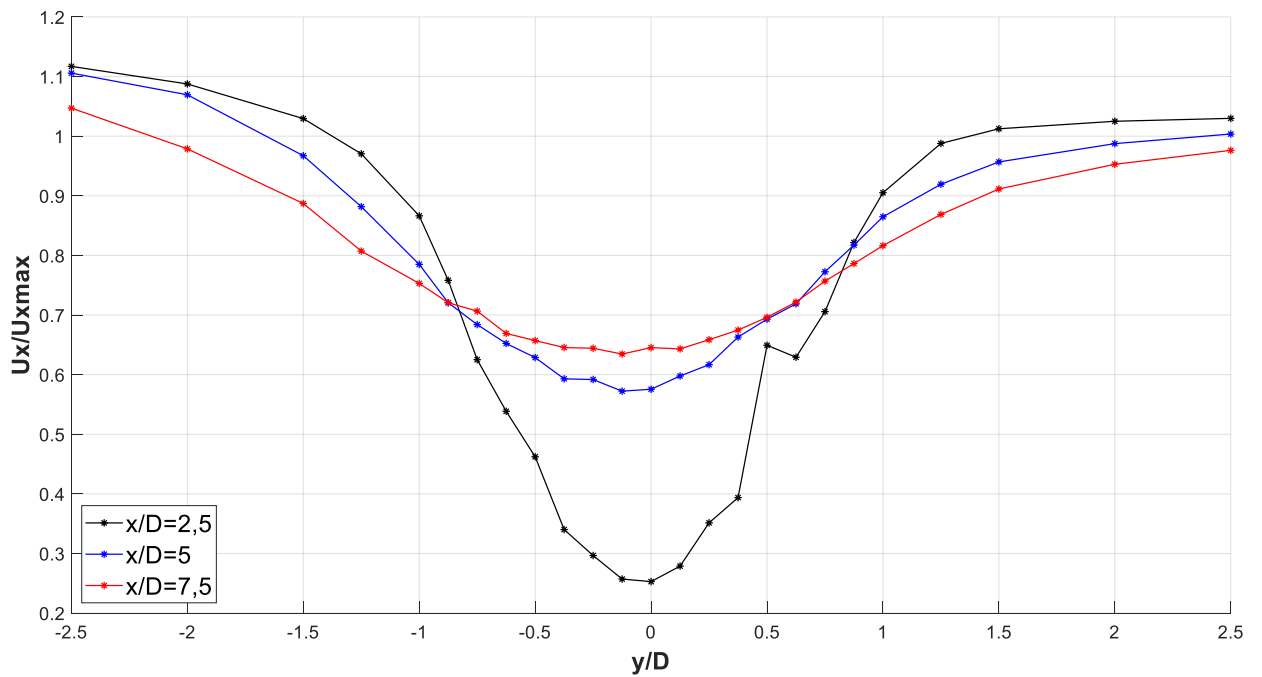
**Σχήμα 4.17** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13,5cm



**Σχήμα 4.18** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

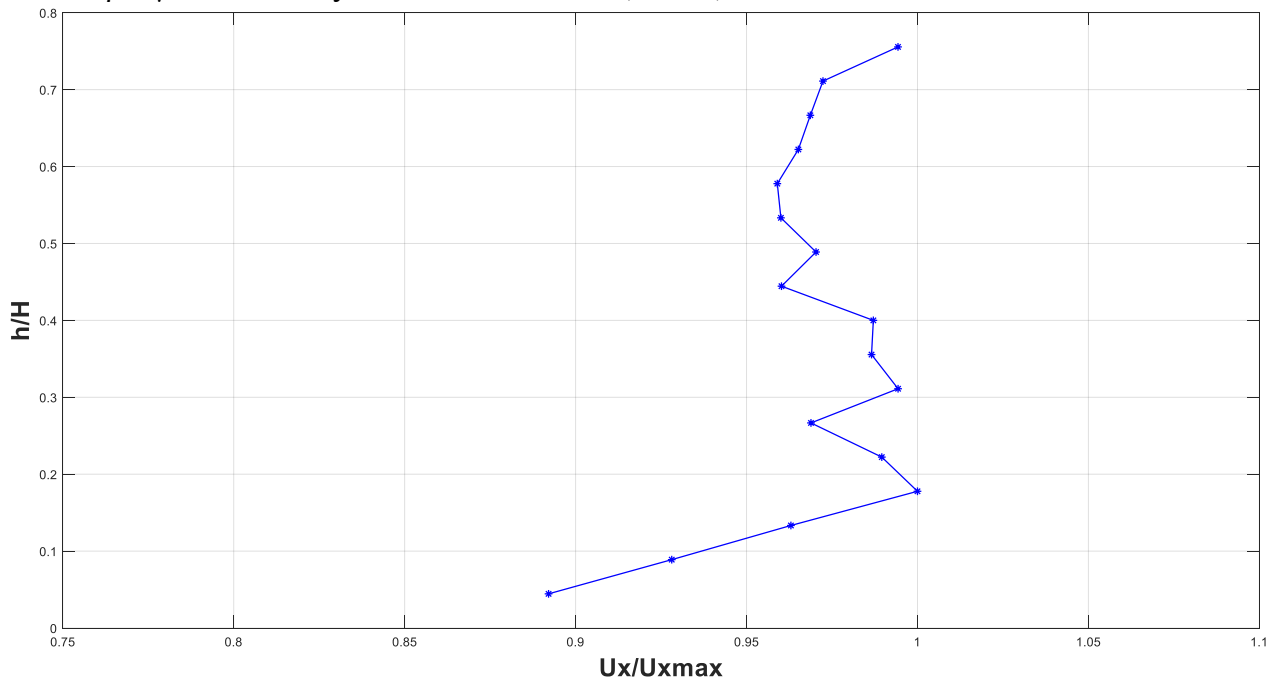


**Σχήμα 4.19** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7.5$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

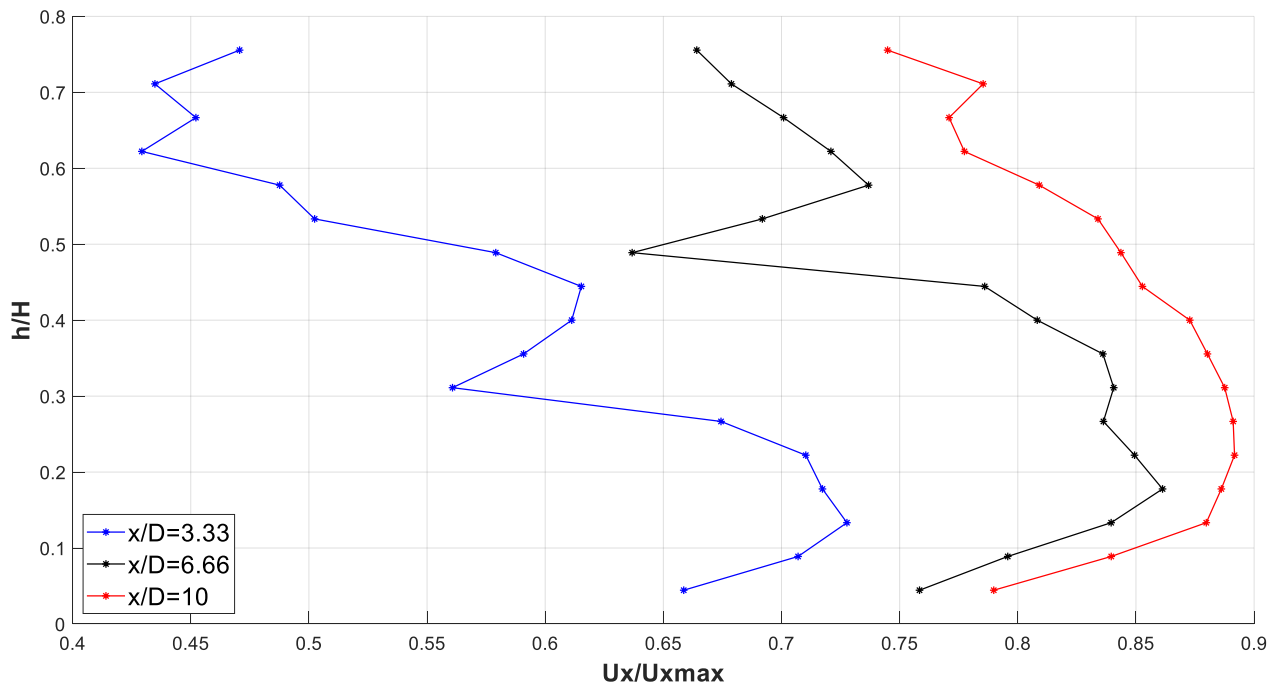


**Σχήμα 4.20** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

4.1.3 Ορθογώνιο πλάτους  $D=3\text{cm}$  και  $L=10\text{cm}$  ( $L/D=2$ )

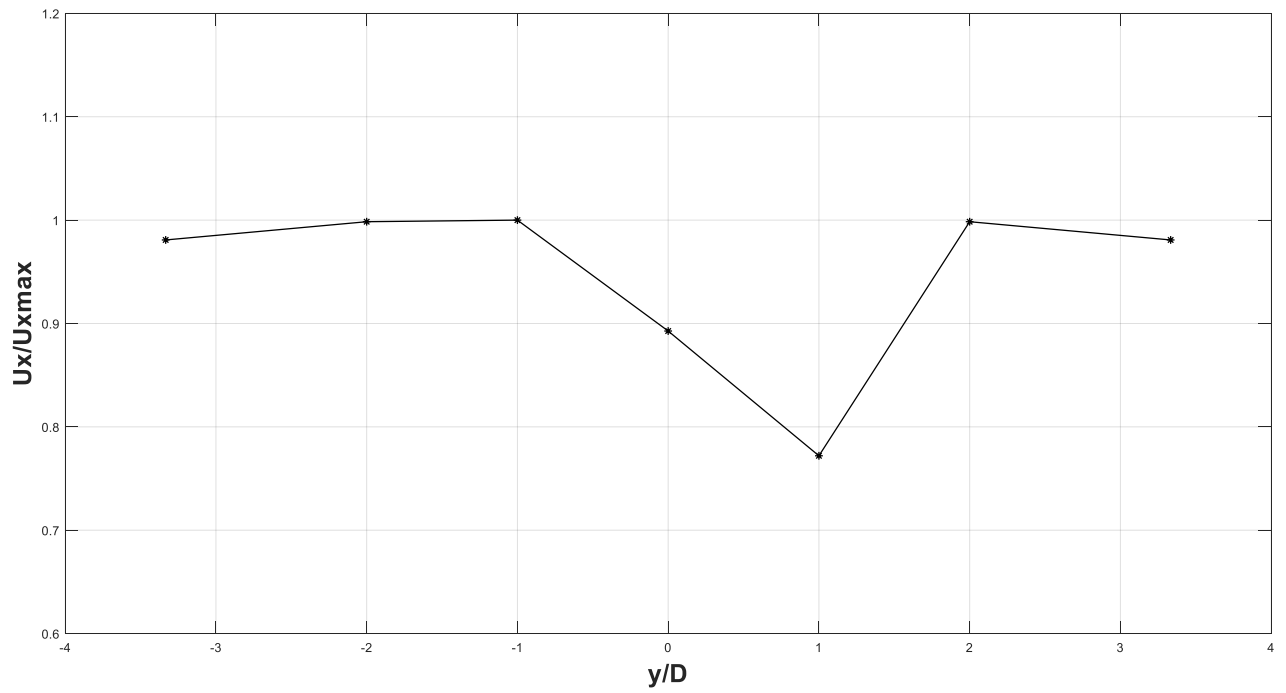


**Σχήμα 4.21** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=10$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής  $3 \times 10$

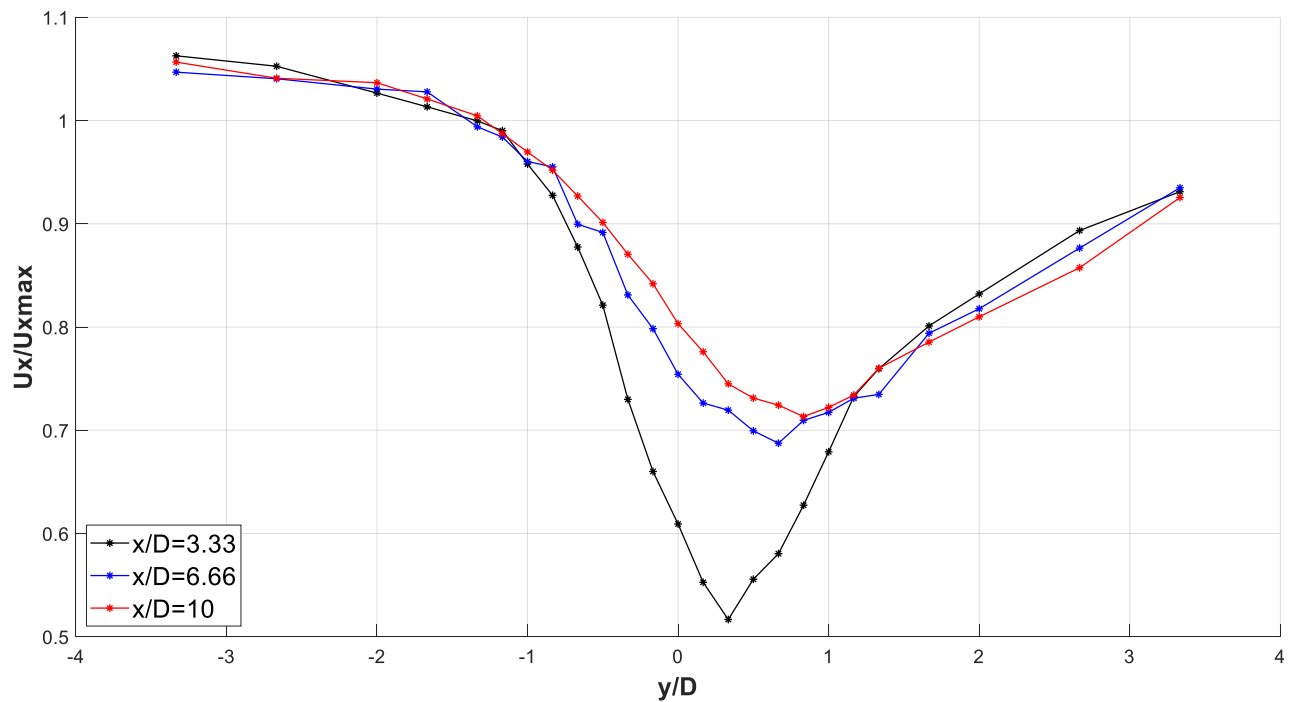


**Σχήμα 4.22** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής  $3 \times 6$

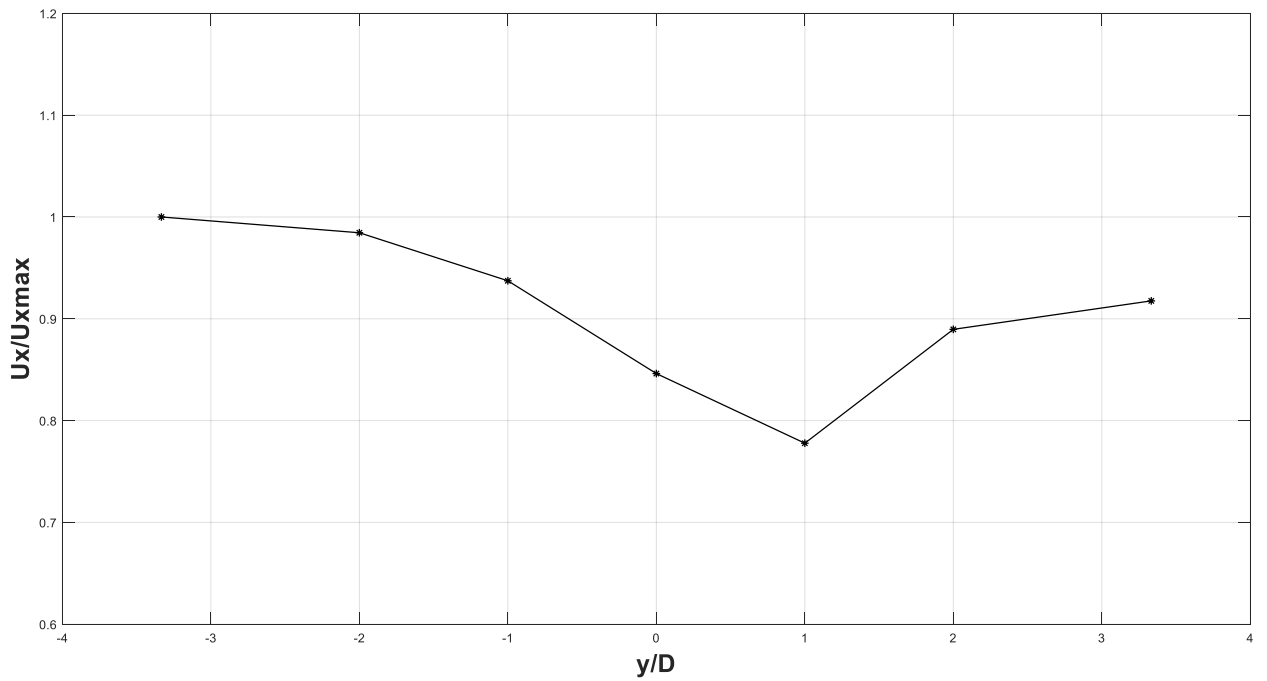




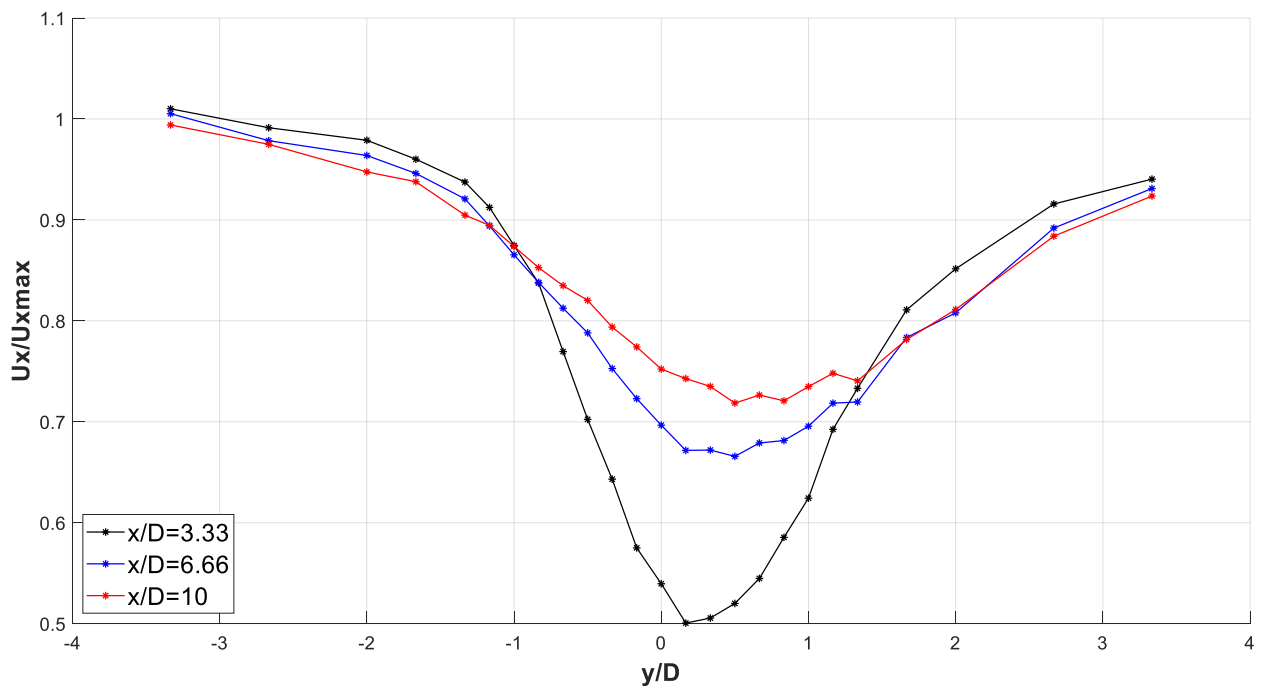
**Σχήμα 4.23** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



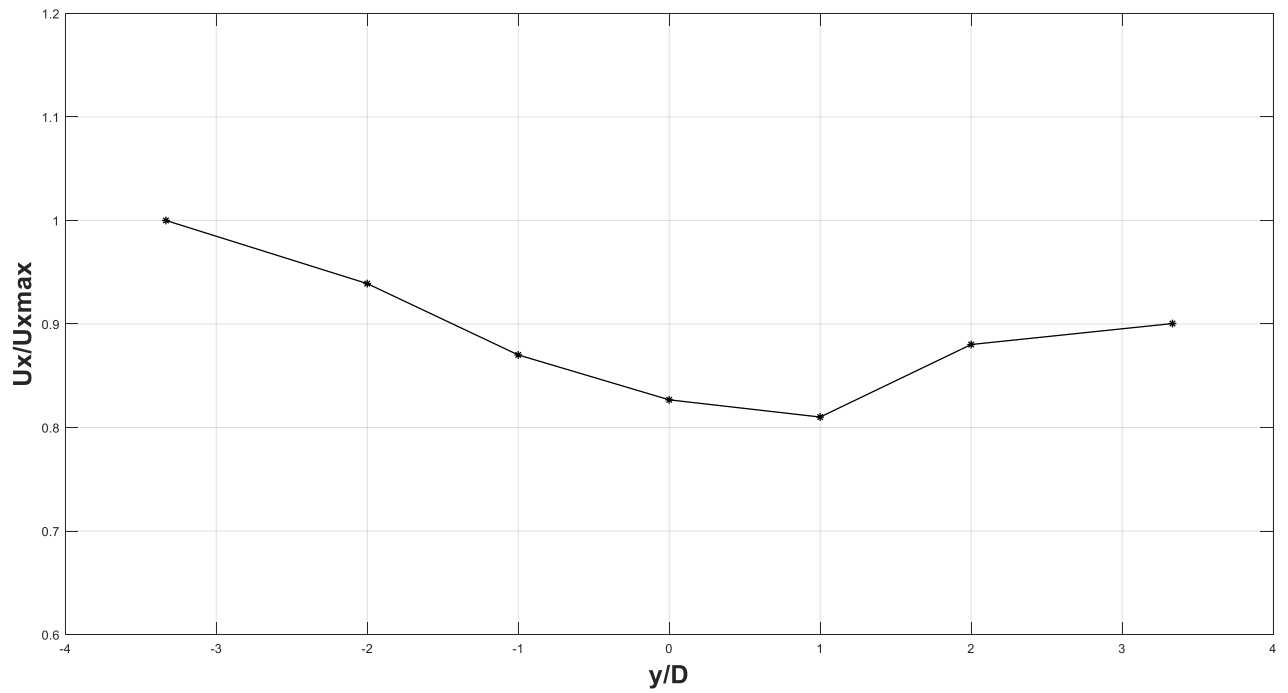
**Σχήμα 4.24** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



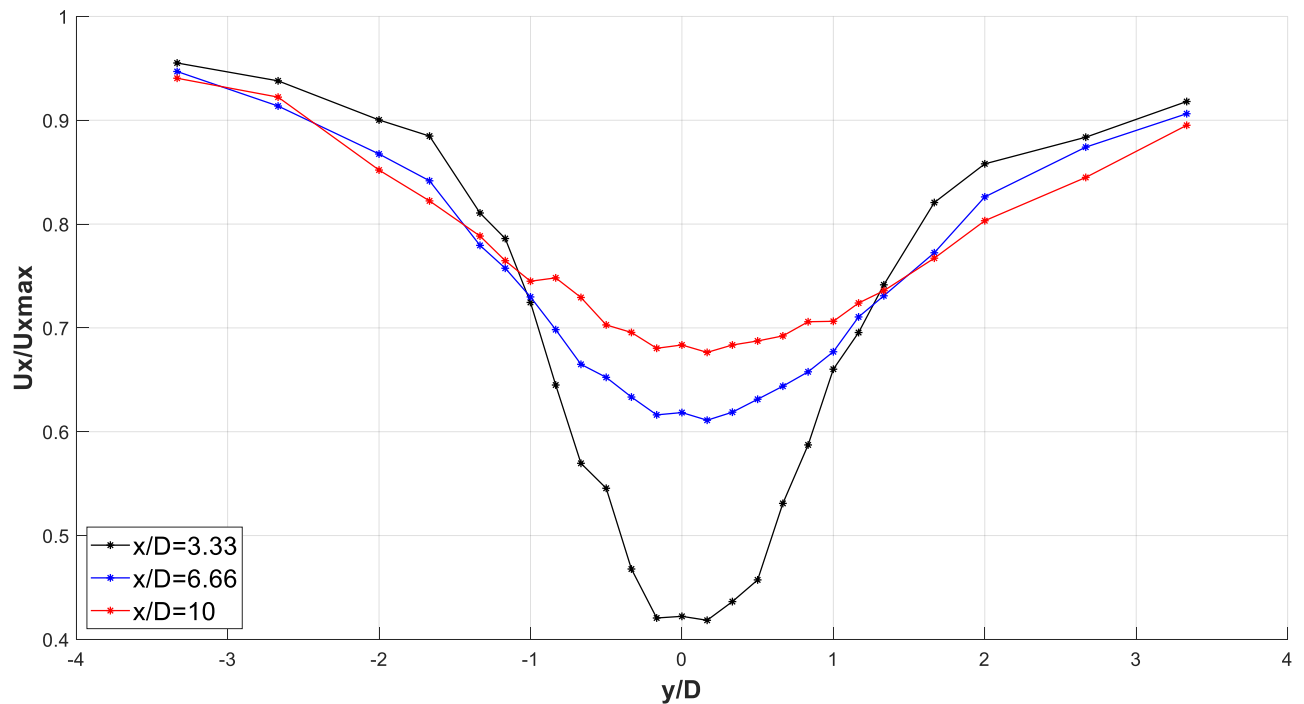
**Σχήμα 4.25** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



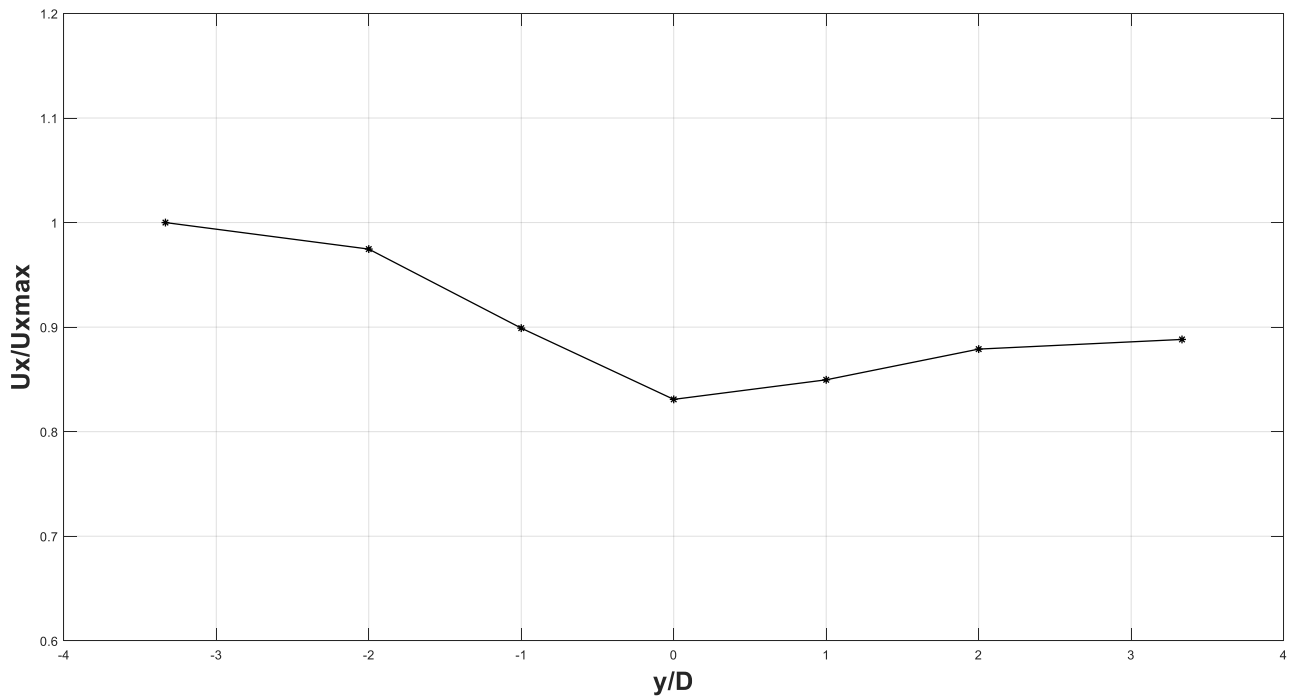
**Σχήμα 4.26** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



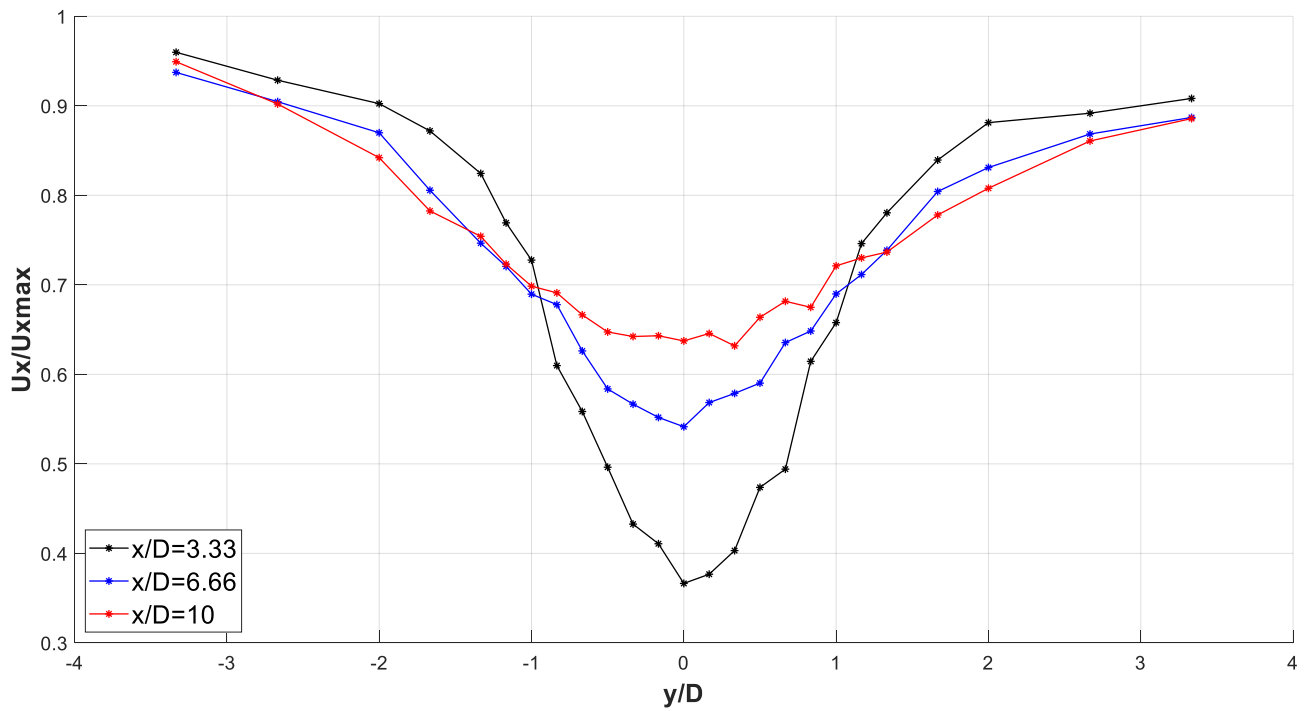
**Σχήμα 4.27** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.28** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

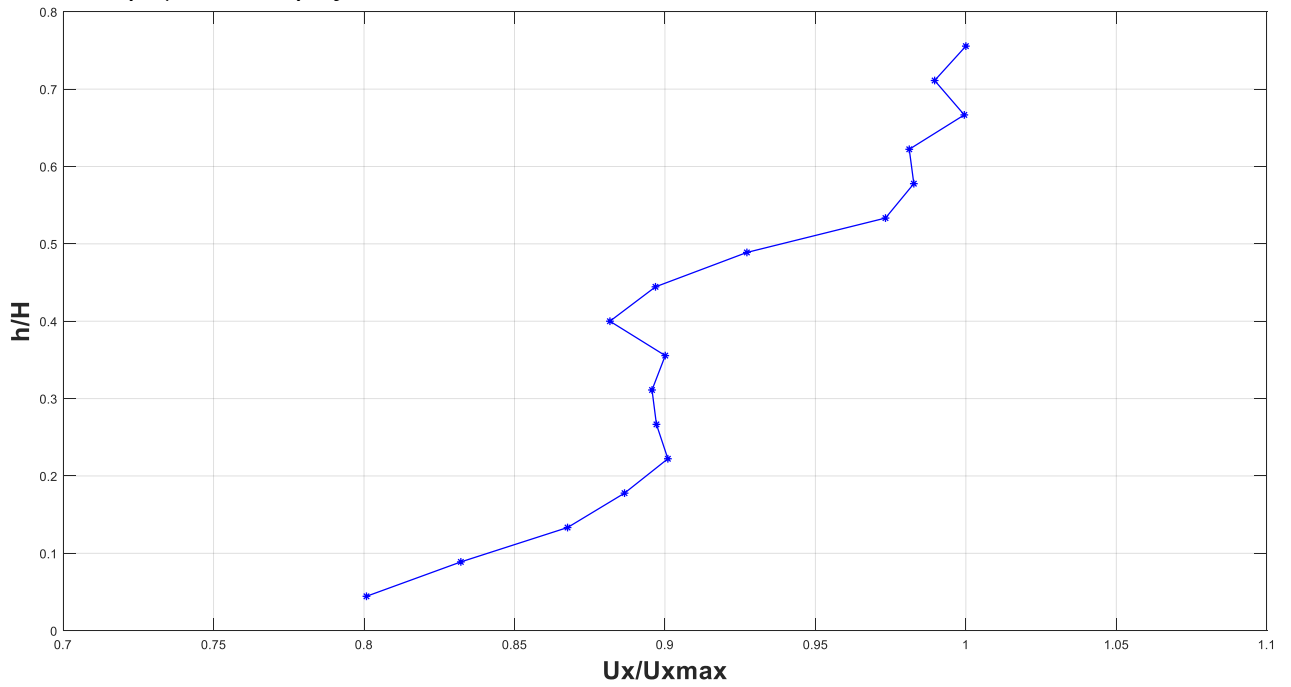


**Σχήμα 4.29** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ ) ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

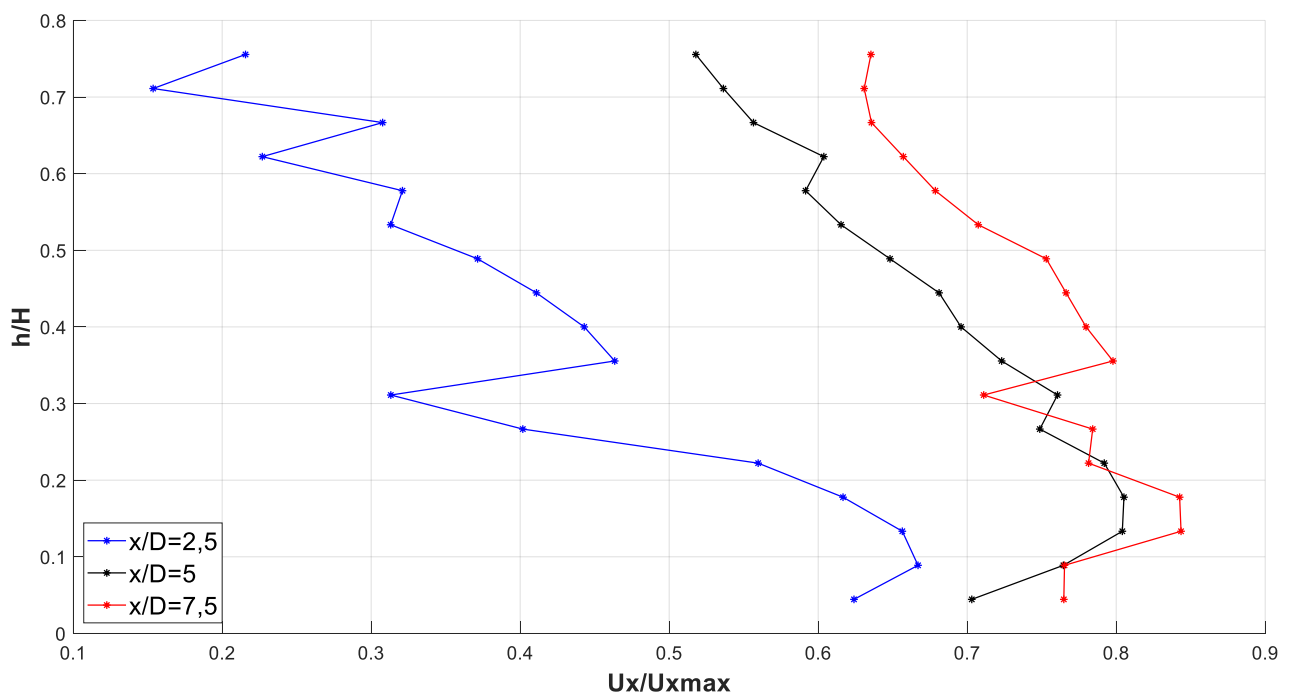


**Σχήμα 4.30** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη της ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

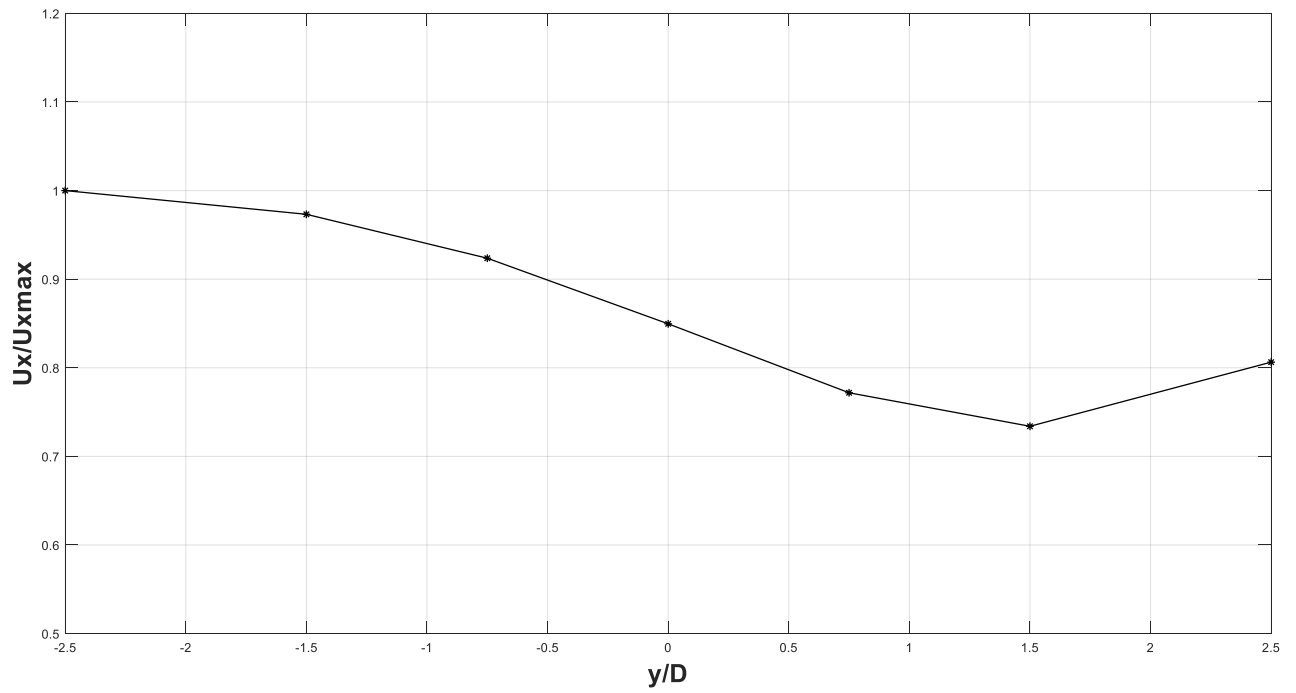
4.1.4 Τετράγωνο πλευράς D=4cm



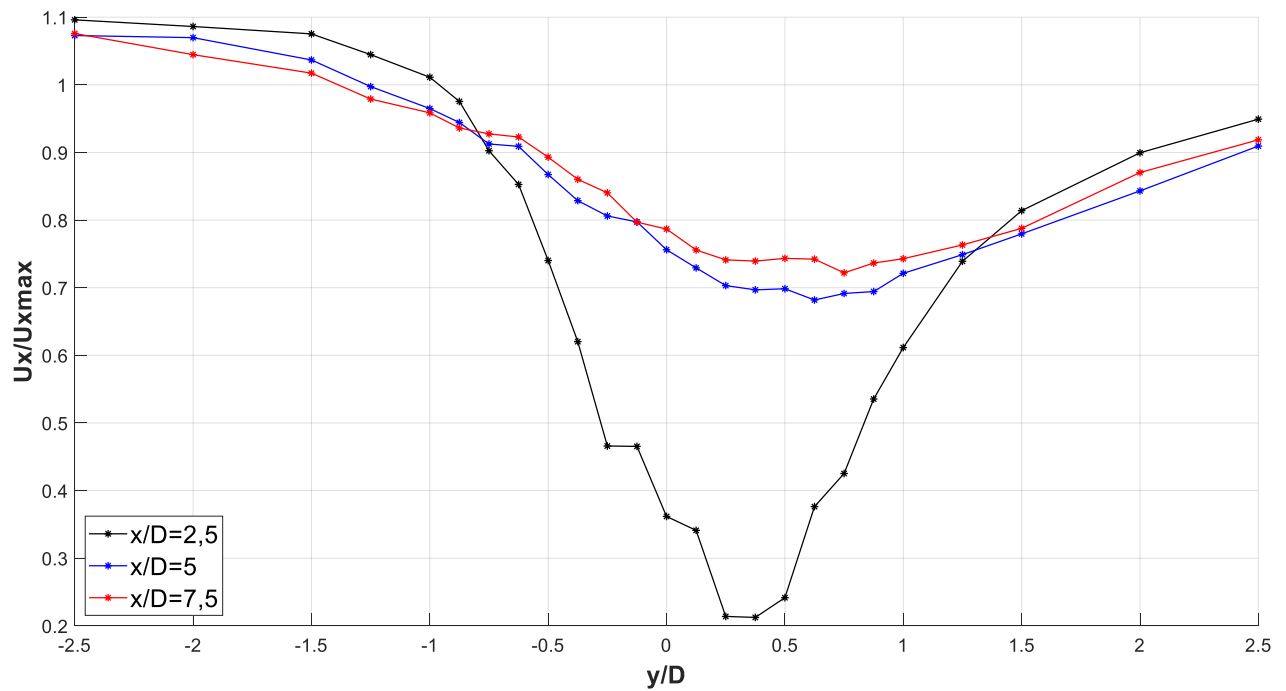
Σχήμα 4.31 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητα σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7,5$ ) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4



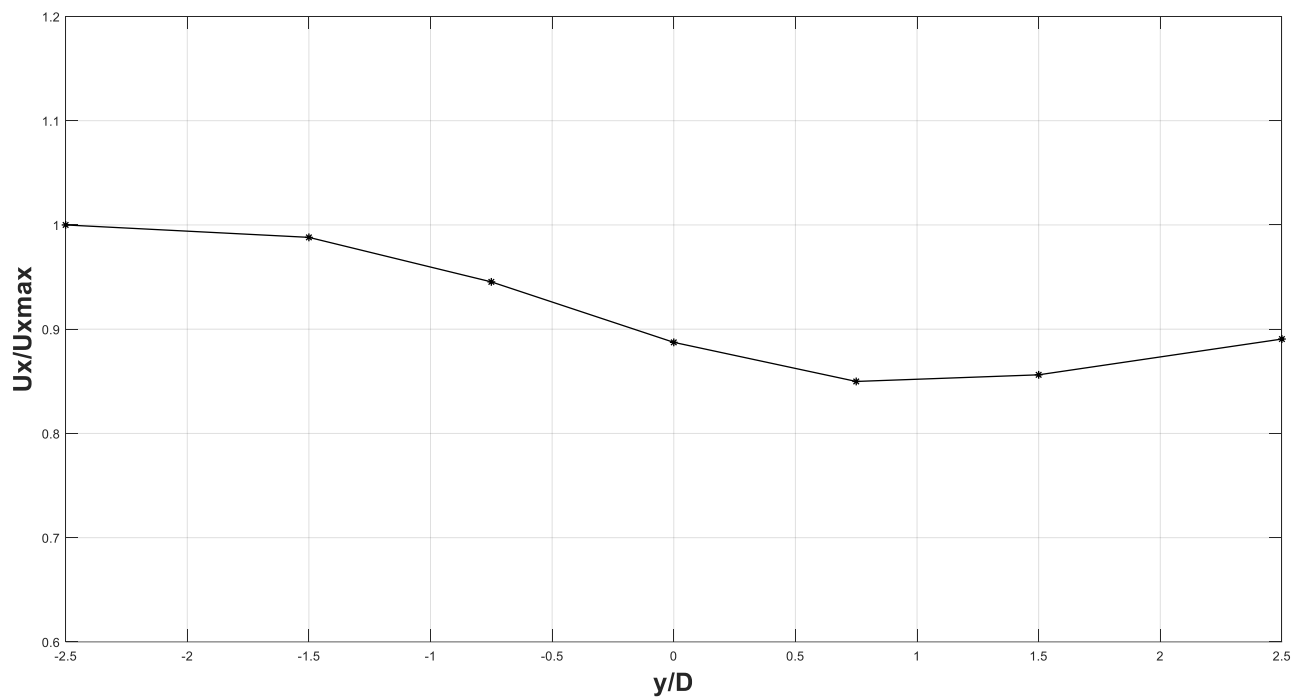
Σχήμα 4.32 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7,5$ ) κατάντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4.5cm



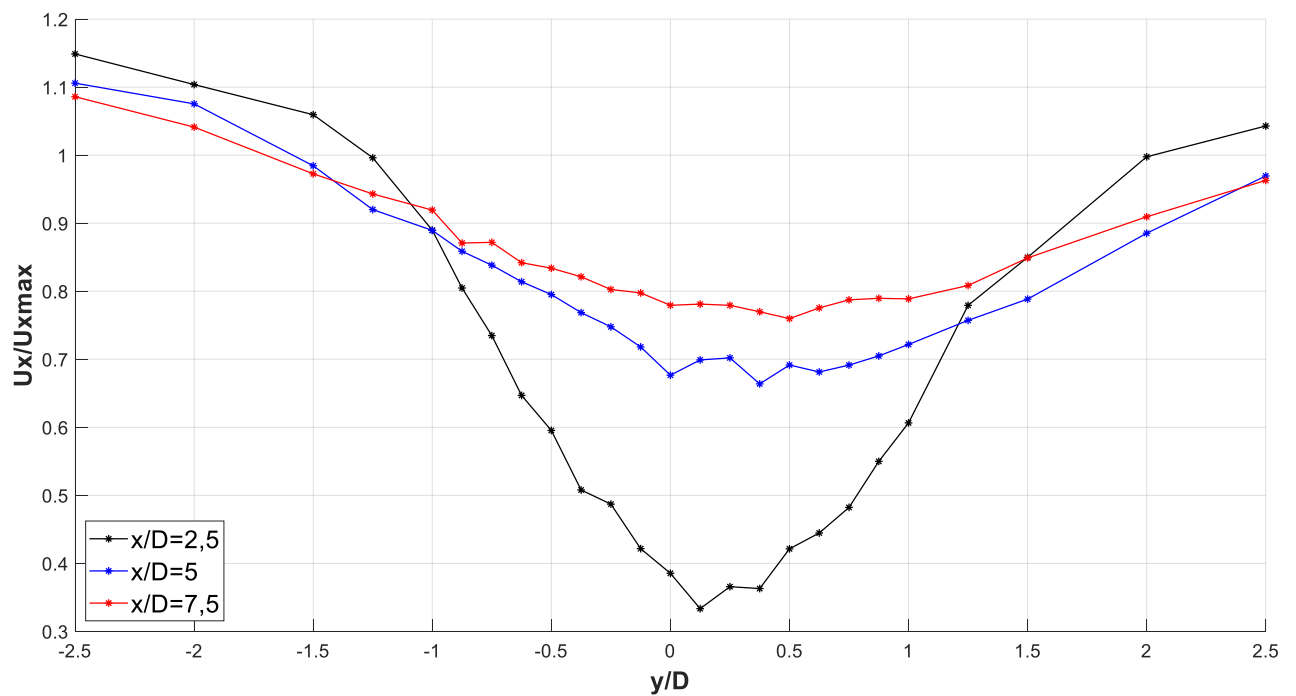
**Σχήμα 4.33** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7,5$ ) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm



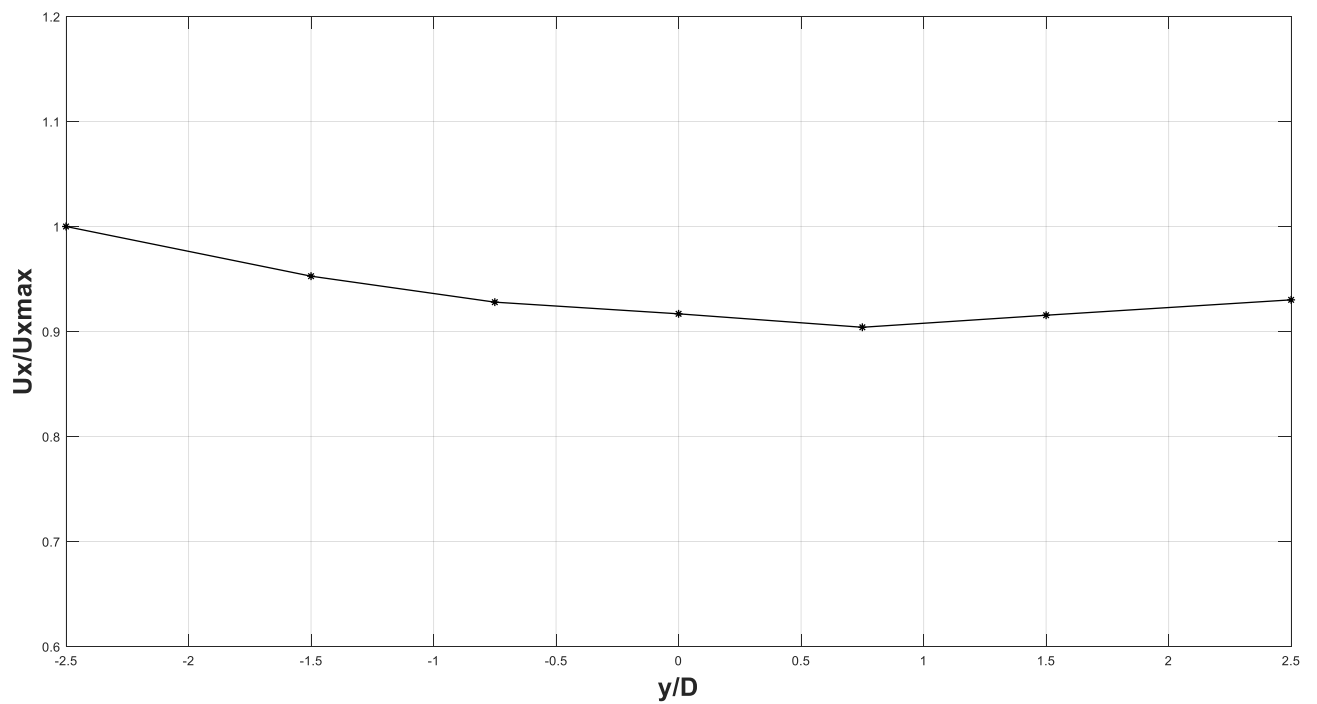
**Σχήμα 4.34** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm



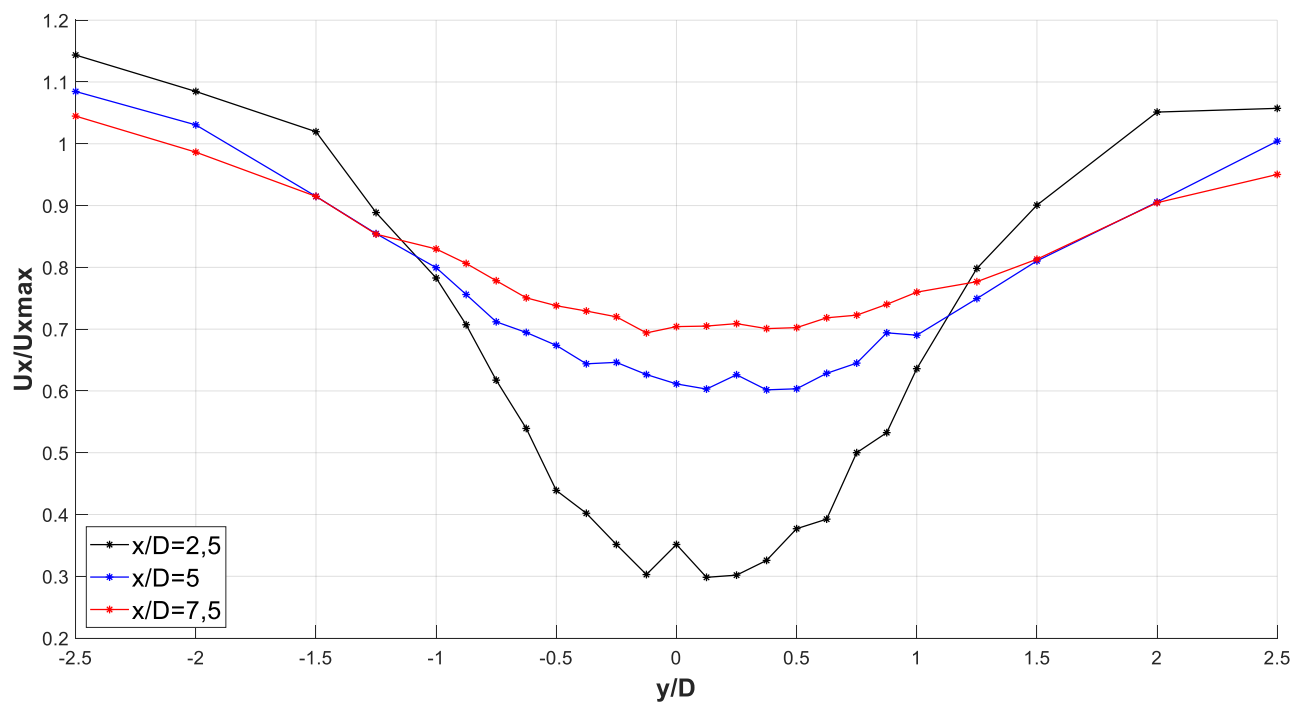
**Σχήμα 4.35** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=7,5$ ) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm



**Σχήμα 4.36** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7,5$ ) κατάντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm

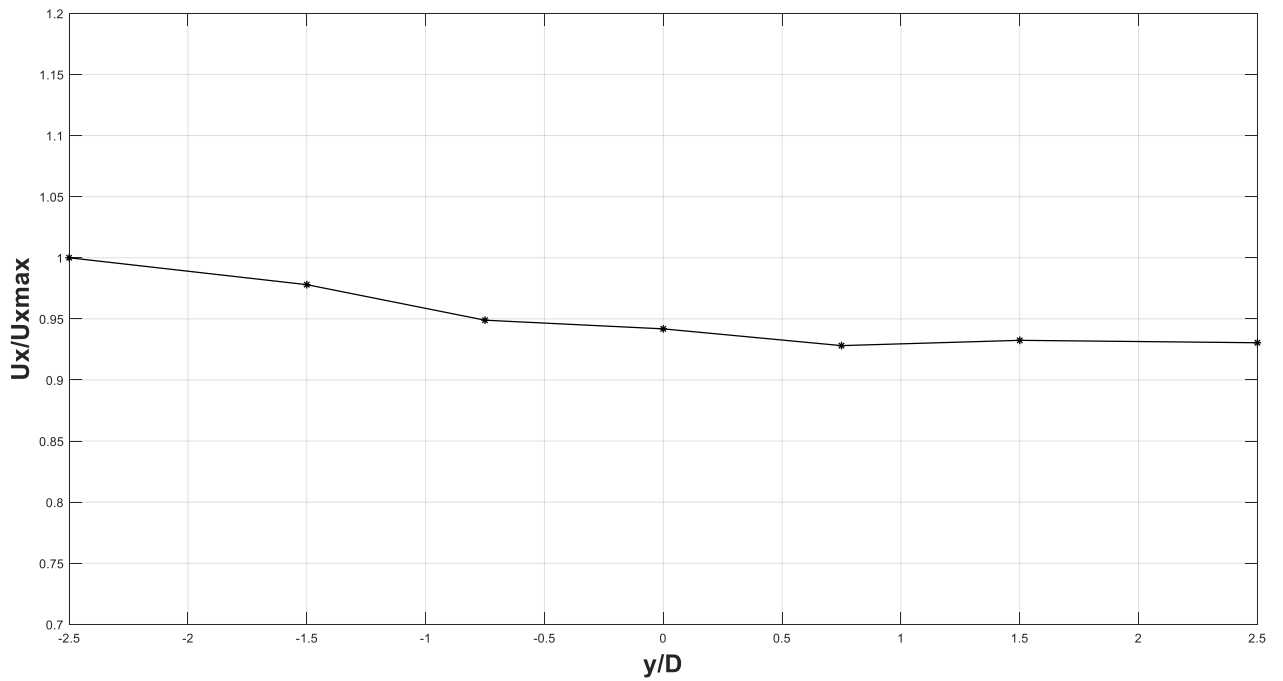


**Σχήμα 4.37** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7,5$ ) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

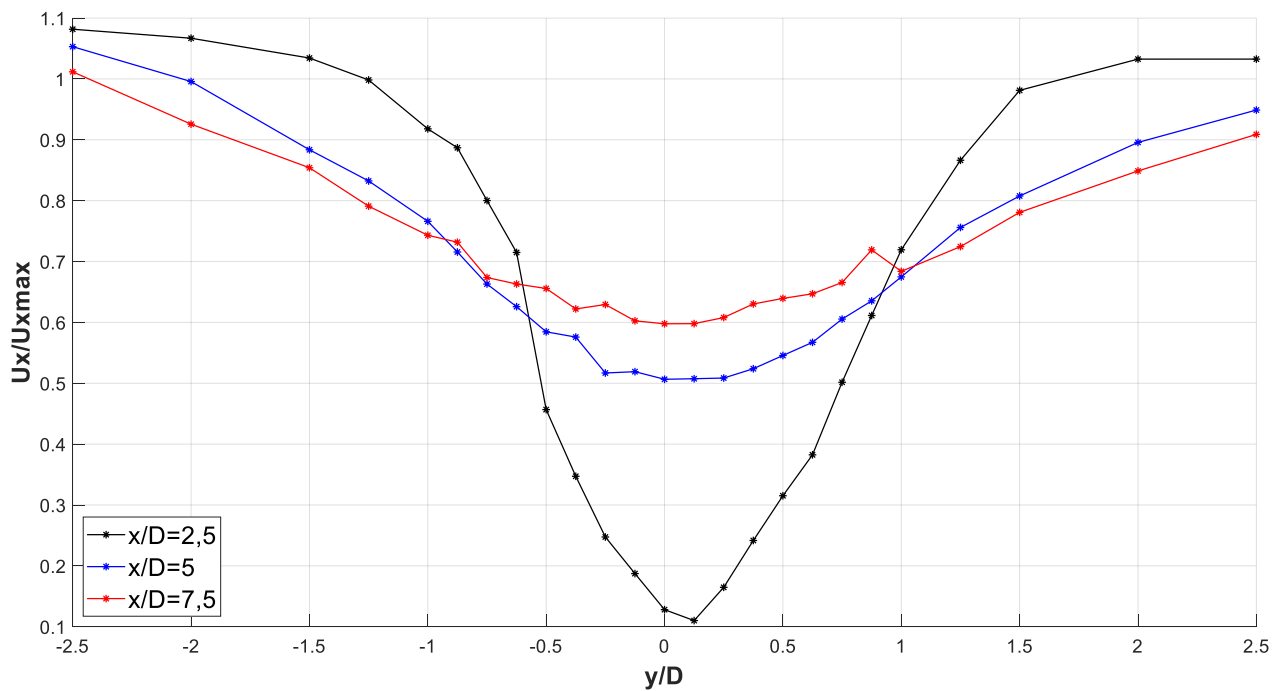


**Σχήμα 4.38** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7,5$ ) κατάντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm



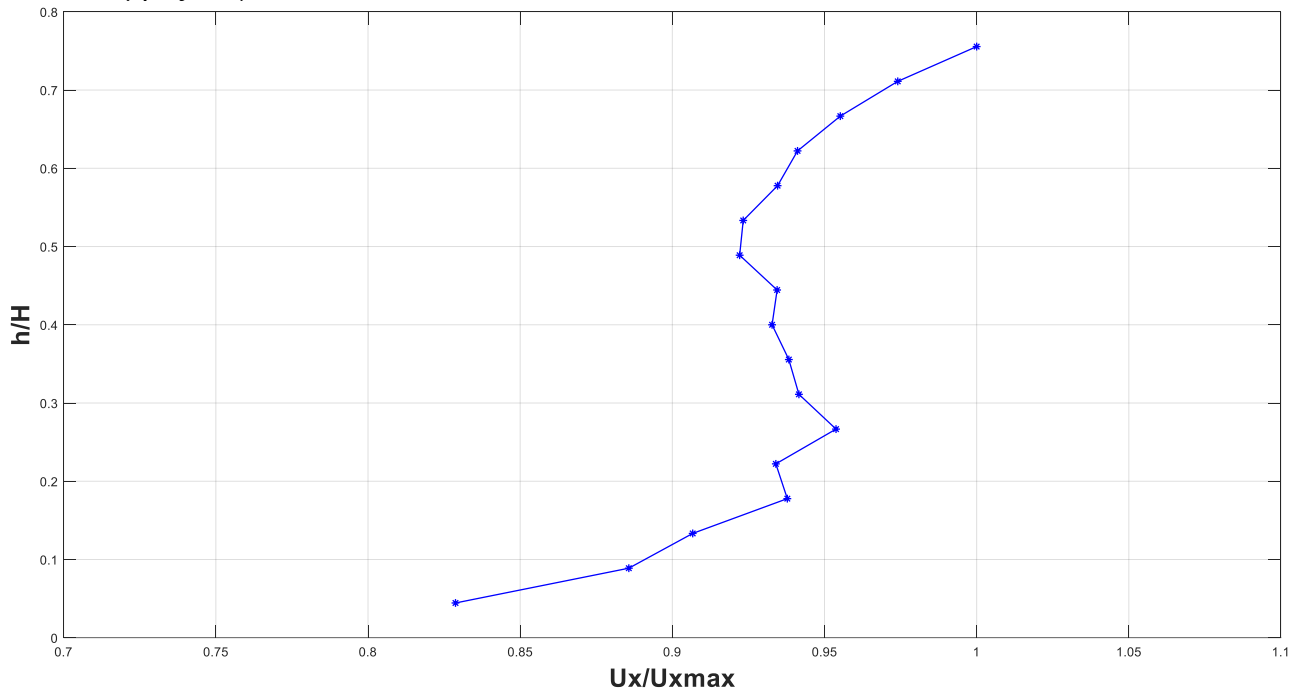


**Σχήμα 4.39** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-7,5$ ) ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

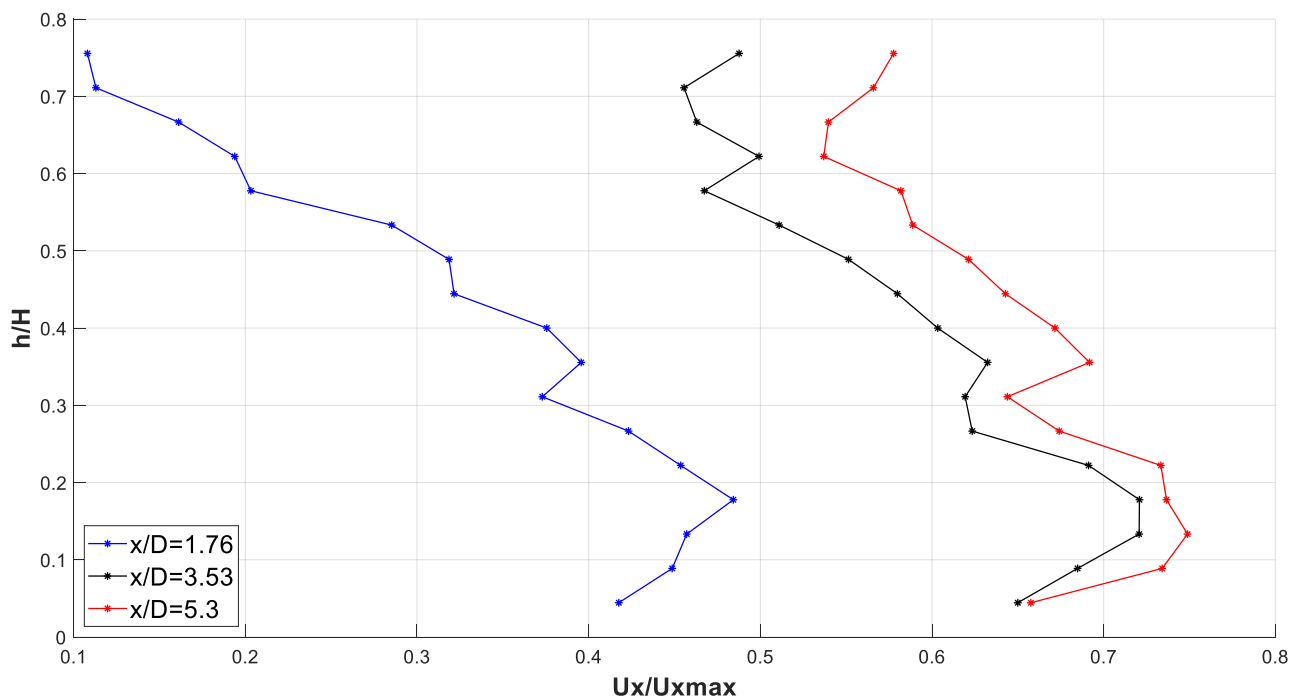


**Σχήμα 4.40** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη της τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

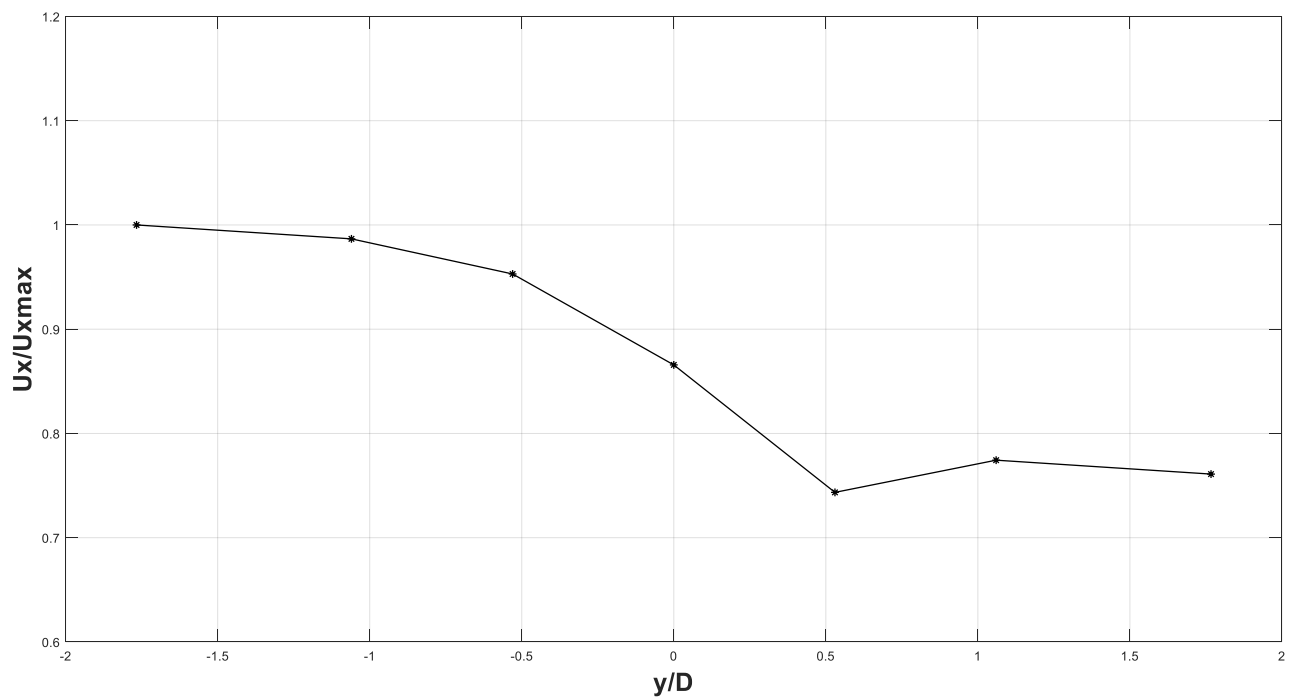
4.1.5. Ρόμβος διαγωνίου D=5.66



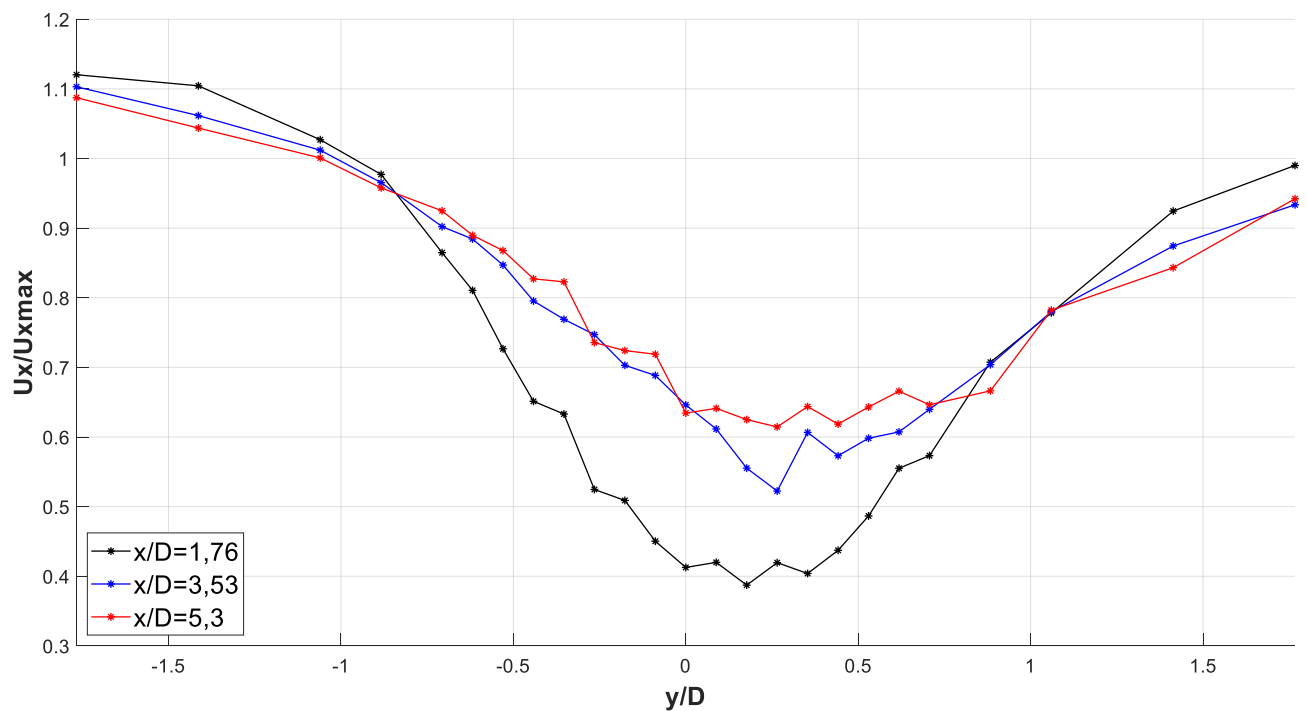
**Σχήμα 4.41** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-5.3$ ) ανάντη ραμβοειδής διαγωνίου 5,66cm



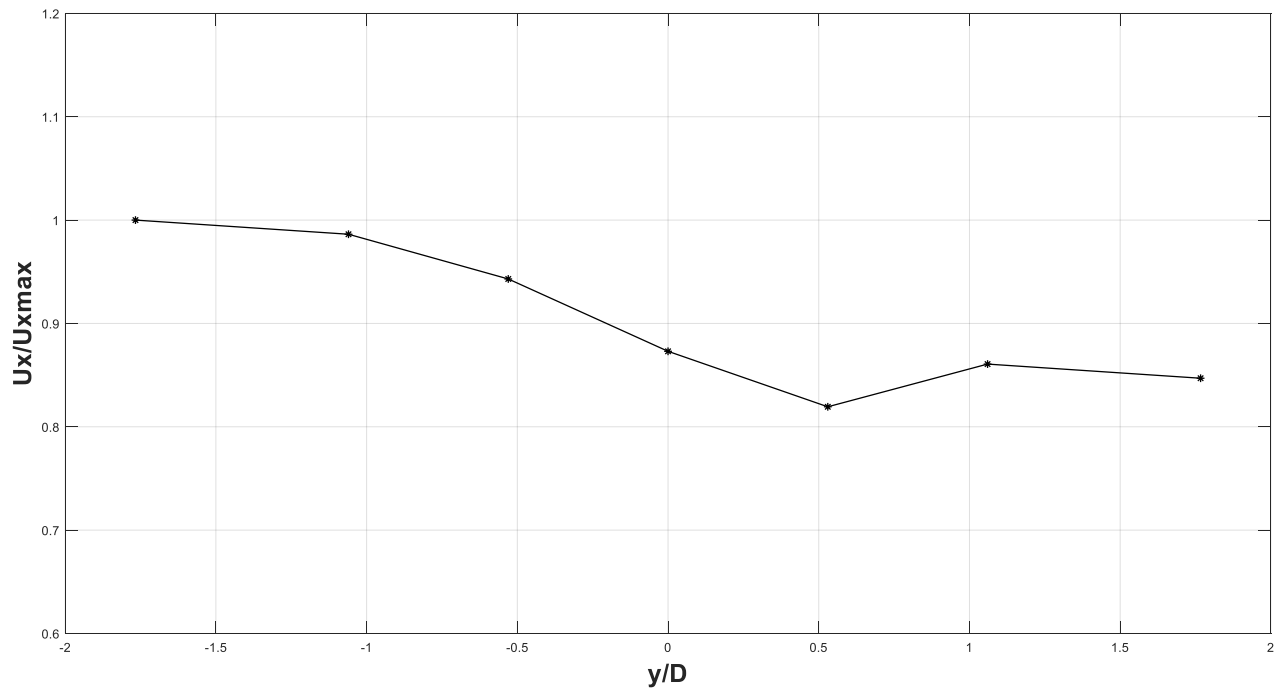
**Σχήμα 4.42** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη της ραμβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66



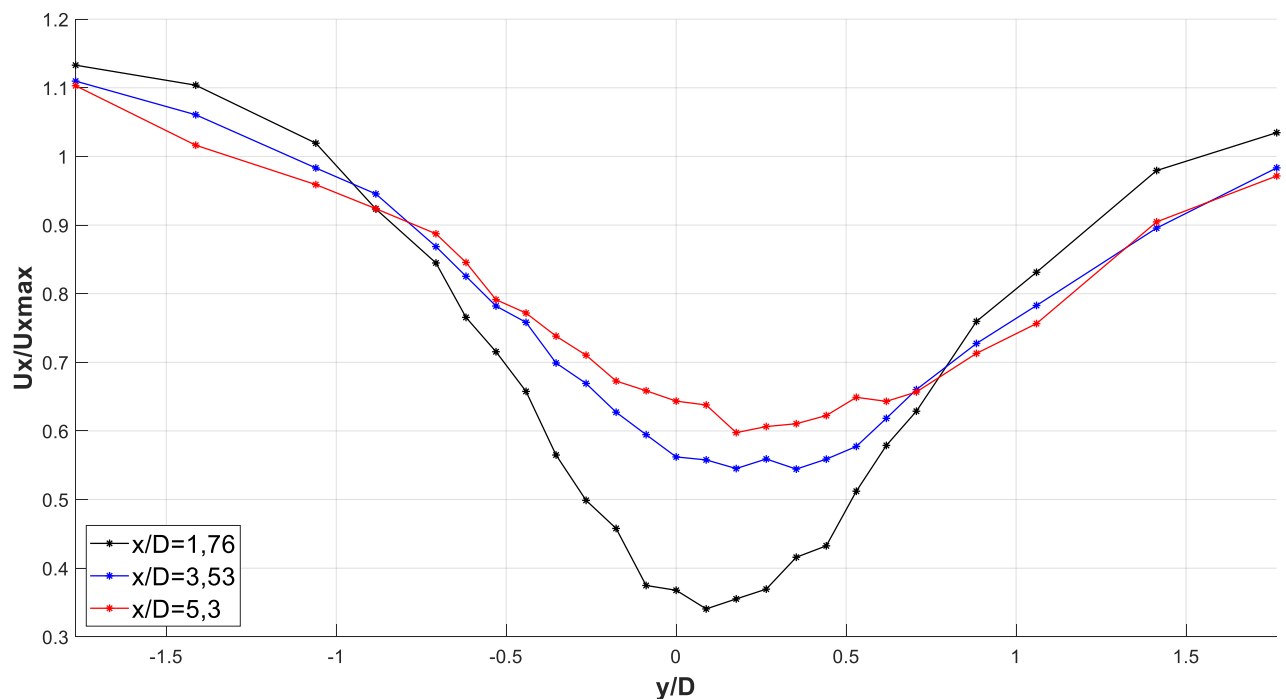
**Σχήμα 4.43** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-5.3$ ) ανάντη ρομβοειδής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm



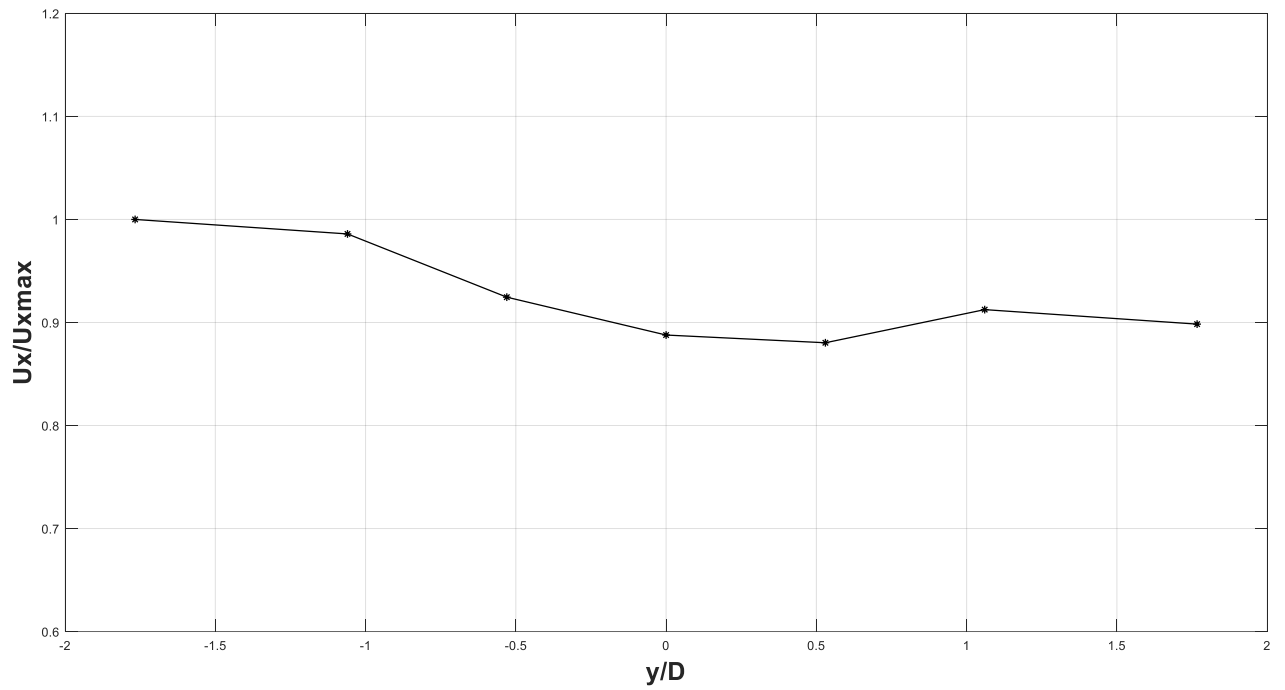
**Σχήμα 4.44** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 4,5cm



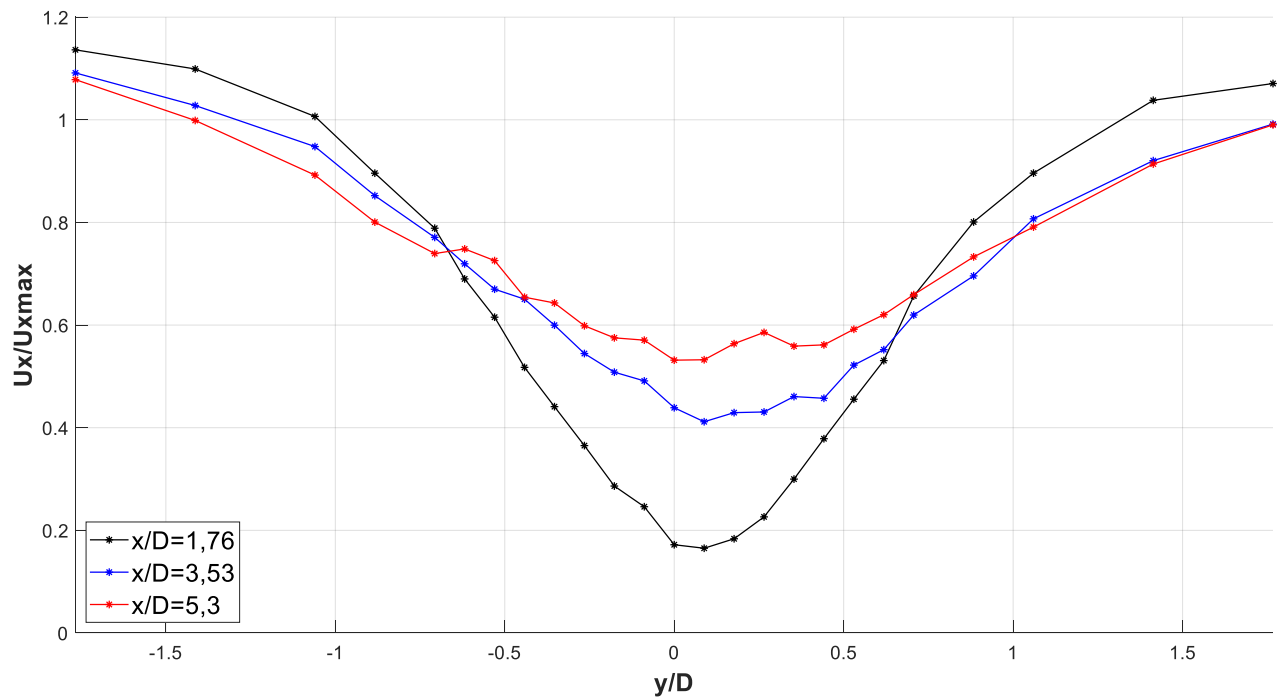
**Σχήμα 4.45** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-5.3$ ) ανάντη ρομβοειδής διατομής 4Χ4 σε ύψος 9cm



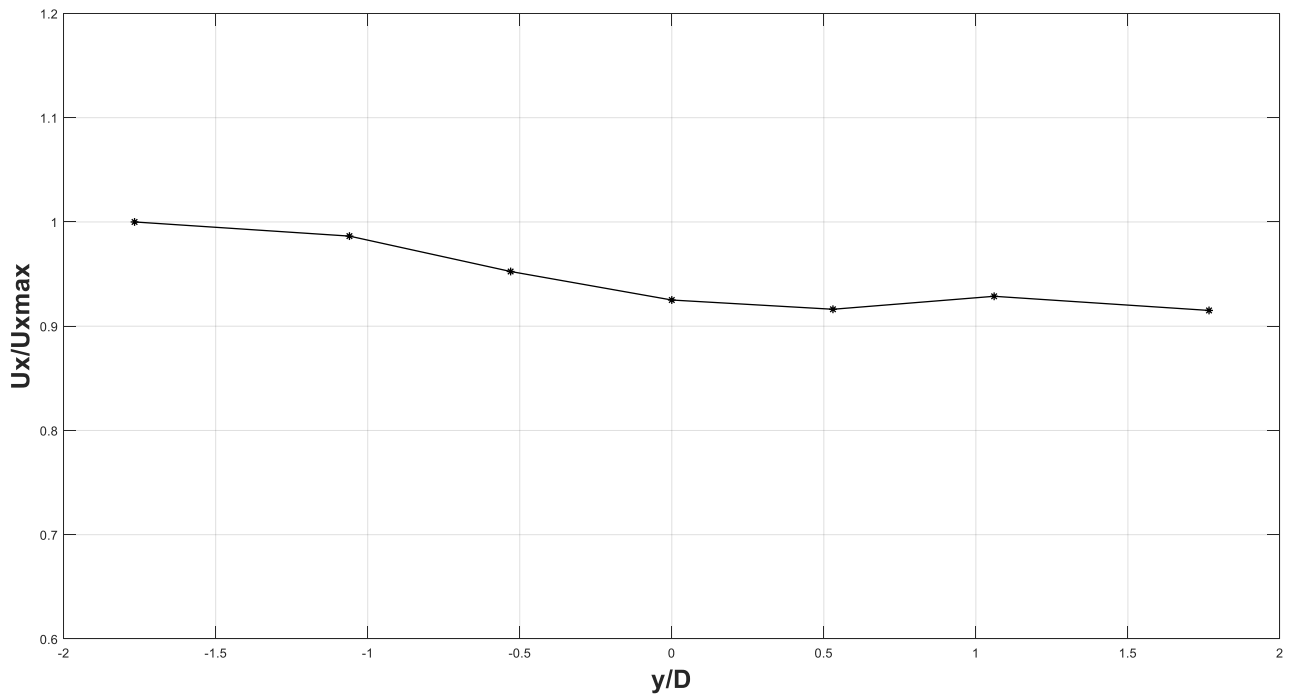
**Σχήμα 4.46** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 9cm



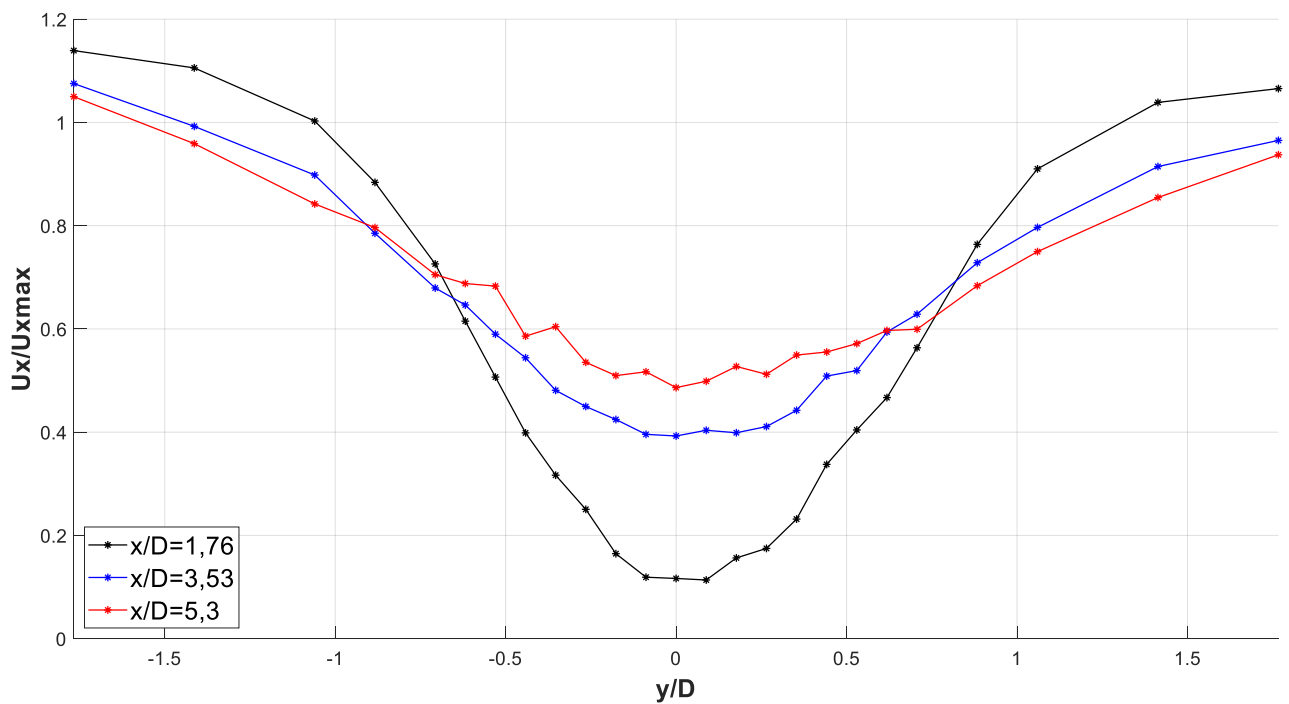
**Σχήμα 4.47** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-5.3$ ) ανάντη ρομβοειδής διατομής 4X4 σε ύψος 13,5cm



**Σχήμα 4.48** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.49** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 30cm ( $x/D=-5.3$ ) ανάντη ρομβοειδής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm



**Σχήμα 4.50** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή ταχύτητας σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη της ρομβοειδής διατομής διαγωνίου 5,66 σε ύψος 17.1cm

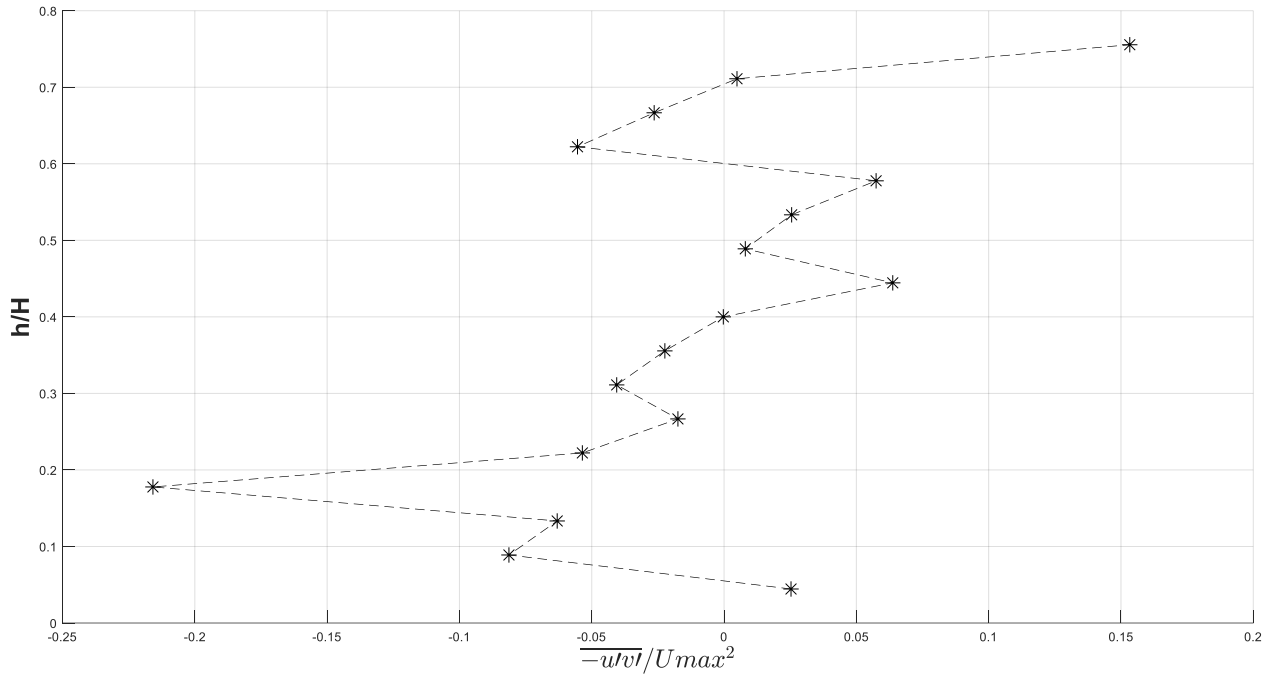
Παρατηρούμε πως σε όλα τα σχήματα οι τιμές των ταχυτήτων στις κατανομές μειώνονται καθ' ύψος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανάντη της ροής οι ταχύτητες αυξάνονται σε μέγεθος όσο προχωράμε προς την επιφάνεια της ροής. Όταν η ροή συναντά το εμπόδιο, χρειάζονται μικρότερες ταχύτητες κατάντη για να διατηρηθεί σταθερή η εξίσωση της ορμής και της ενέργειας.

Όσον αφορά στην απόσταση από το εμπόδιο οι κατανομές των ταχυτήτων τείνουν να σταθεροποιηθούν όπως αναμενόταν, καθώς η ροή αρχίζει να επιστρέφει σε συνθήκες που ίσχυαν στα ανάντη της ροής δηλαδή συνθήκες ανεπτυγμένης ροής

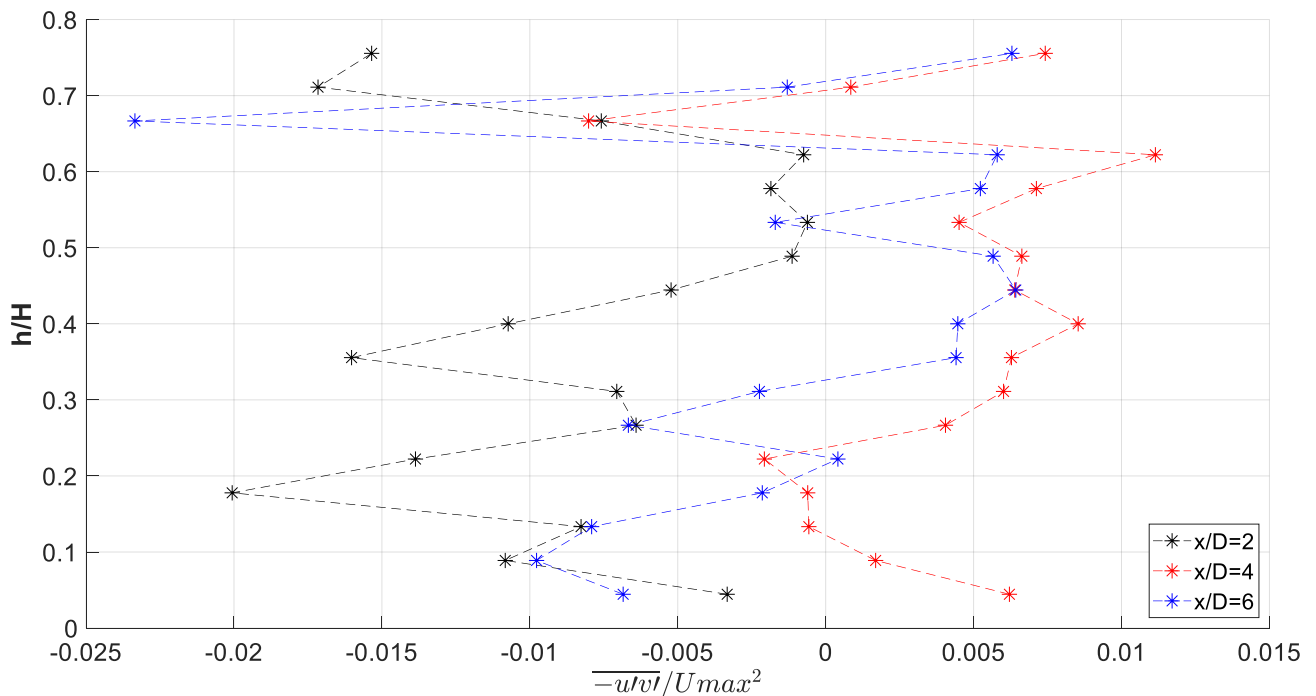
Τα σχήματα στα οποία εμφανίζονται μικρότερες ταχύτητες στα κατάντη της ροής είναι το τετράγωνο και ο ρόμβος ενώ τη μικρότερη επιρροή στη ροή έχουν ο κύλινδρος και το ορθογώνιο 3X6. Ο ρόμβος λόγω της μεγαλύτερης επιφάνεια προβολής κάθετα στη ροή παρεμποδίζει αρκετά τη ροή ενώ το αντίθετο συμβαίνει με το ορθογώνιο 3X6. Ο κύλινδρος παρ'όλο που έχει μεγάλη διάμετρο δεν επηρεάζει τόσο πολύ τη ροή διότι δεν έχει γωνίες και άρα δεν υπάρχει μεγάλη αποκόλληση της ροής και η μετάβαση είναι πιο ομαλή από τα ανάντη στα κατάντη.

## 4.2 Τυρβώδεις τάσεις

### 4.2.1 Κύλινδρος διαμέτρου D=5cm

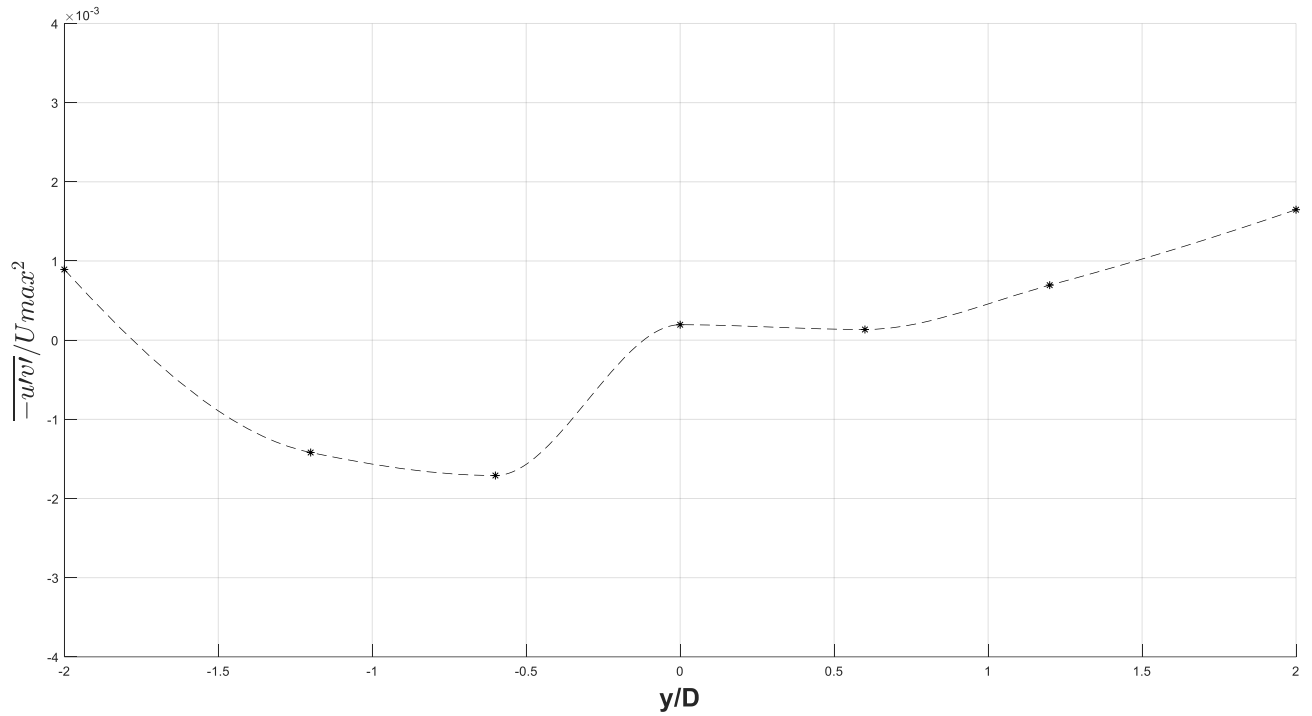


**Σχήμα 4.51** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )

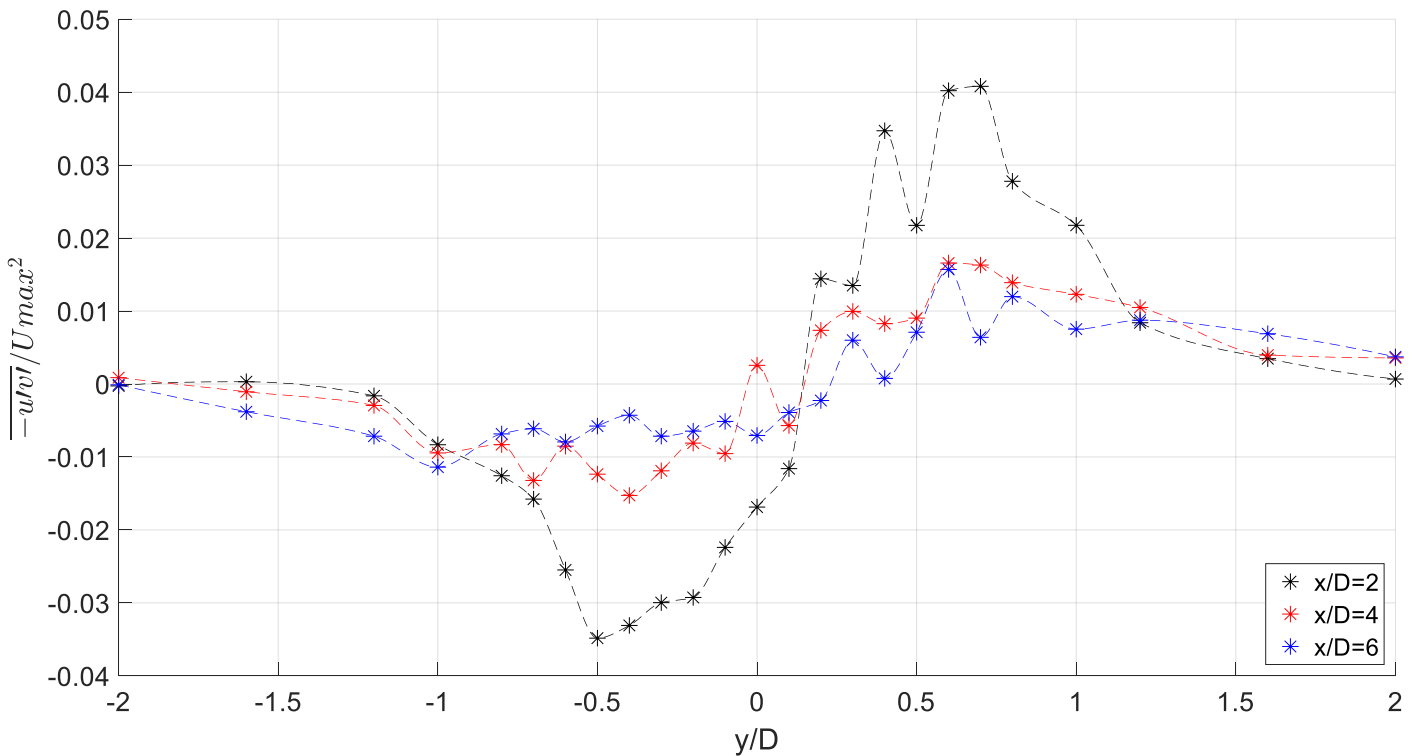


**Σχήμα 4.52** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε

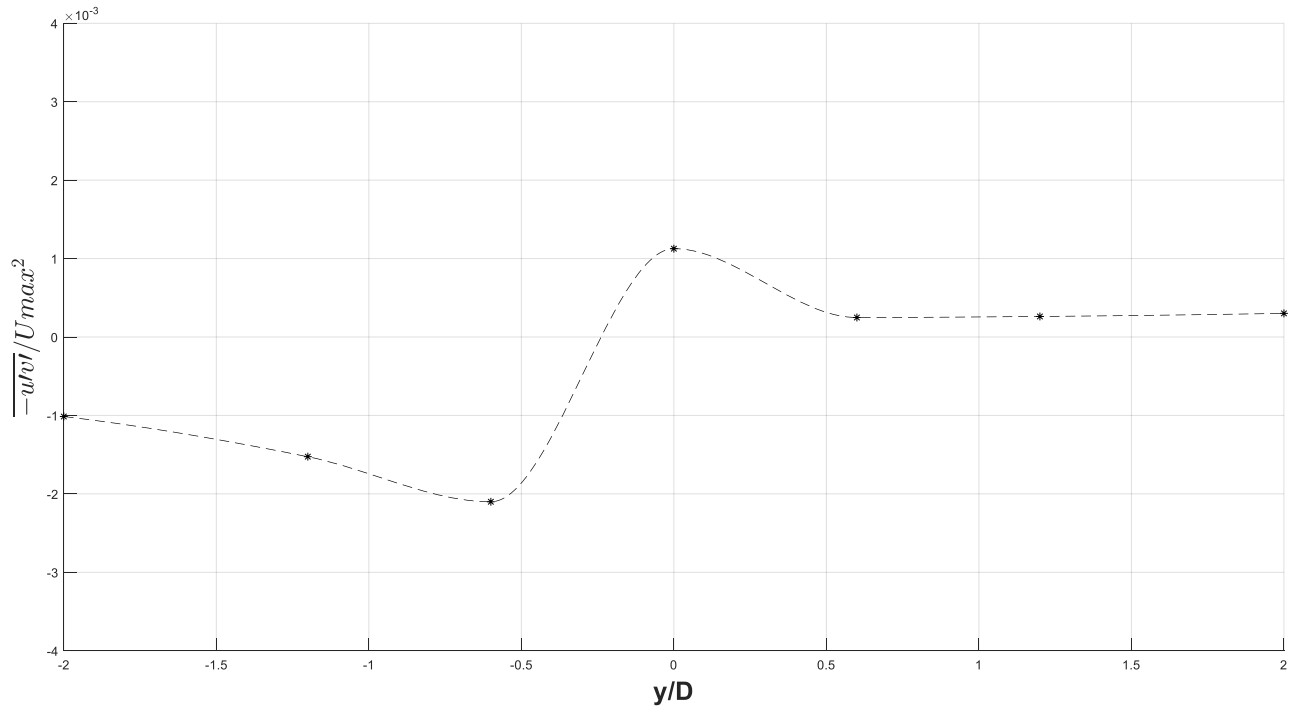




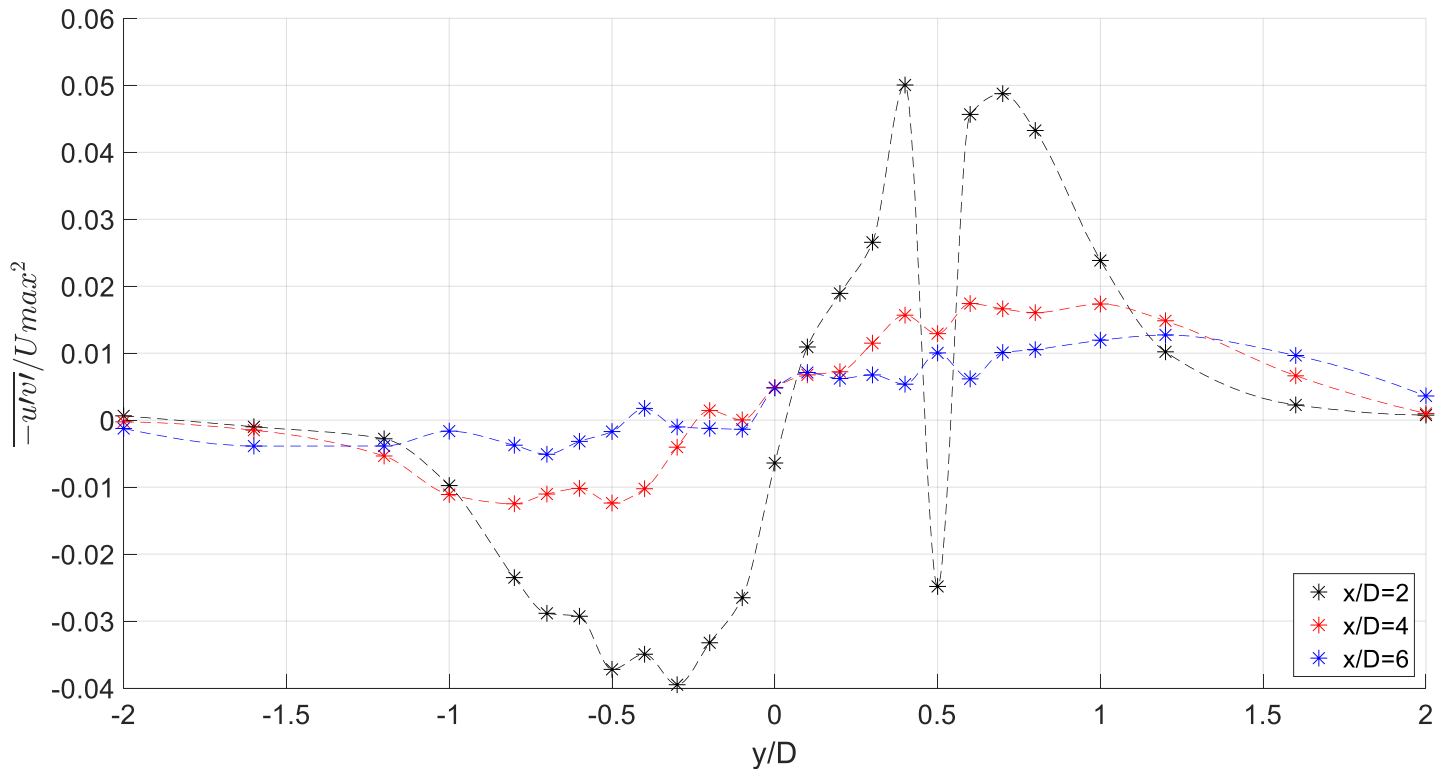
**Σχήμα 4.53** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm



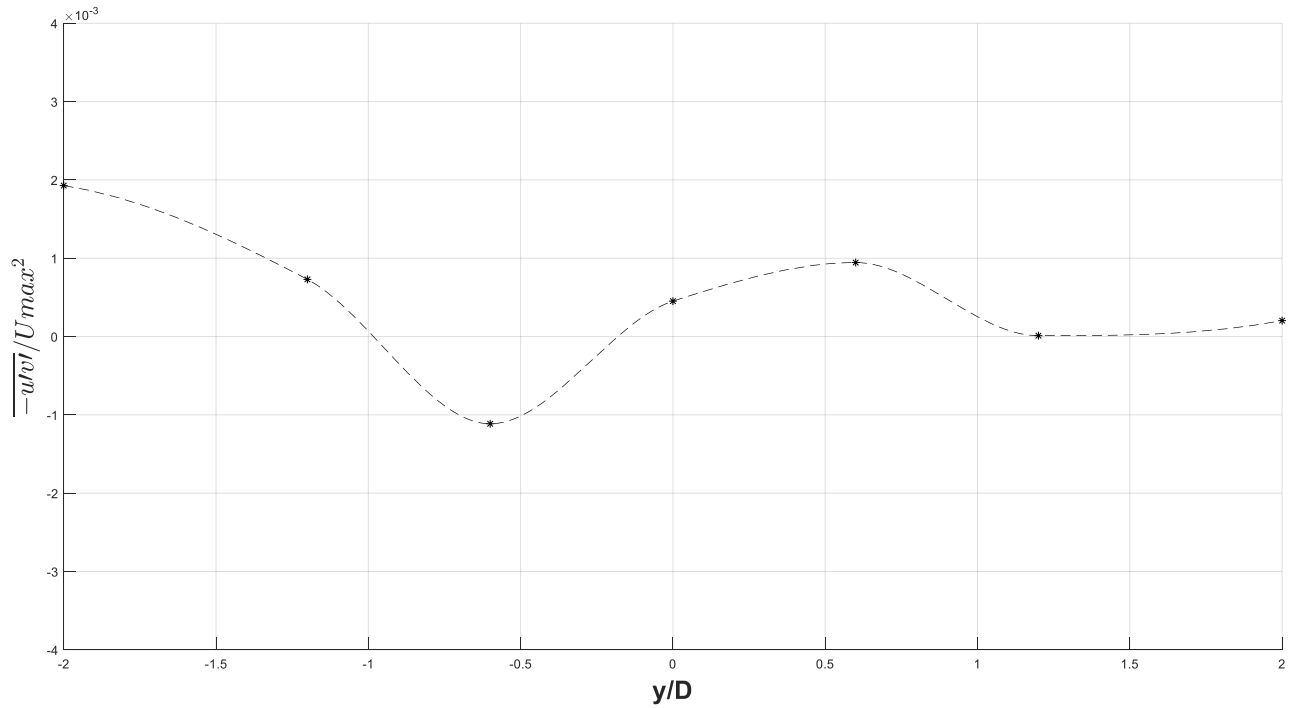
**Σχήμα 4.54** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm



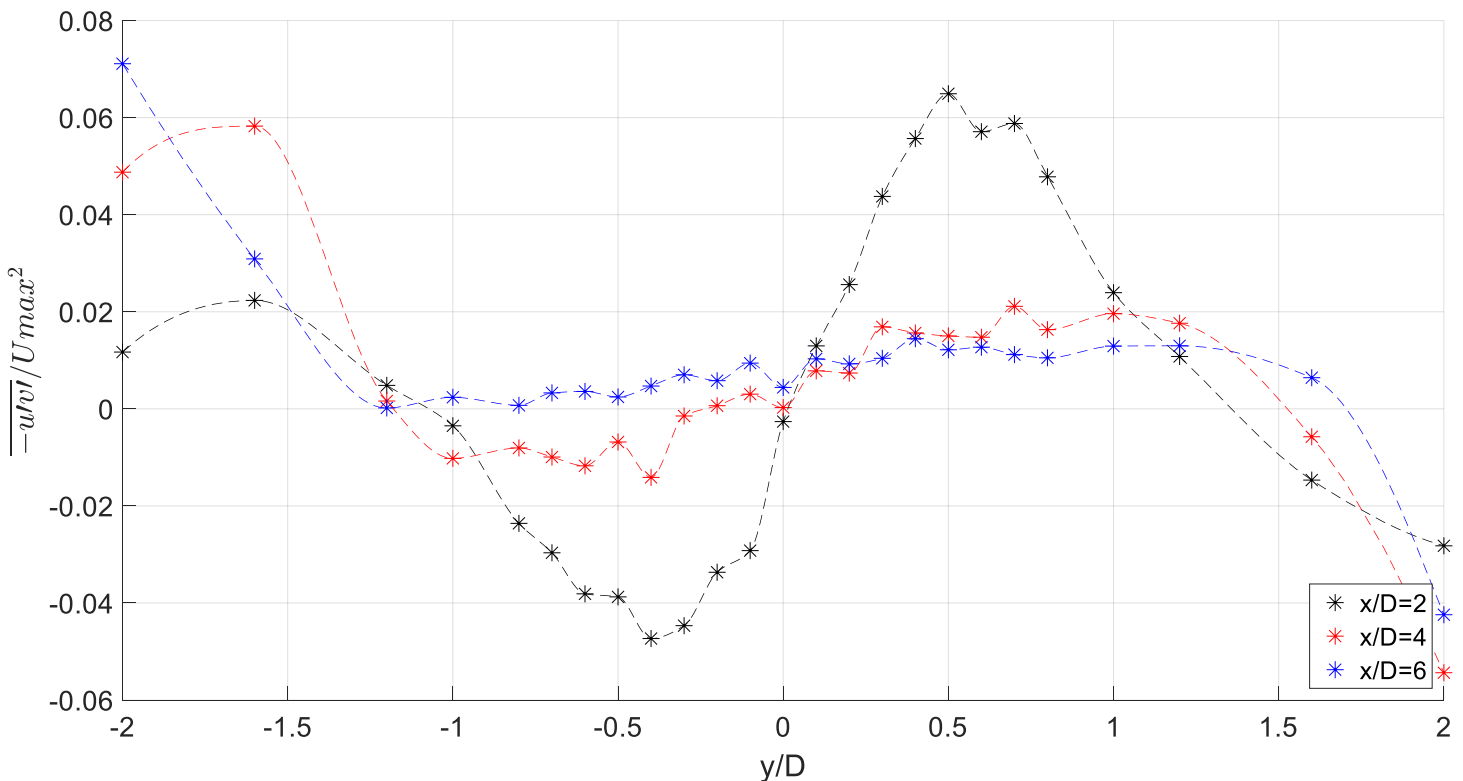
**Σχήμα 4.55** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm



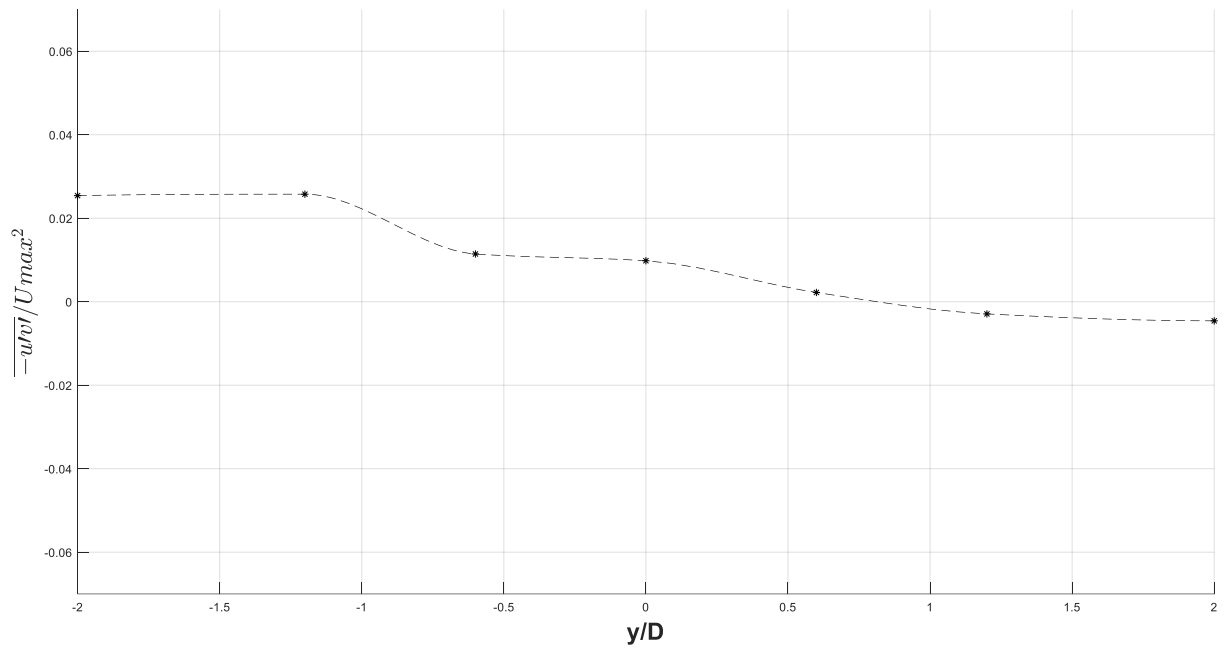
**Σχήμα 4.56** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm



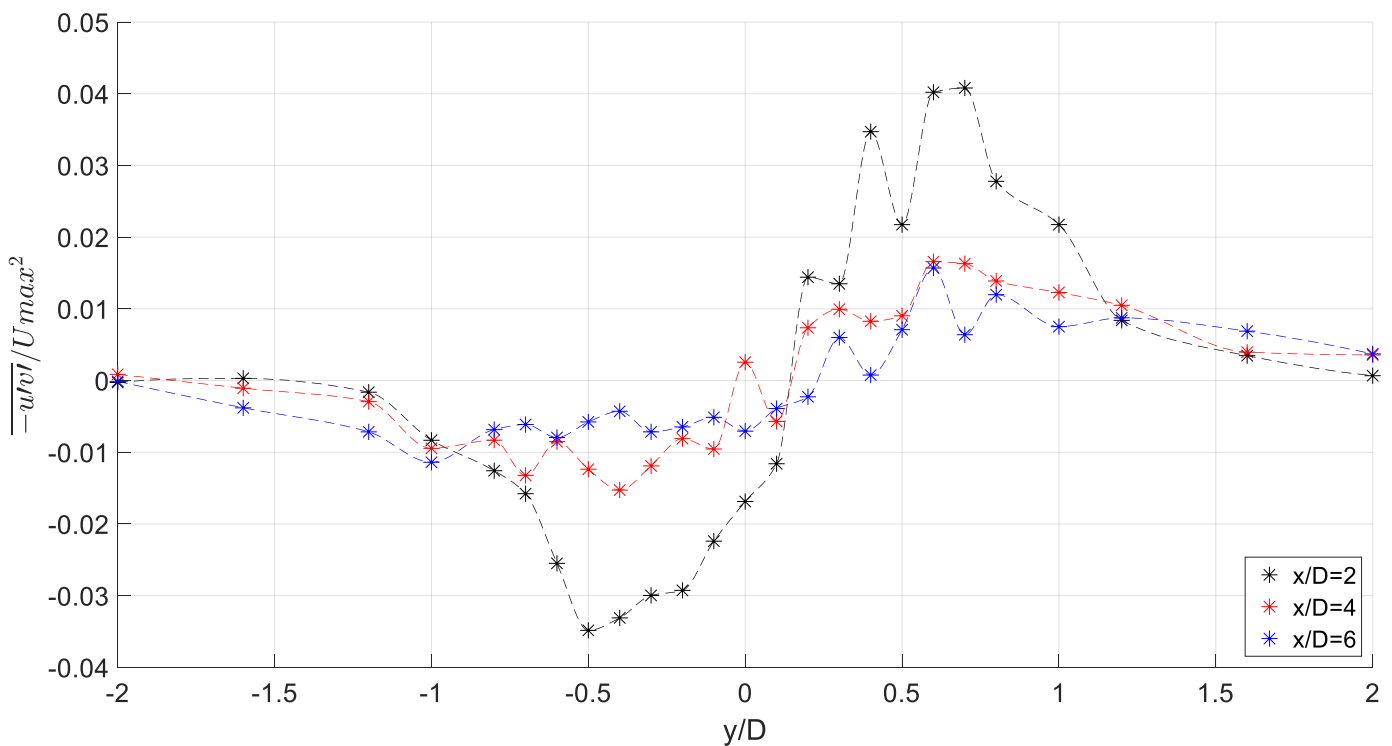
**Σχήμα 4.57** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13,5cm



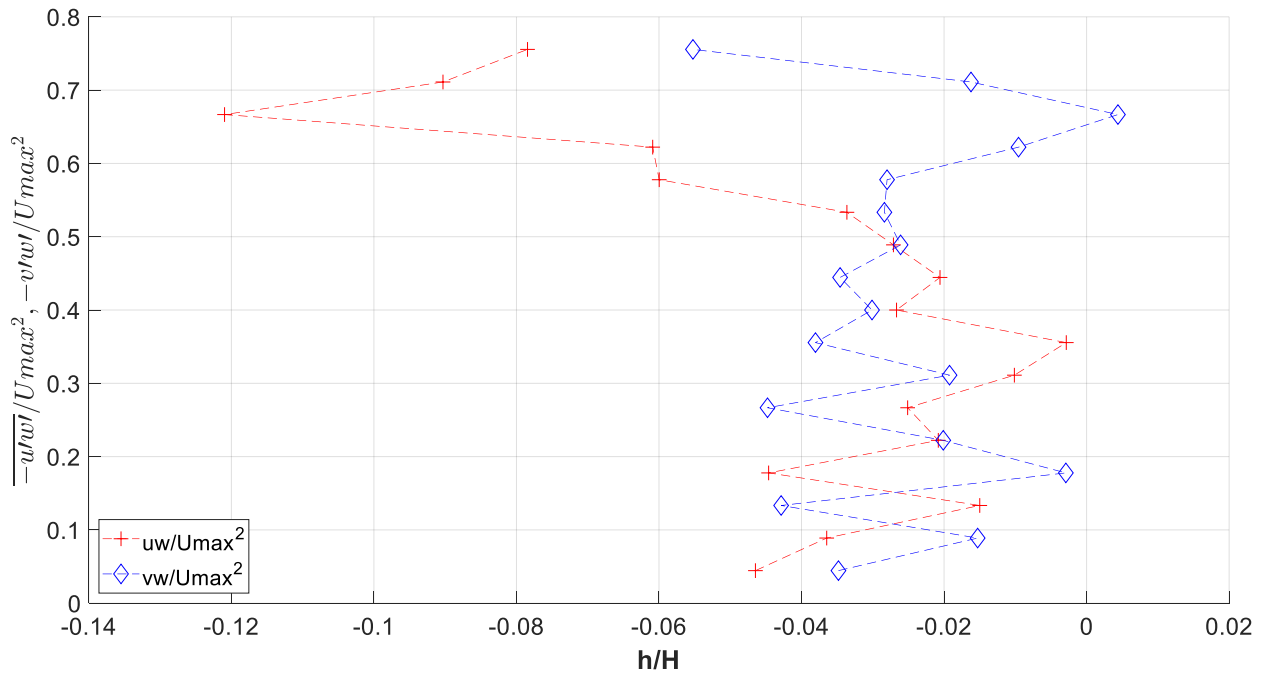
**Σχήμα 4.58** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm



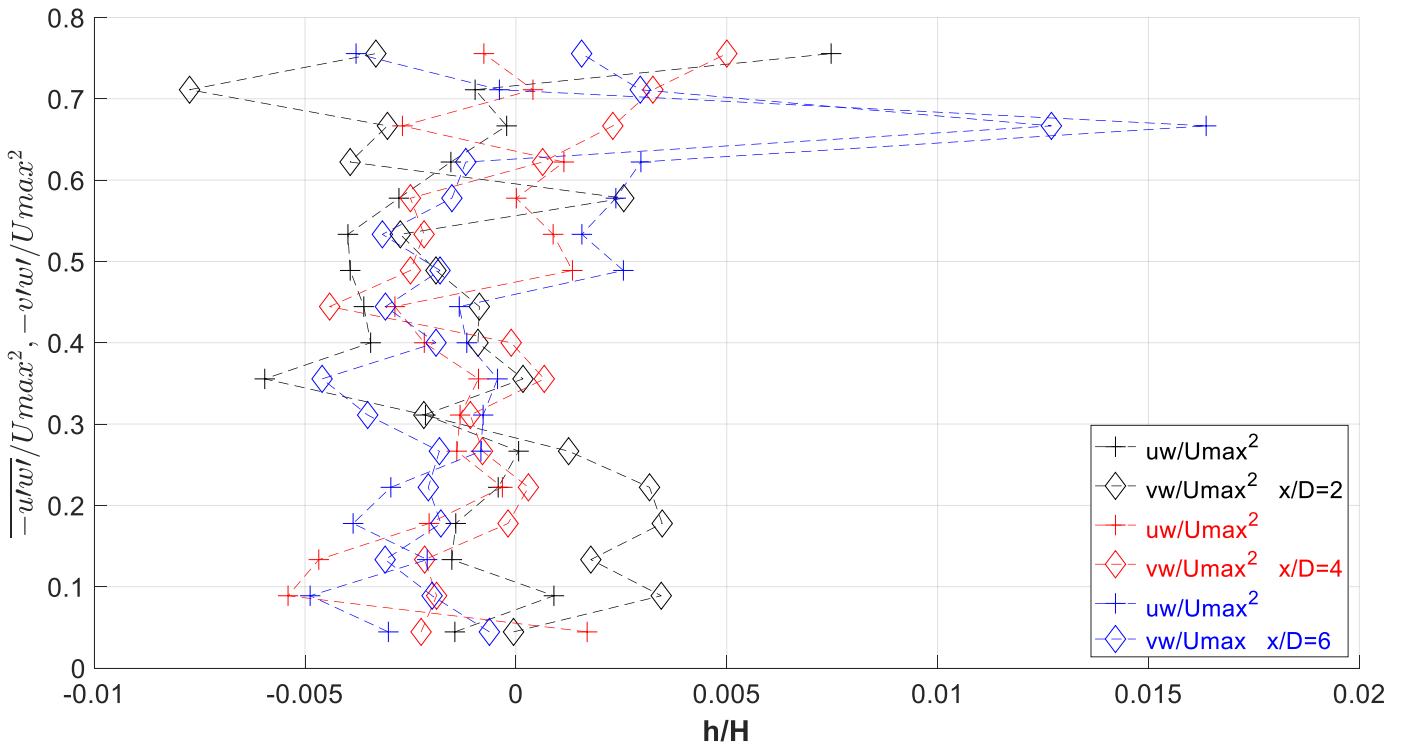
**Σχήμα 4.59** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-u'v'$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm



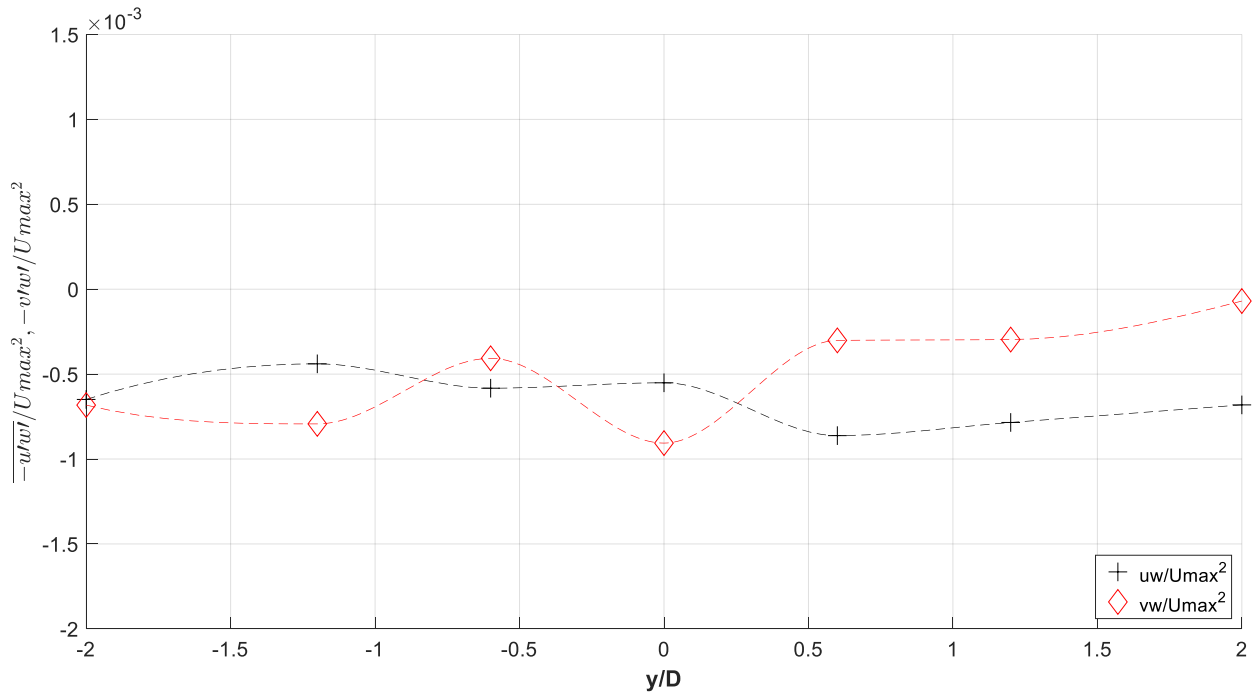
**Σχήμα 4.60** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-u'v'$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm



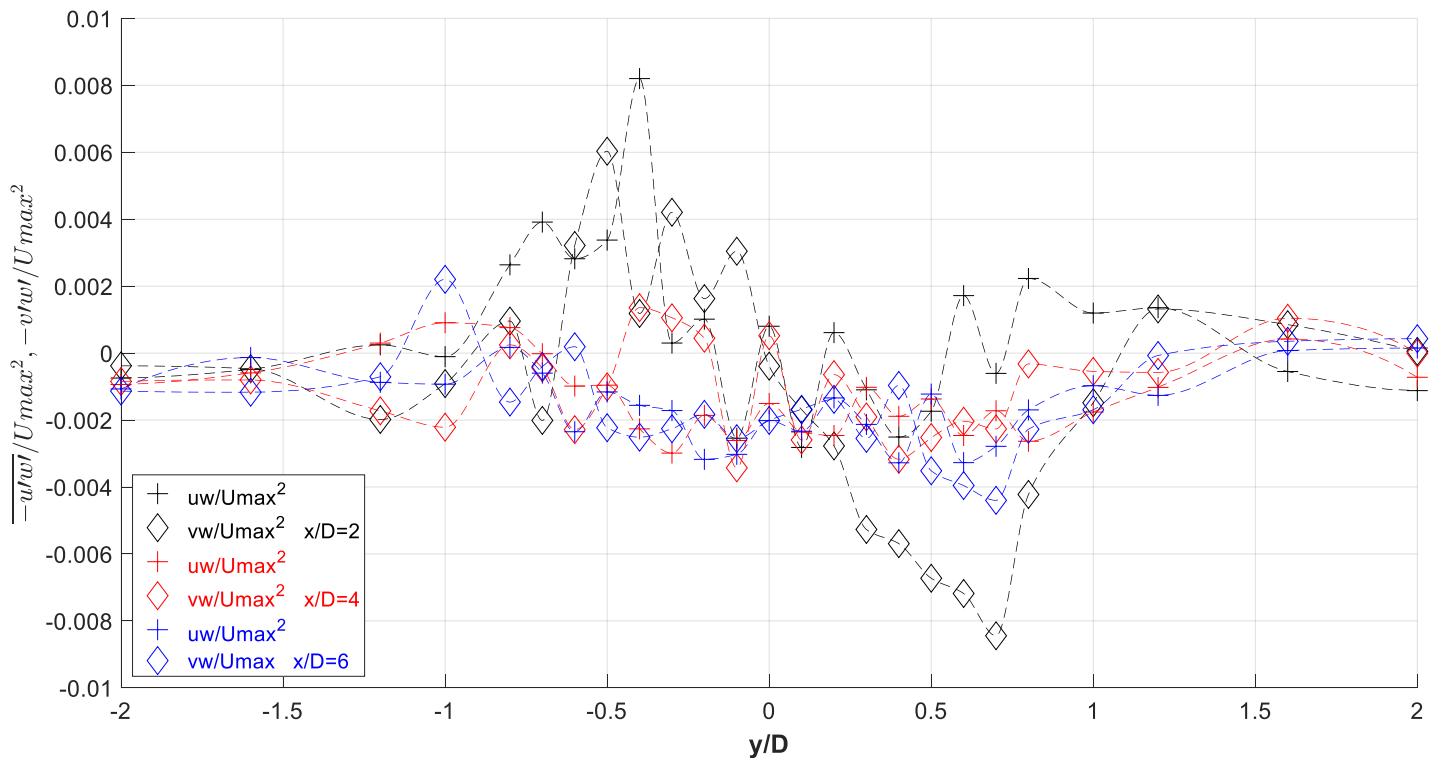
**Σχήμα 4.61** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )



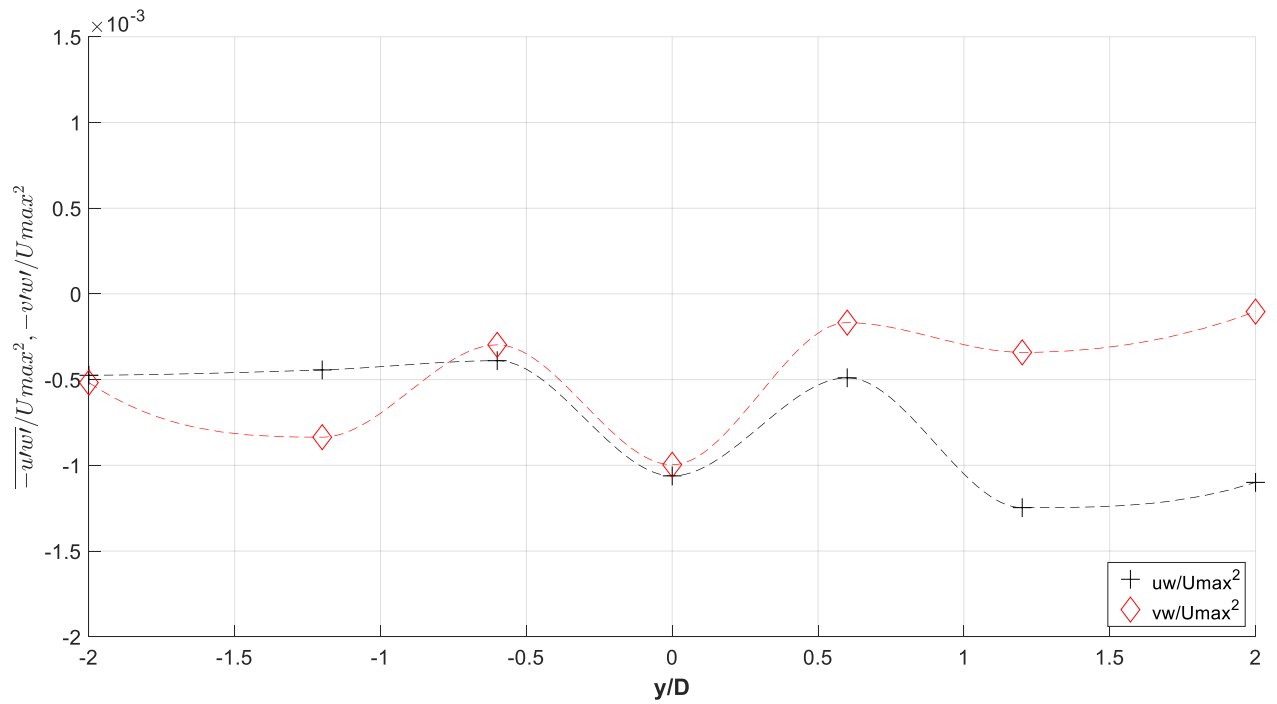
**Σχήμα 4.62** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) κατάντη κυλινδρικής διατομής



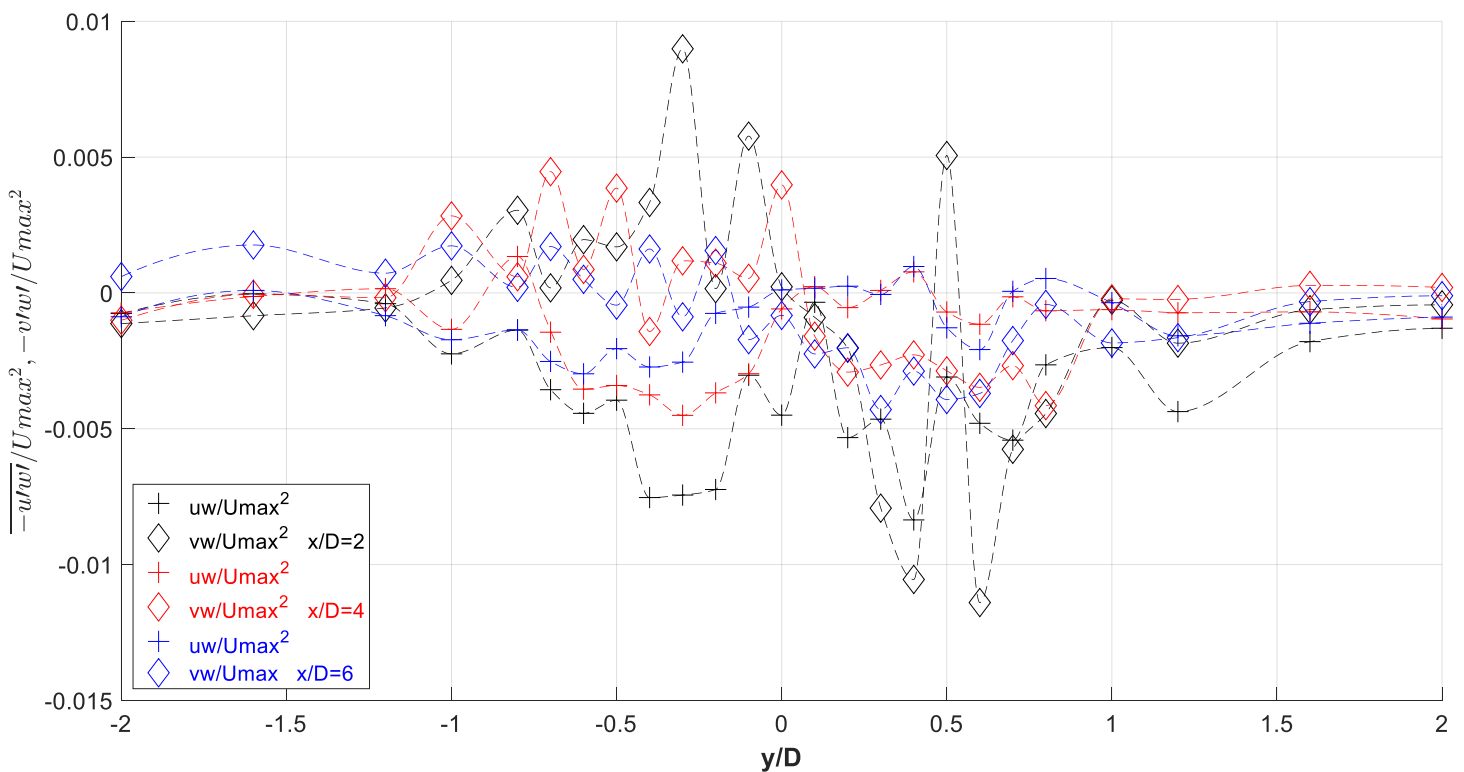
**Σχήμα 4.63** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4.5cm



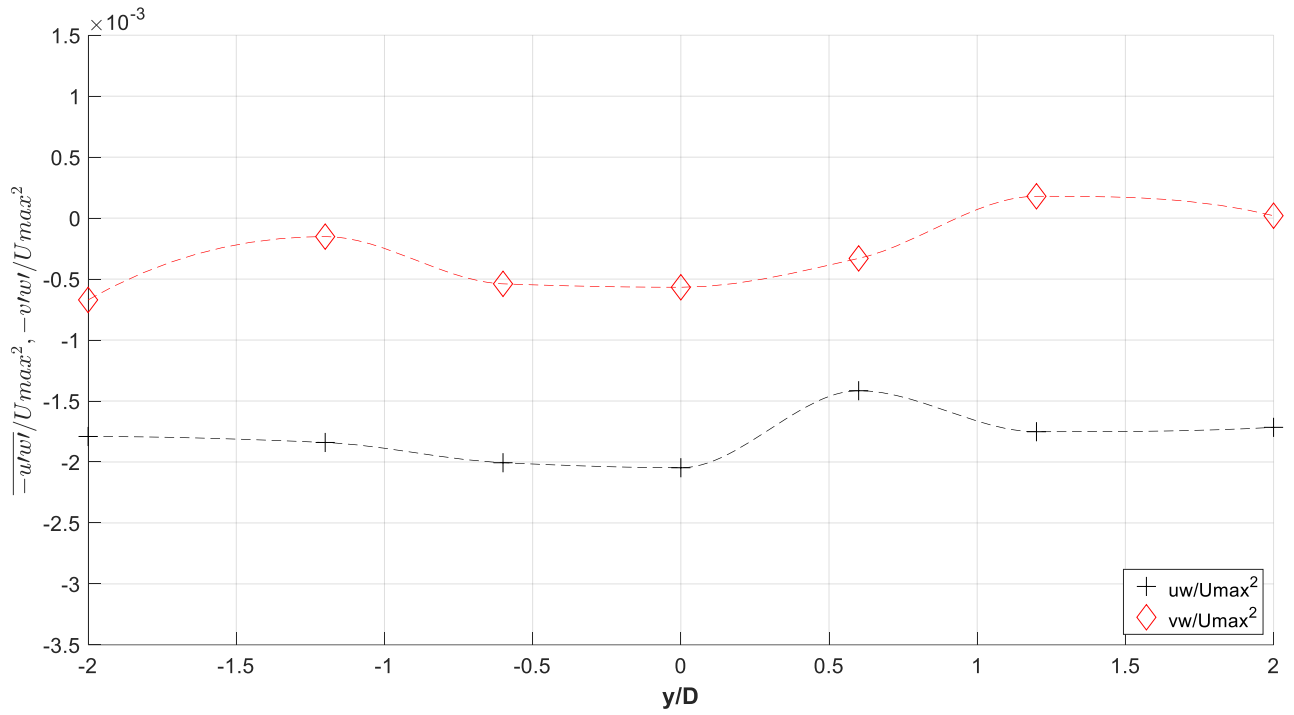
**Σχήμα 4.64** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm ( $x/D=6$ ) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 4,5cm



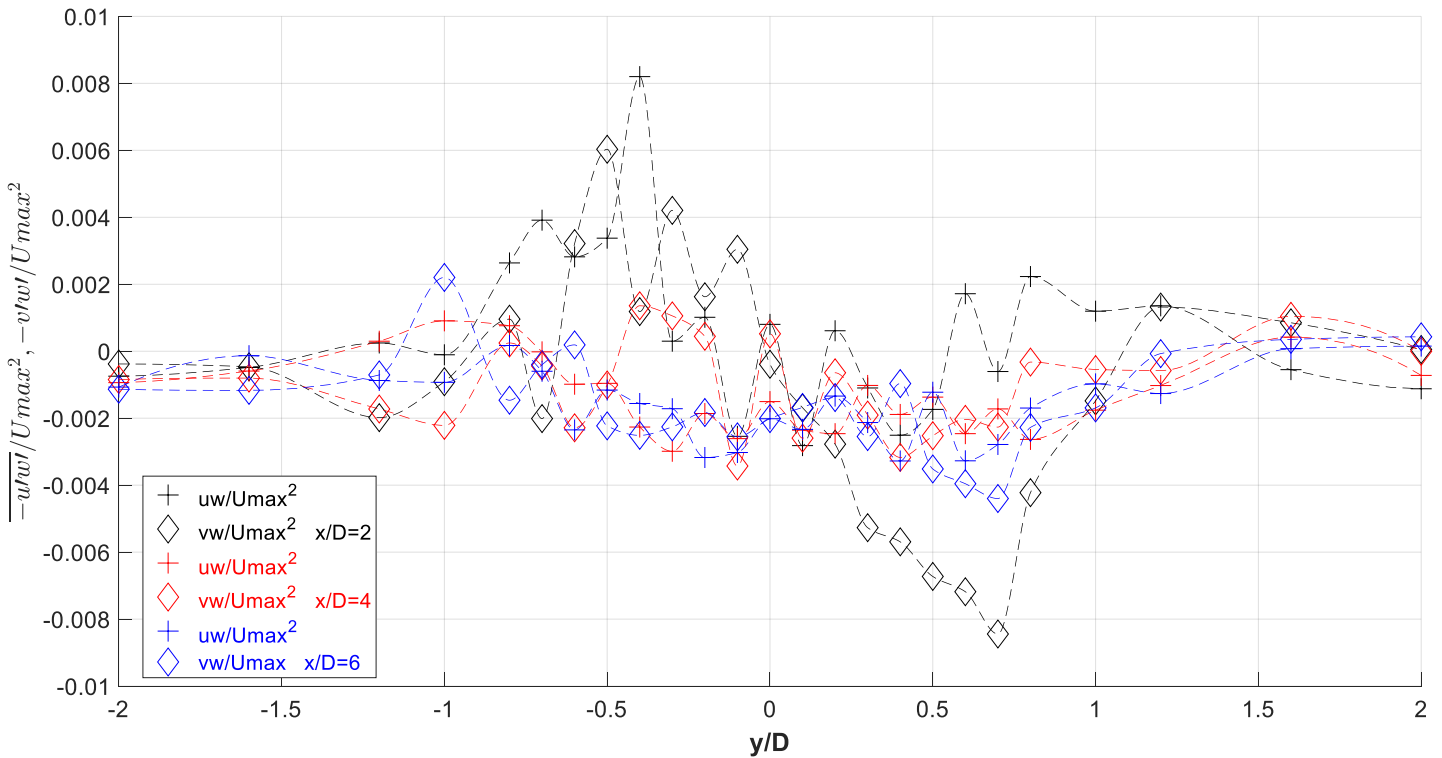
**Σχήμα 4.65** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm



**Σχήμα 4.66** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 9cm

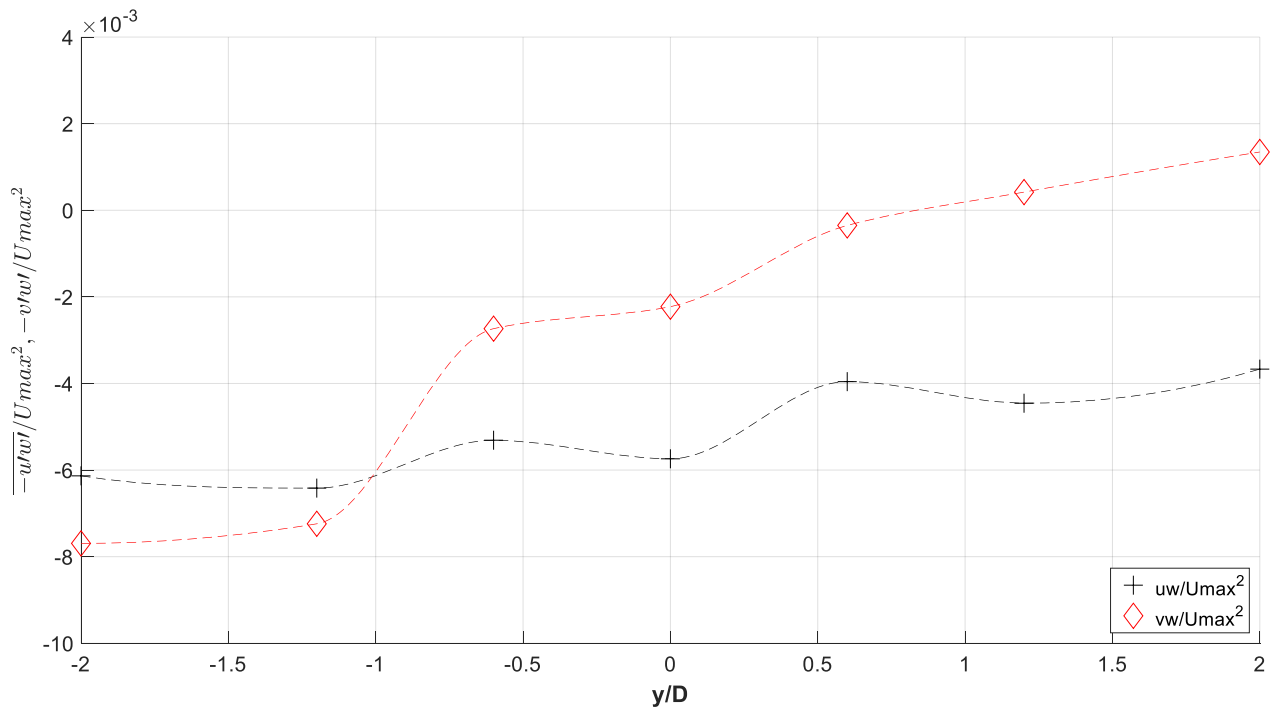


**Σχήμα 4.67** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm

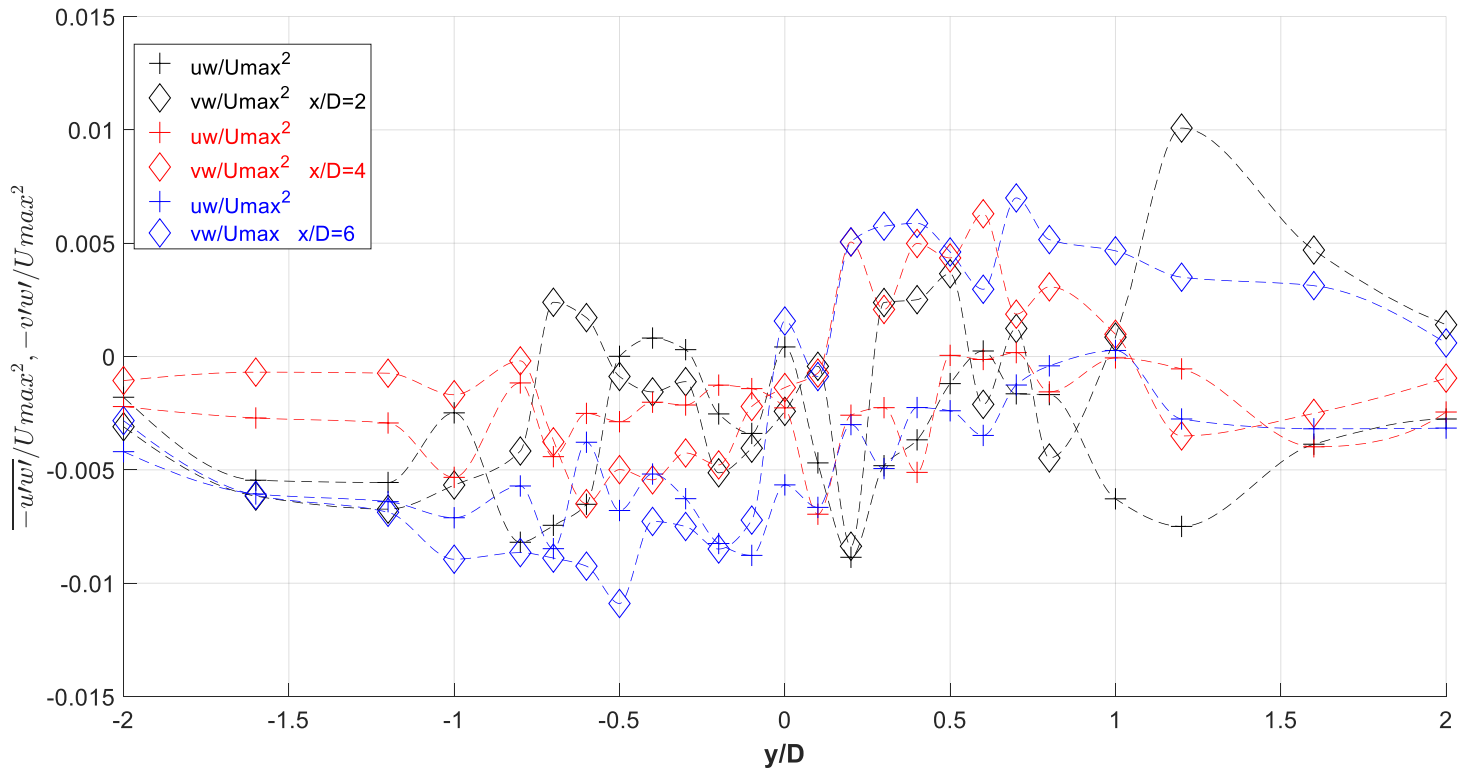


**Σχήμα 4.68** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) κατάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 13.5cm



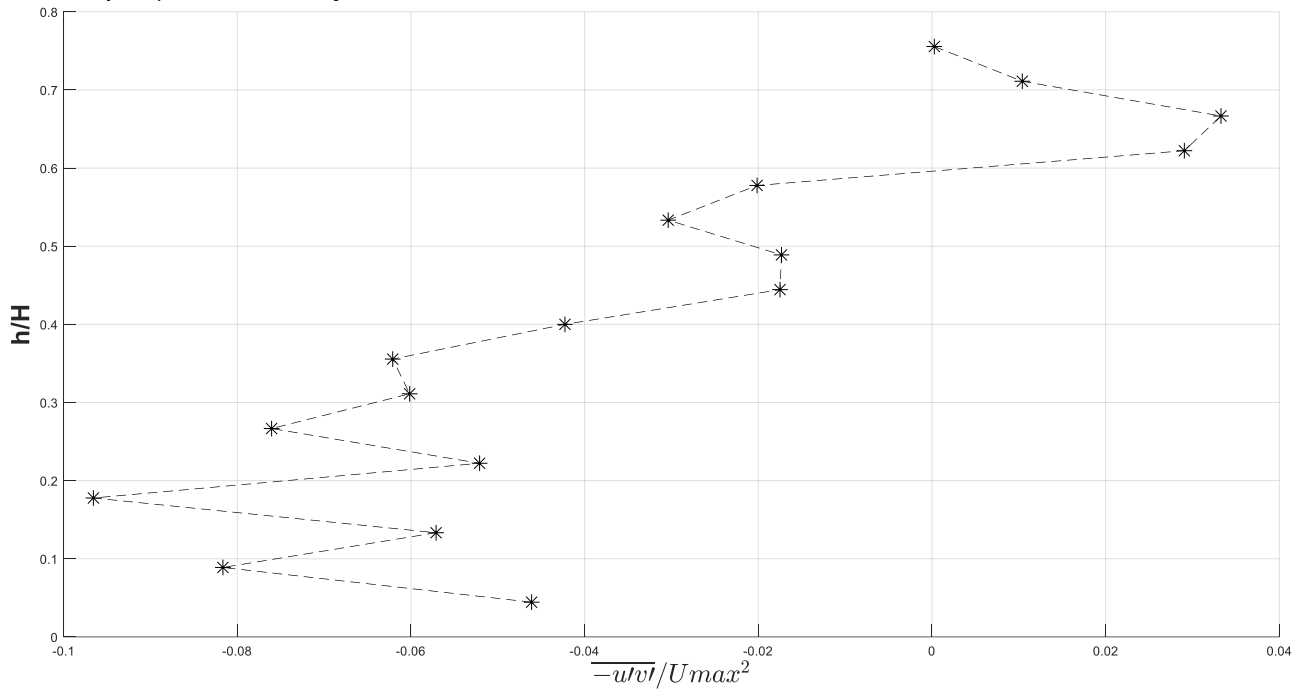


**Σχήμα 4.69** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

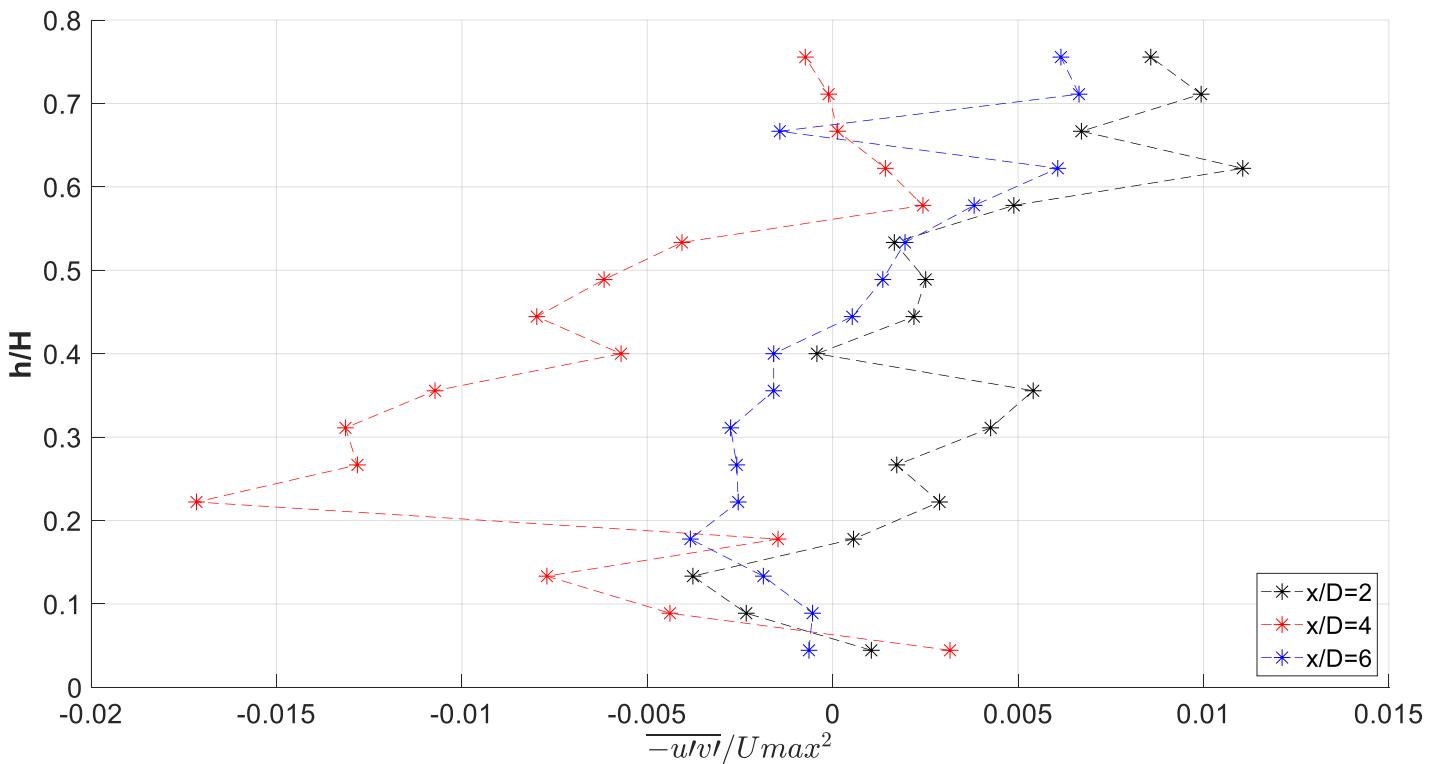


**Σχήμα 4.70** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) κατόπτη κυλινδρικής διατομής σε ύψος 17.1cm

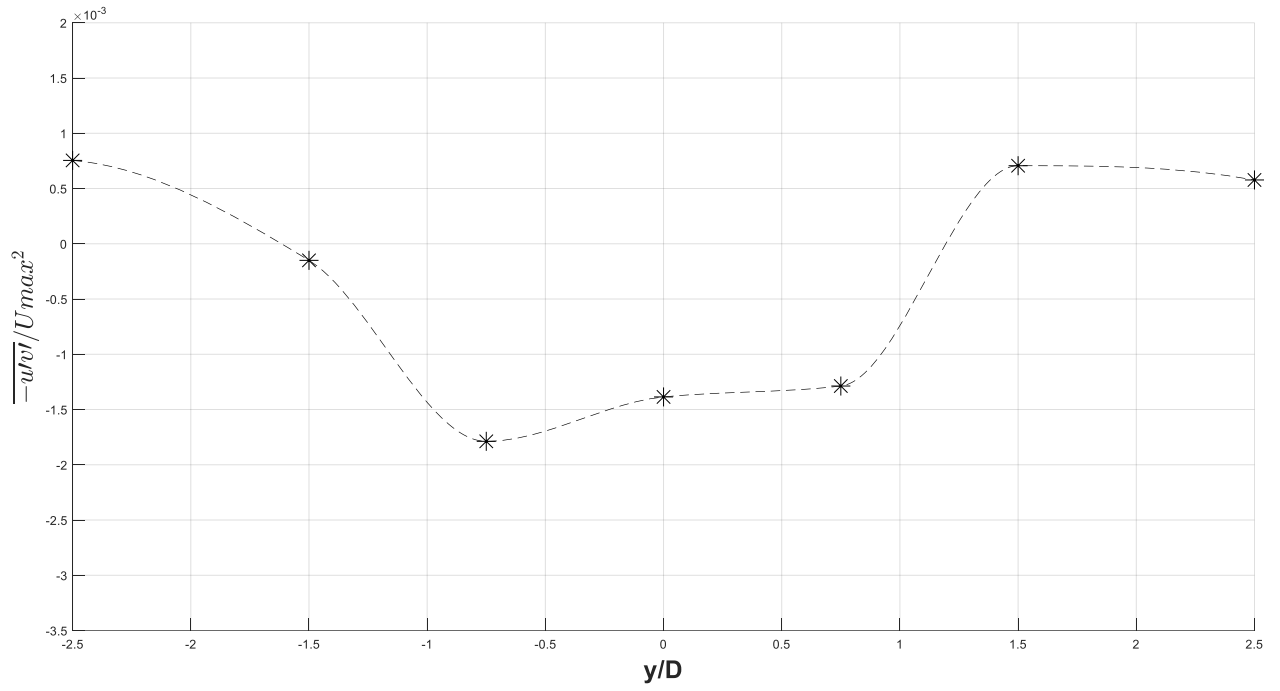
4.2.2 Ορθογώνιο πλάτους D=4cm και L=10cm (L/D=2.5)



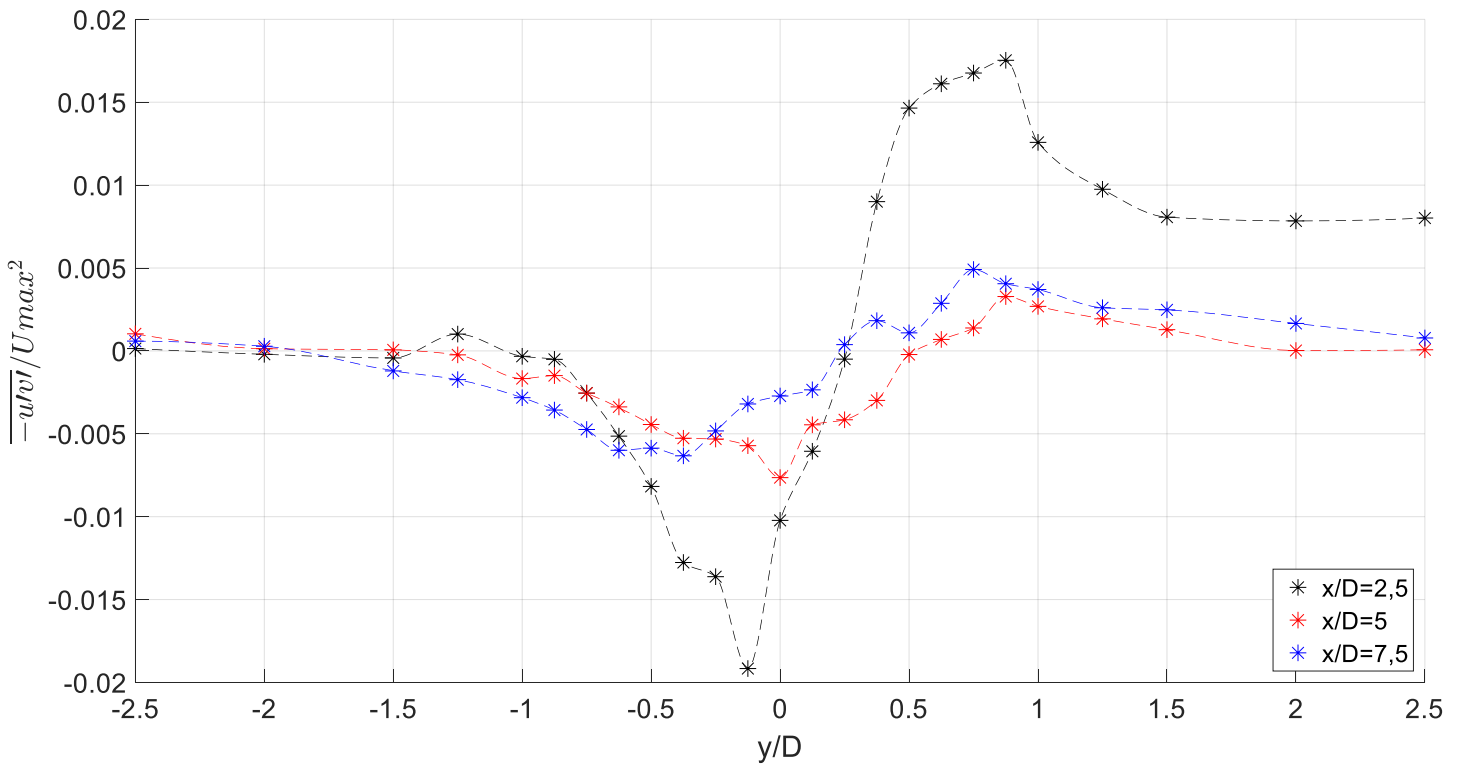
**Σχήμα 4.71** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 30cm (x/D=7,5)



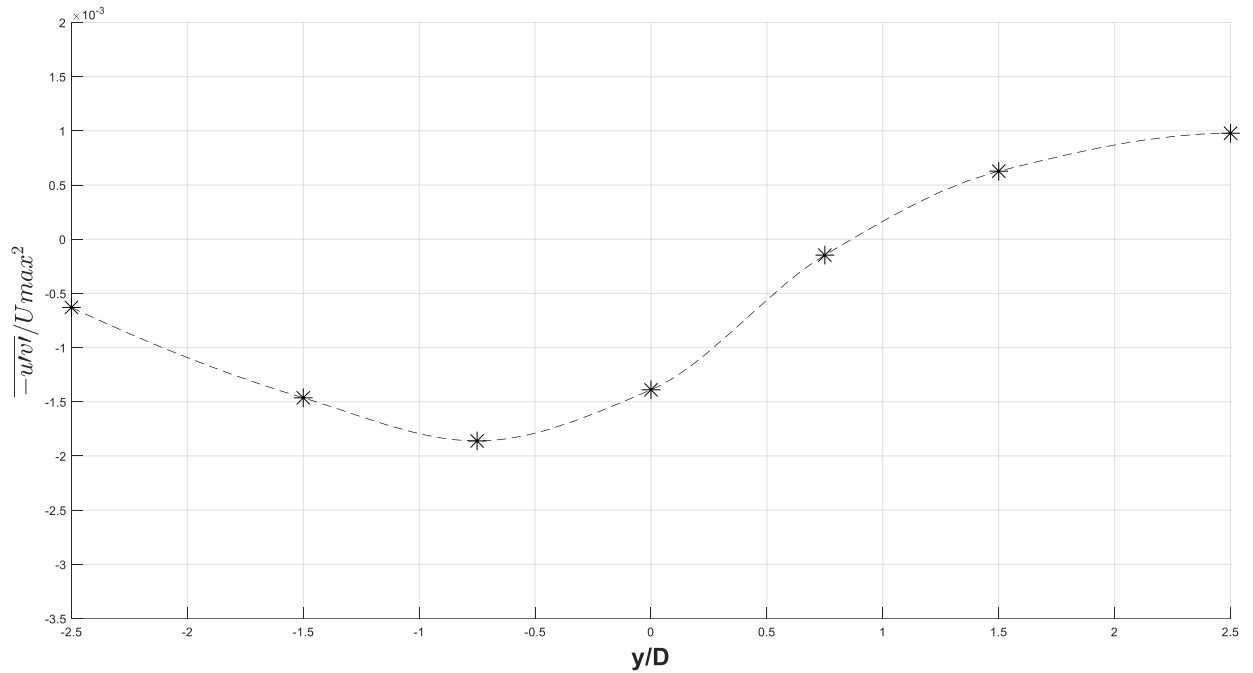
**Σχήμα 4.72** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10



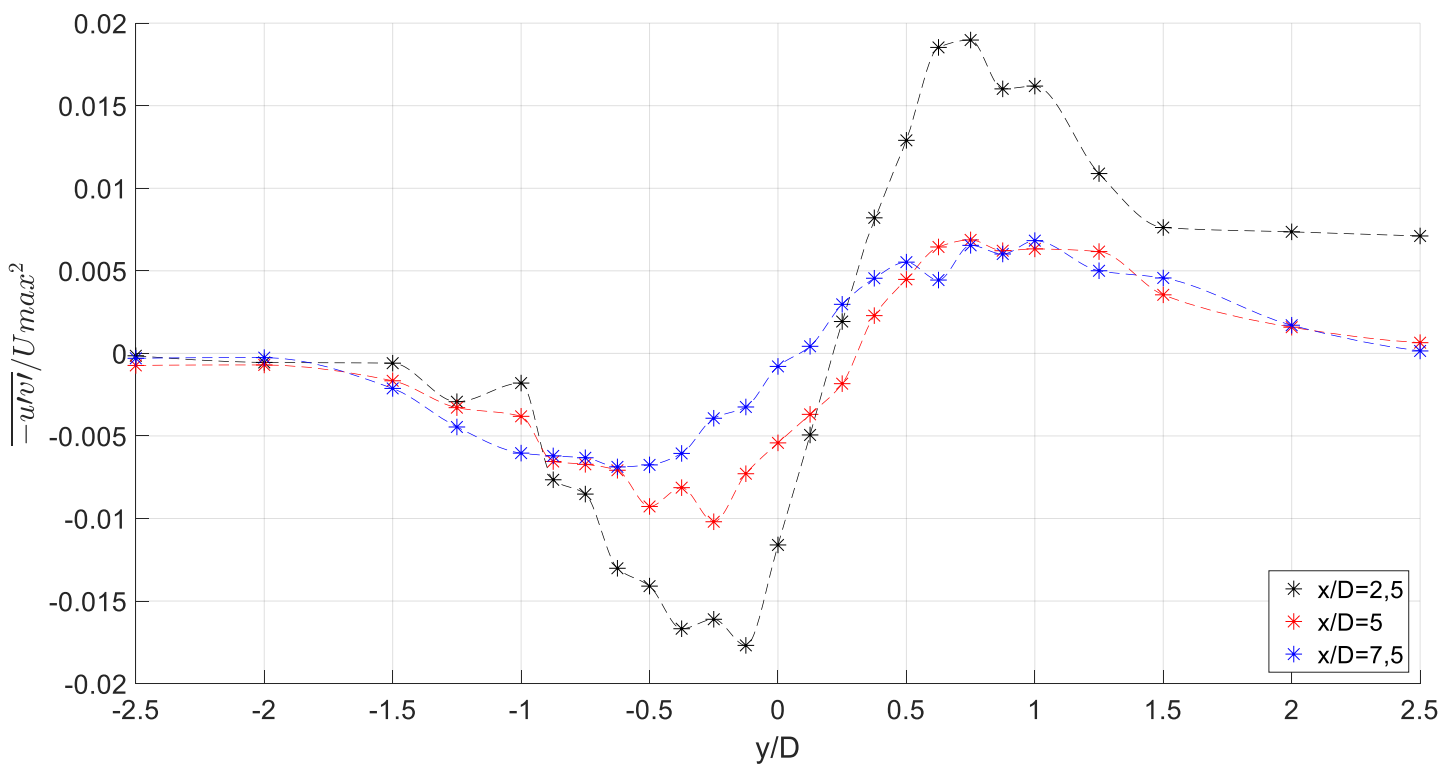
**Σχήμα 4.73** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm



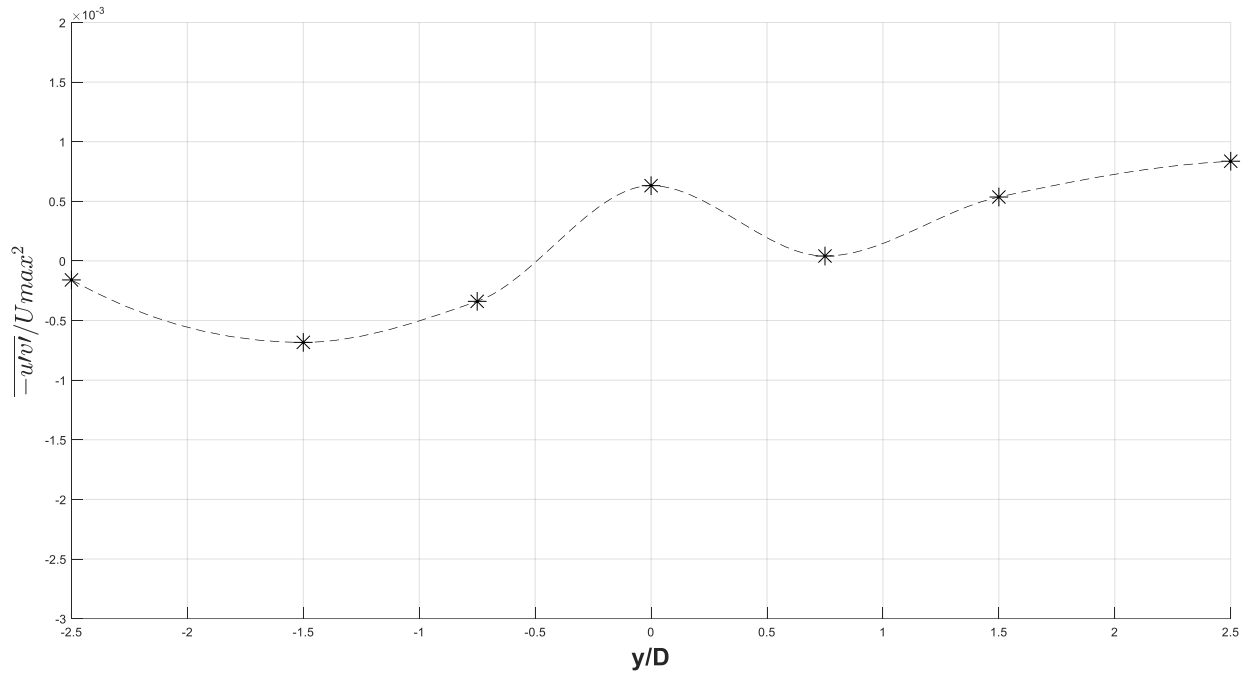
**Σχήμα 4.74** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4,5cm



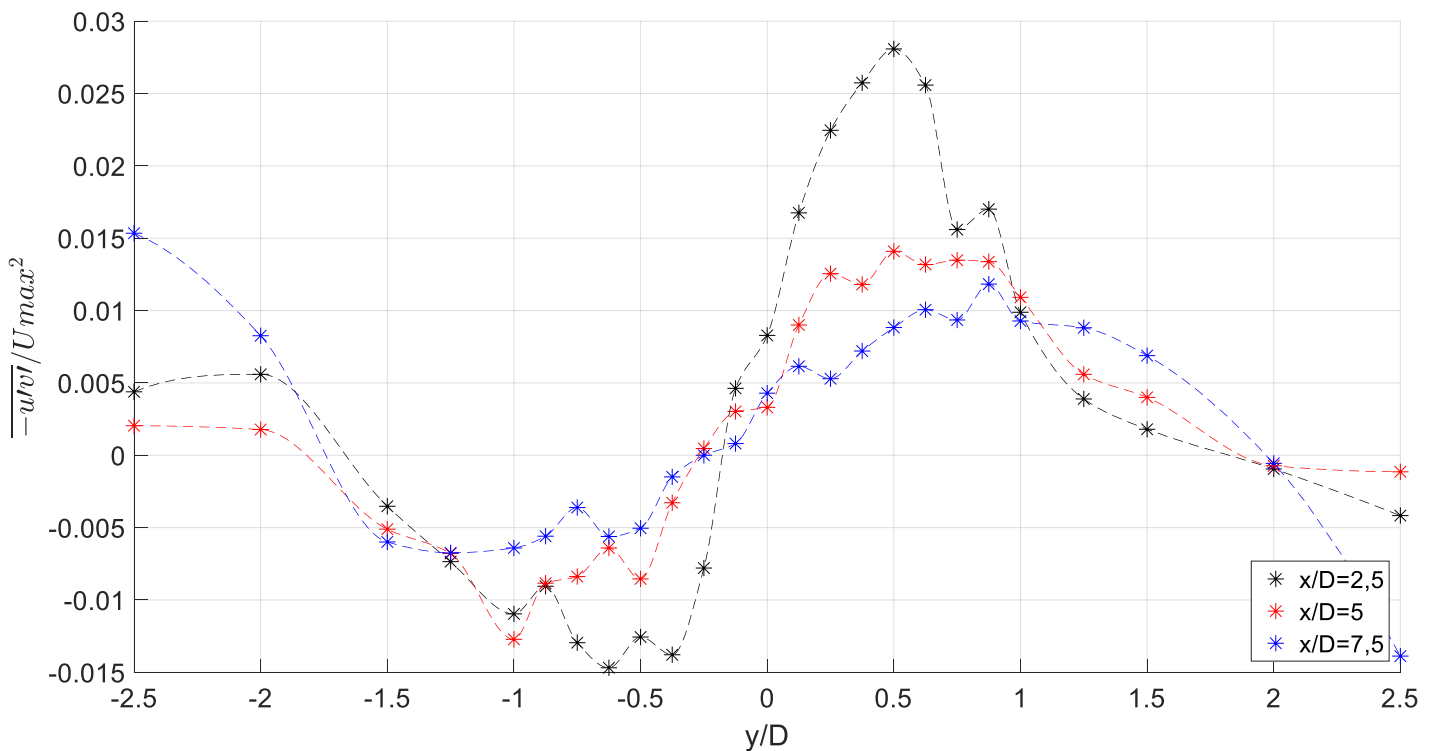
**Σχήμα 4.75** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



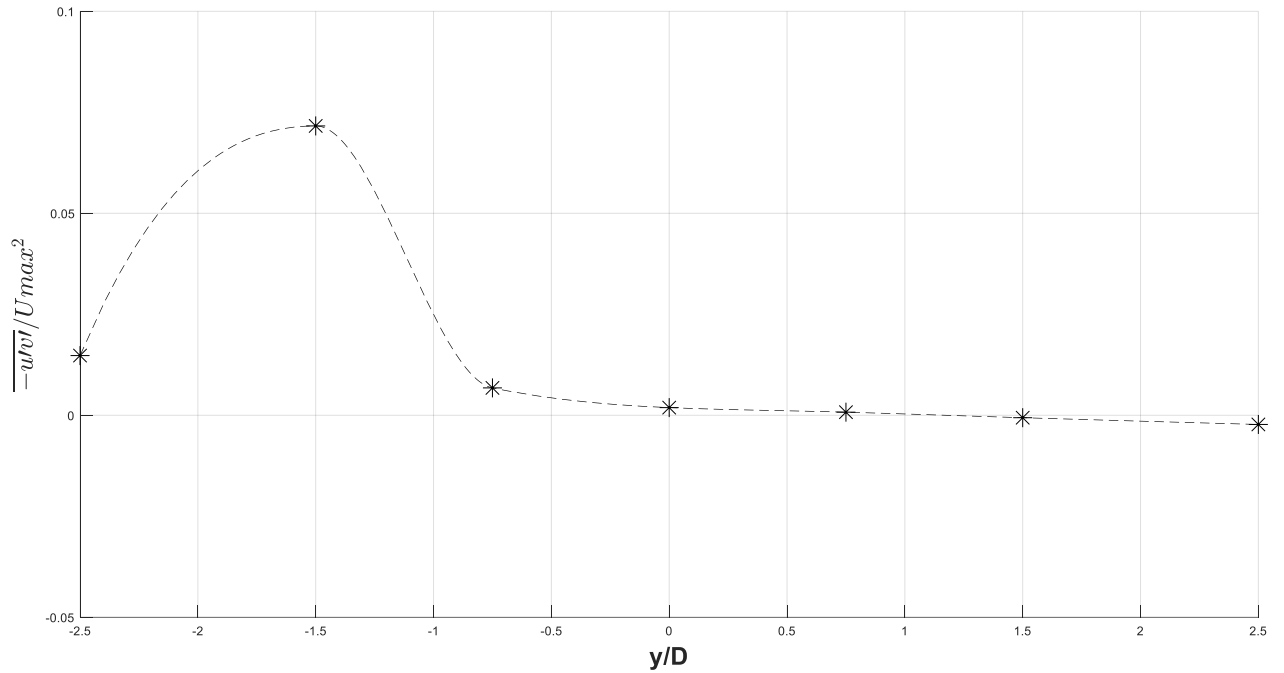
**Σχήμα 4.76** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



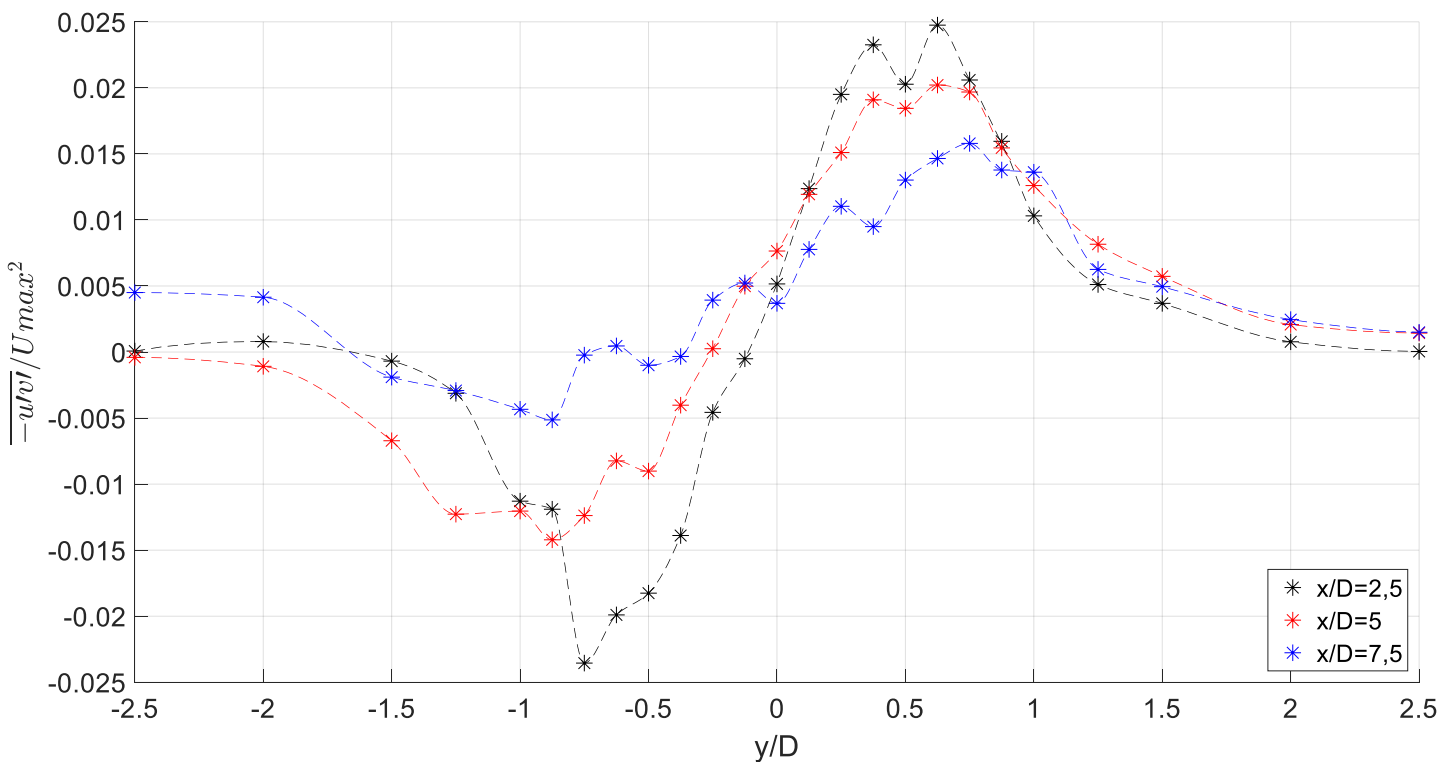
**Σχήμα 4.77** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm



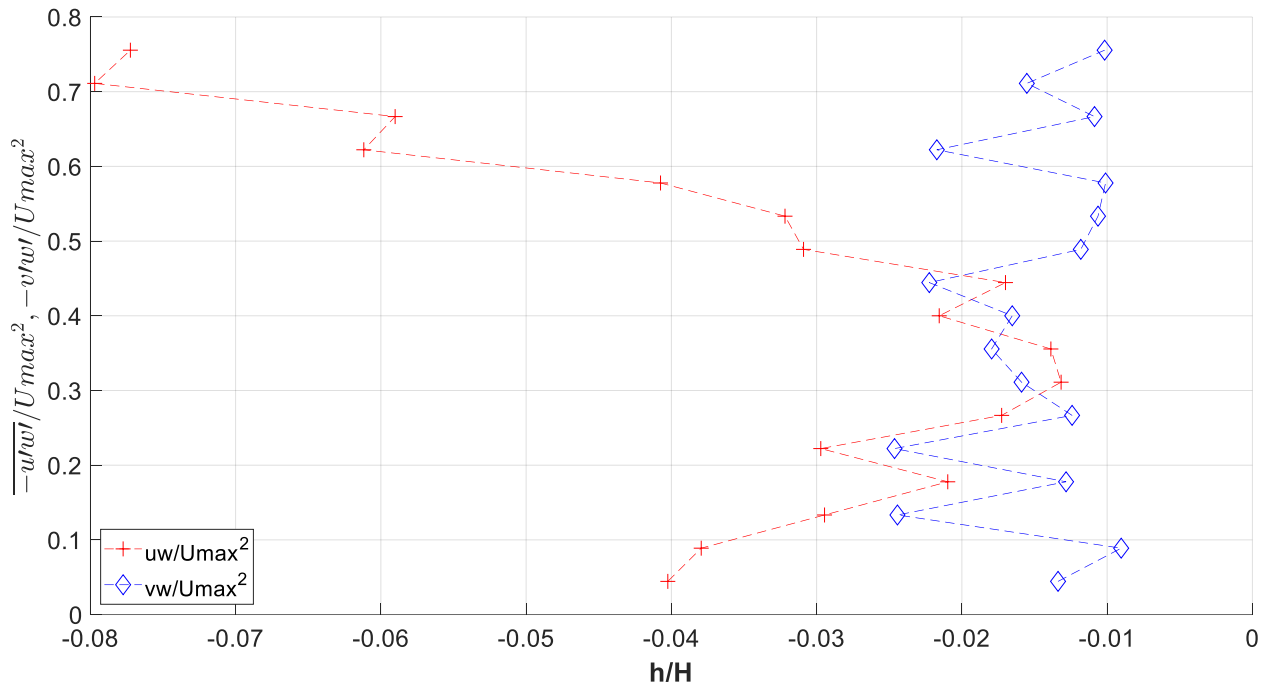
**Σχήμα 4.78** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm



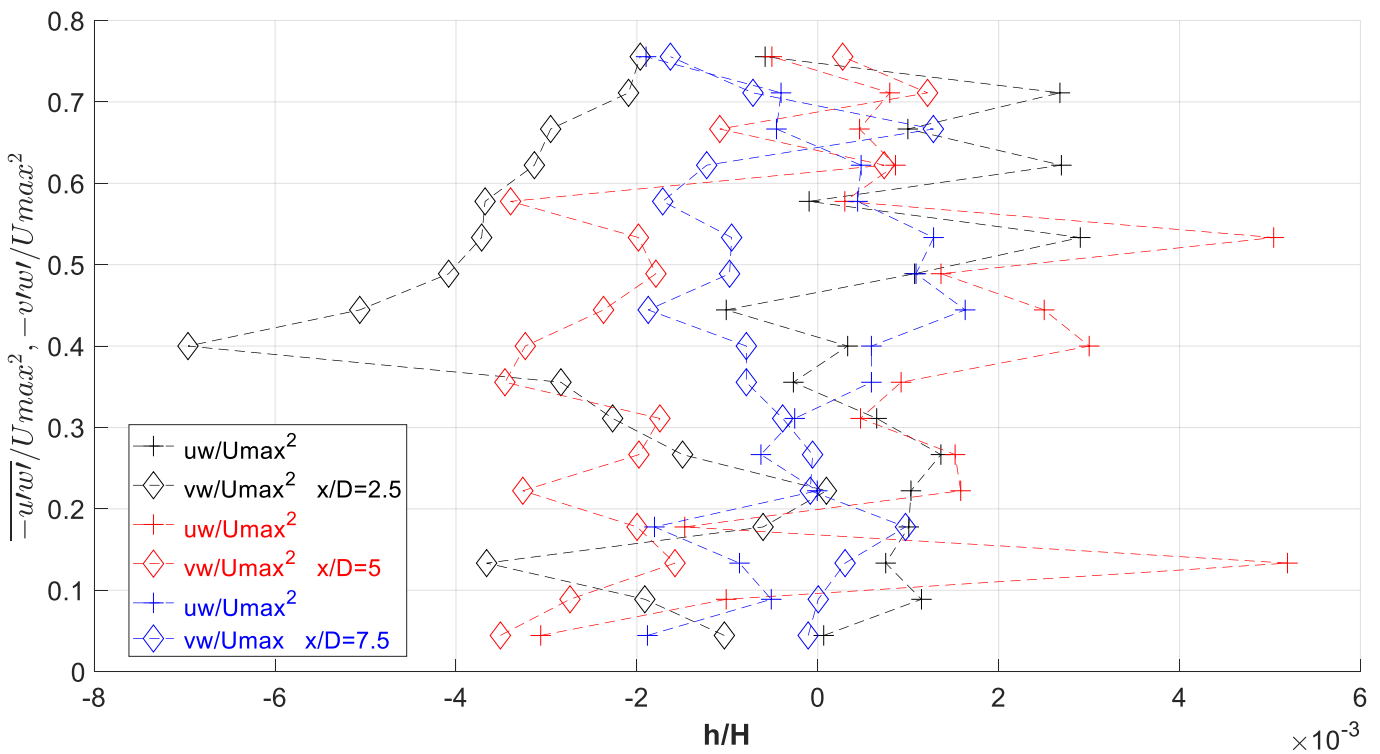
**Σχήμα 4.79** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm



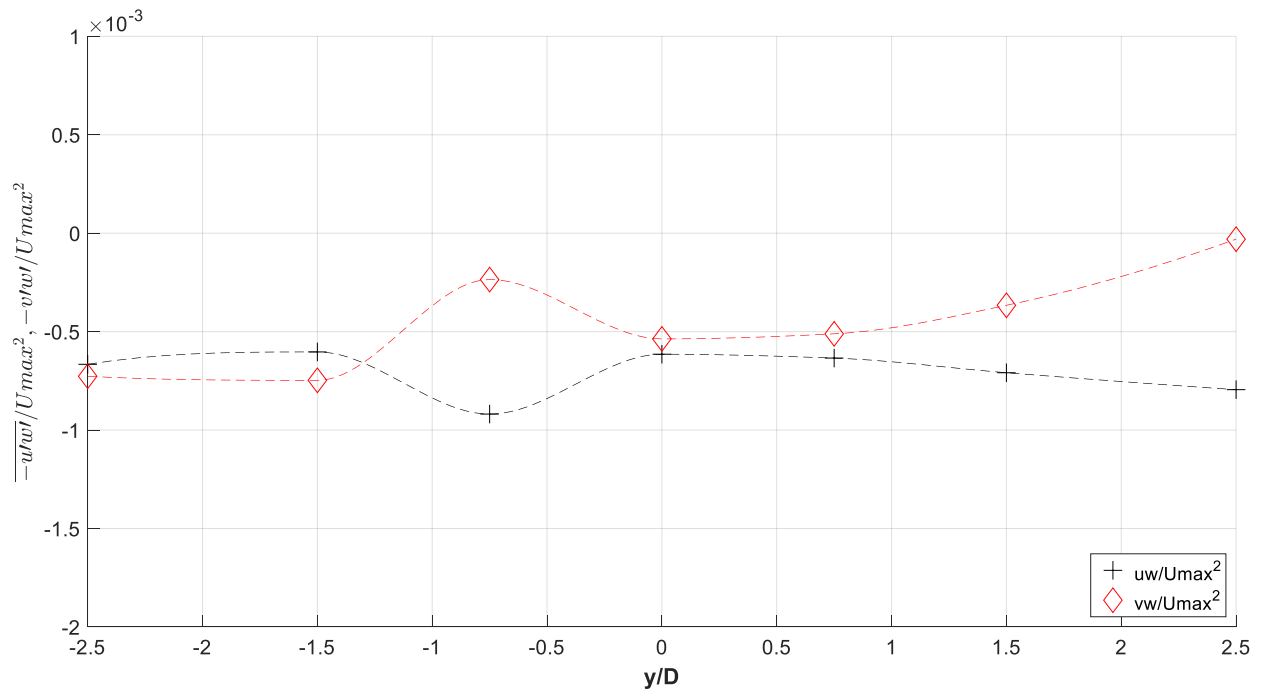
**Σχήμα 4.80** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm



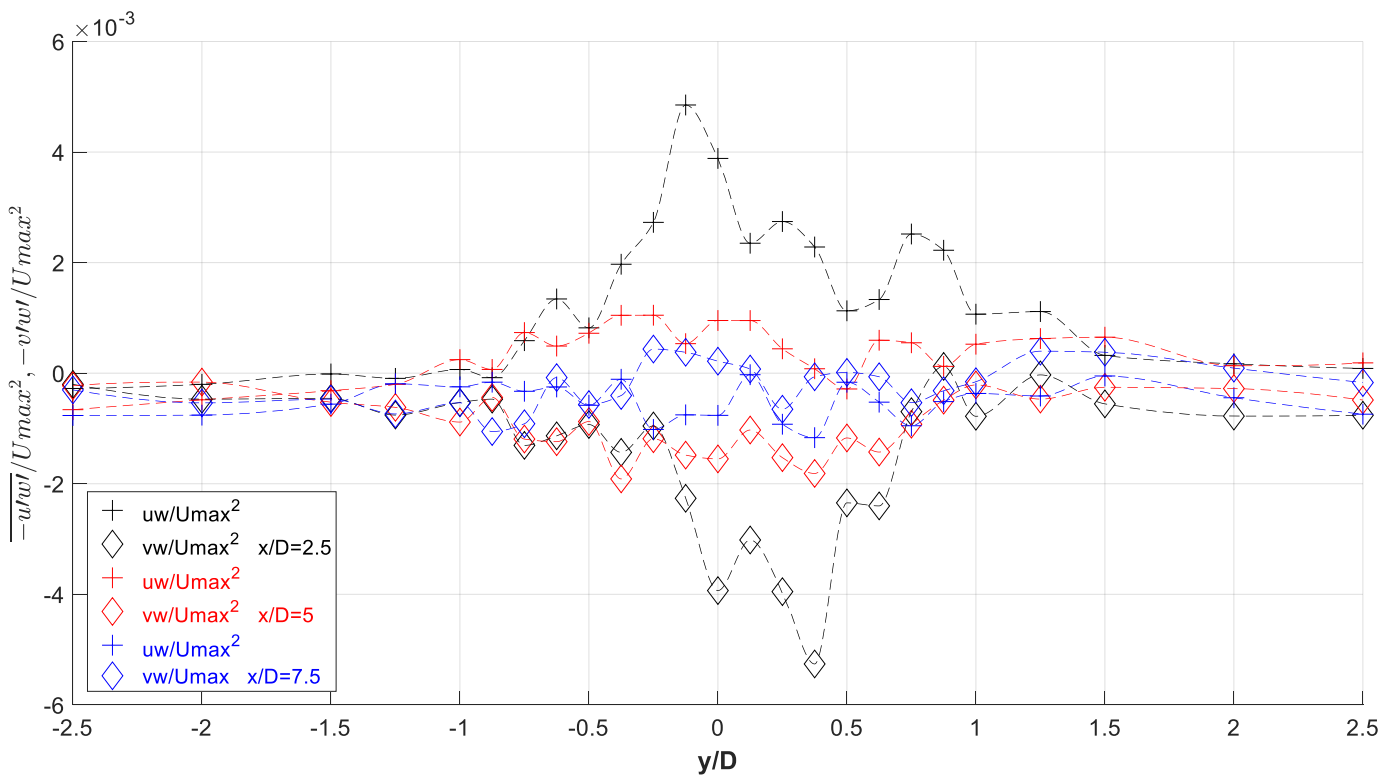
**Σχήμα 4.81** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )



**Σχήμα 4.82** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10

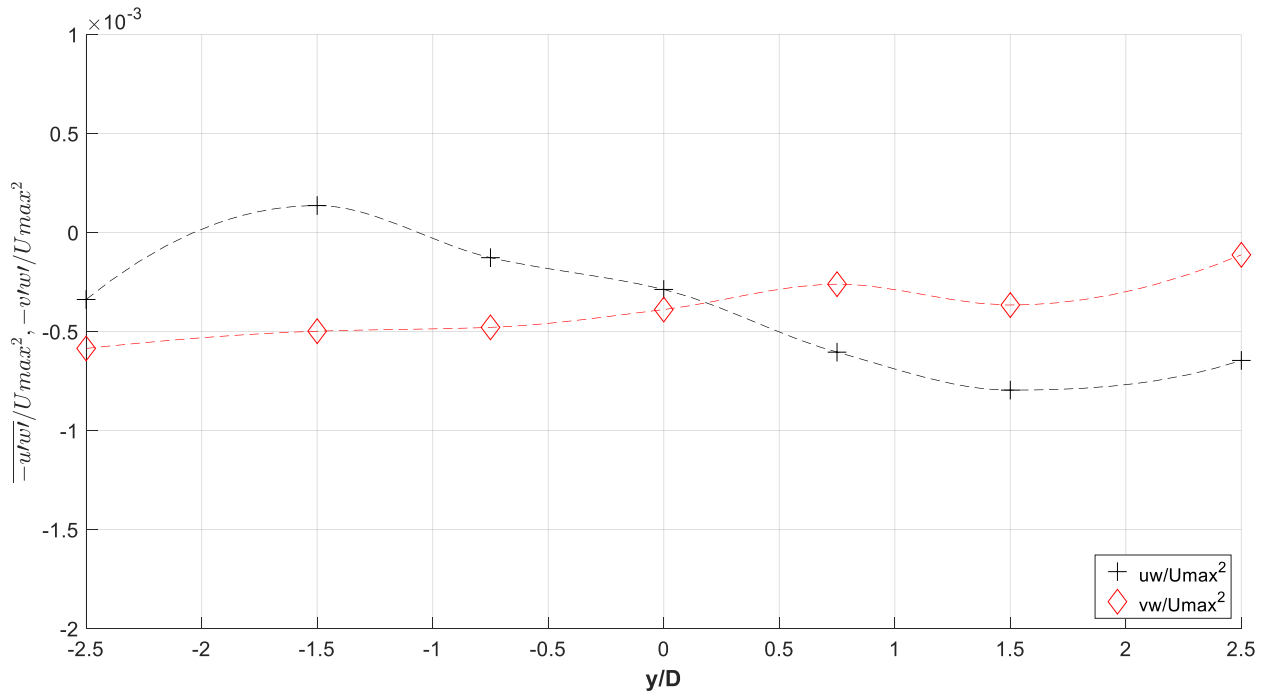


**Σχήμα 4.83** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm

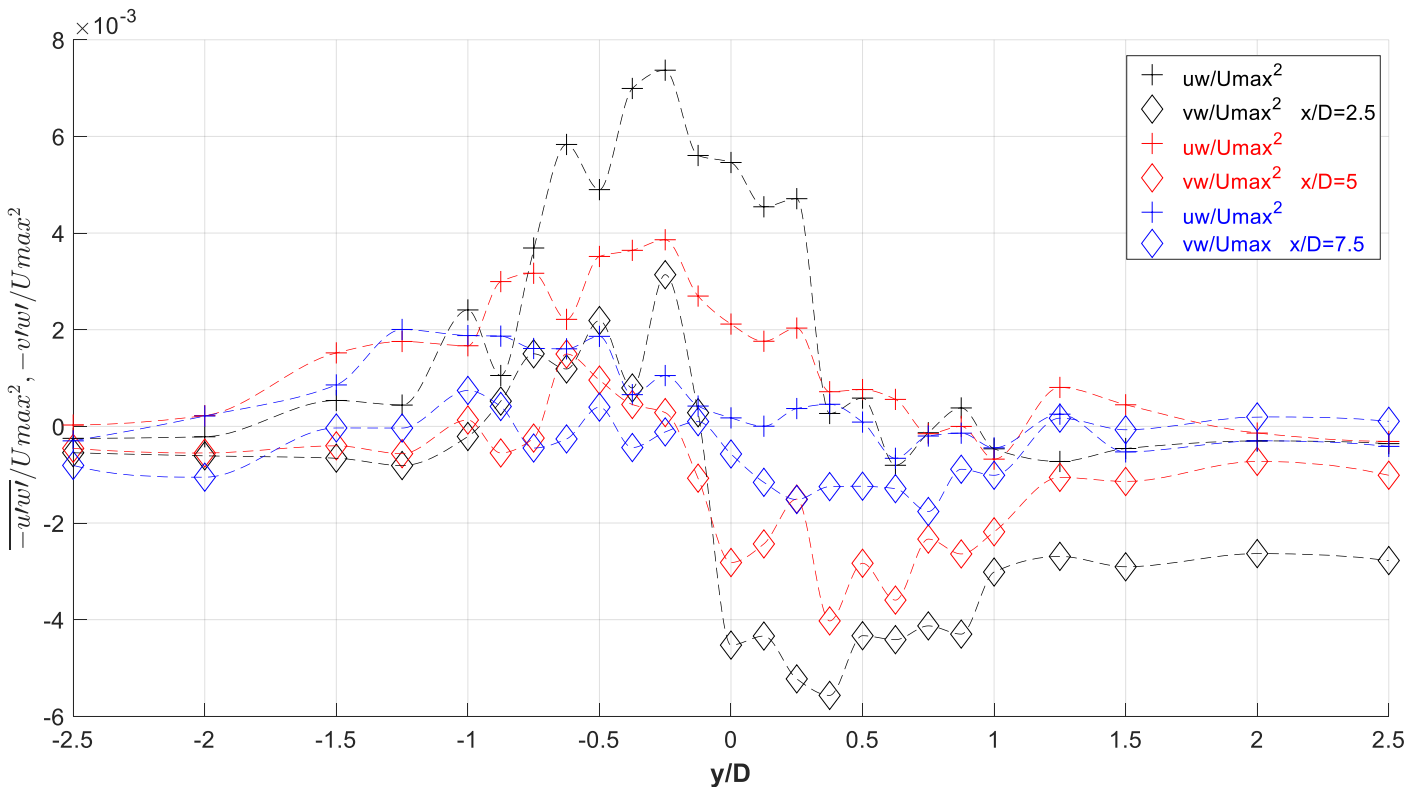


**Σχήμα 4.84** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2,5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7,5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm

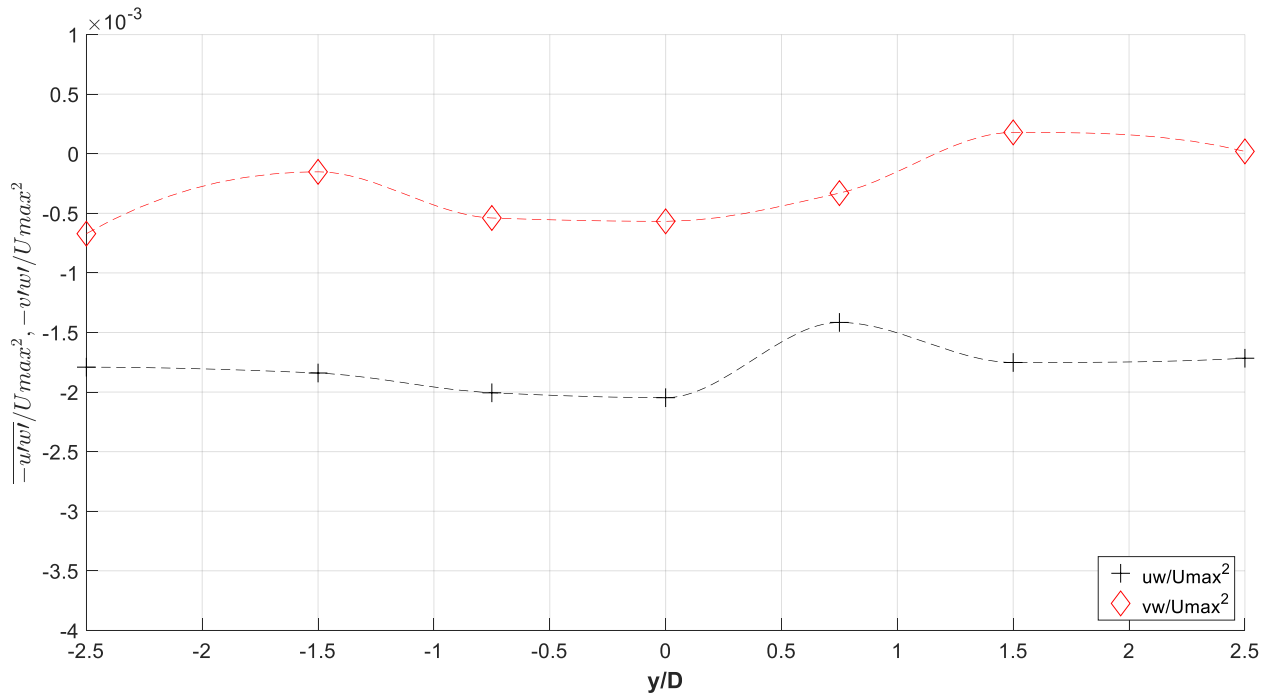




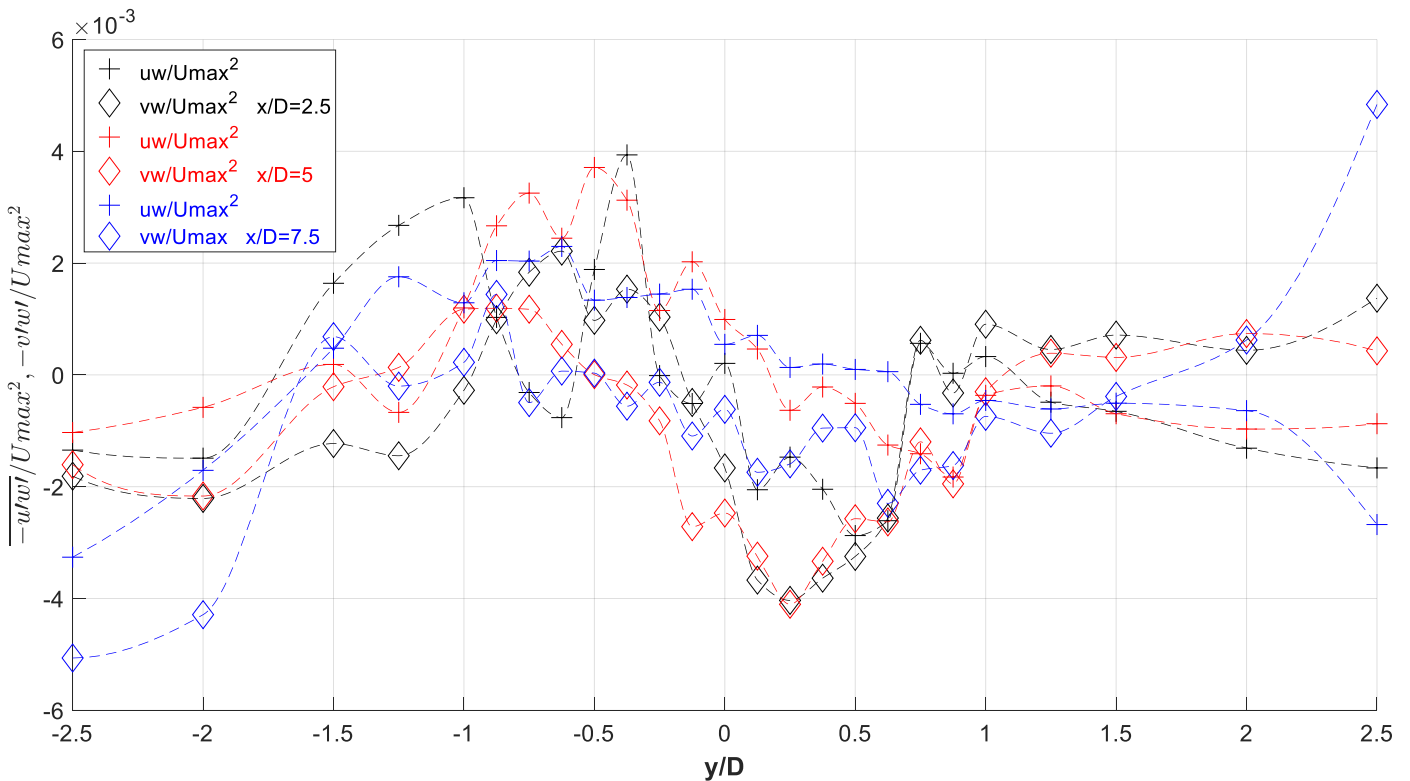
**Σχήμα 4.85** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



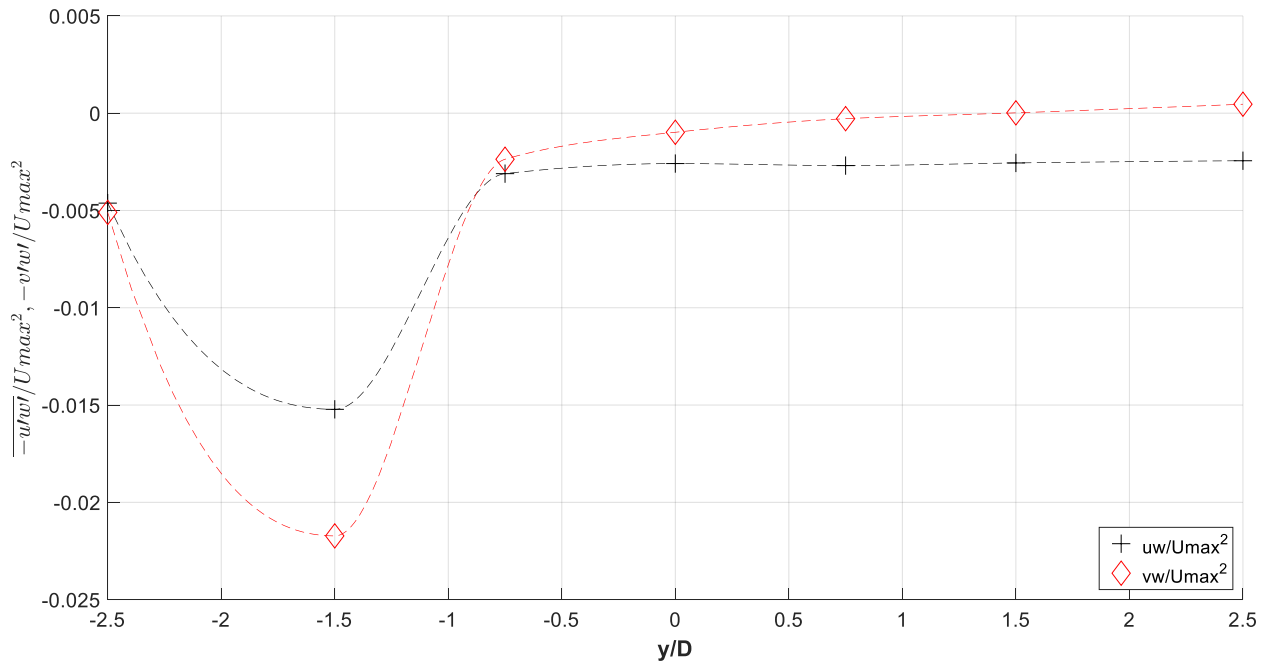
**Σχήμα 4.86** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2,5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7,5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 9cm



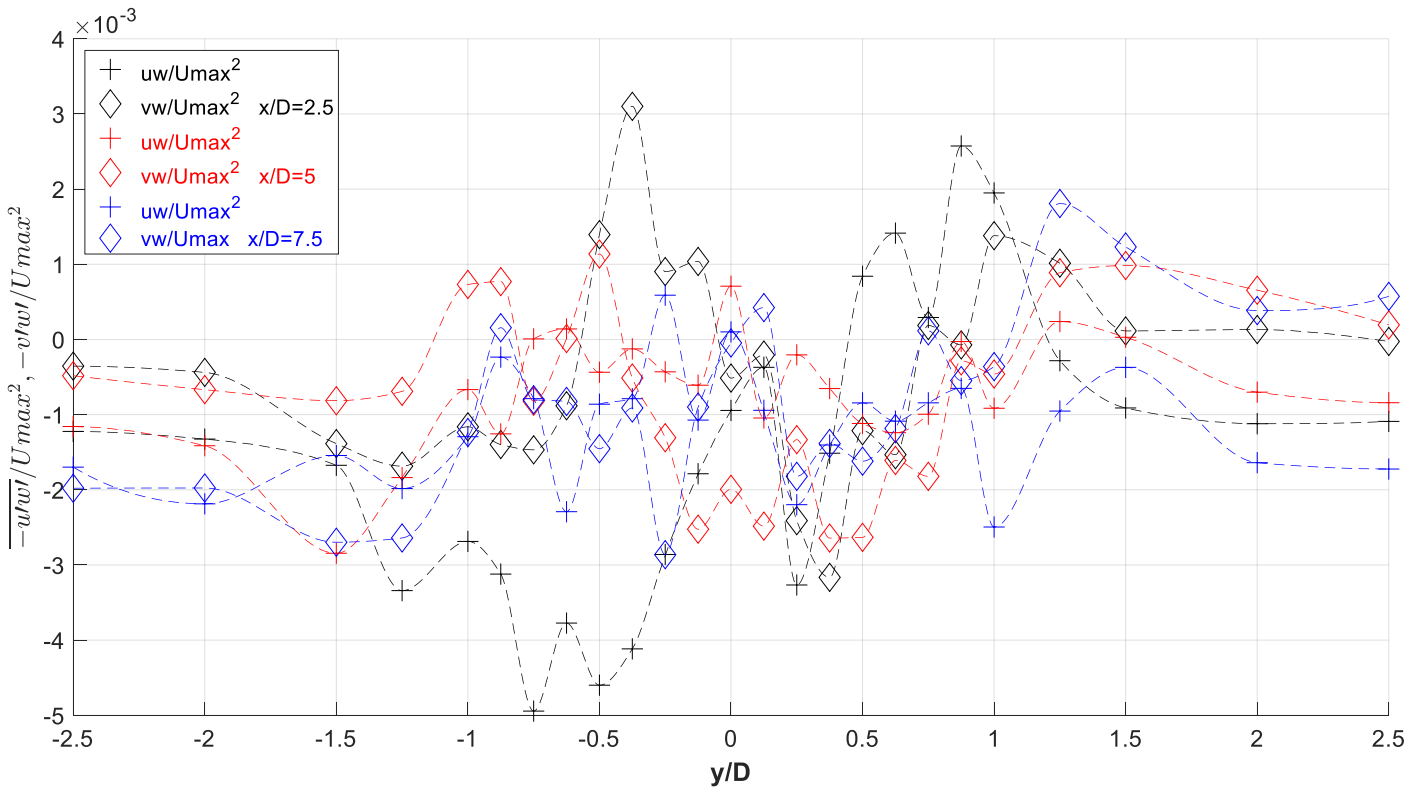
**Σχήμα 4.87** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13,5cm



**Σχήμα 4.88** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2,5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7,5$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 13.5cm

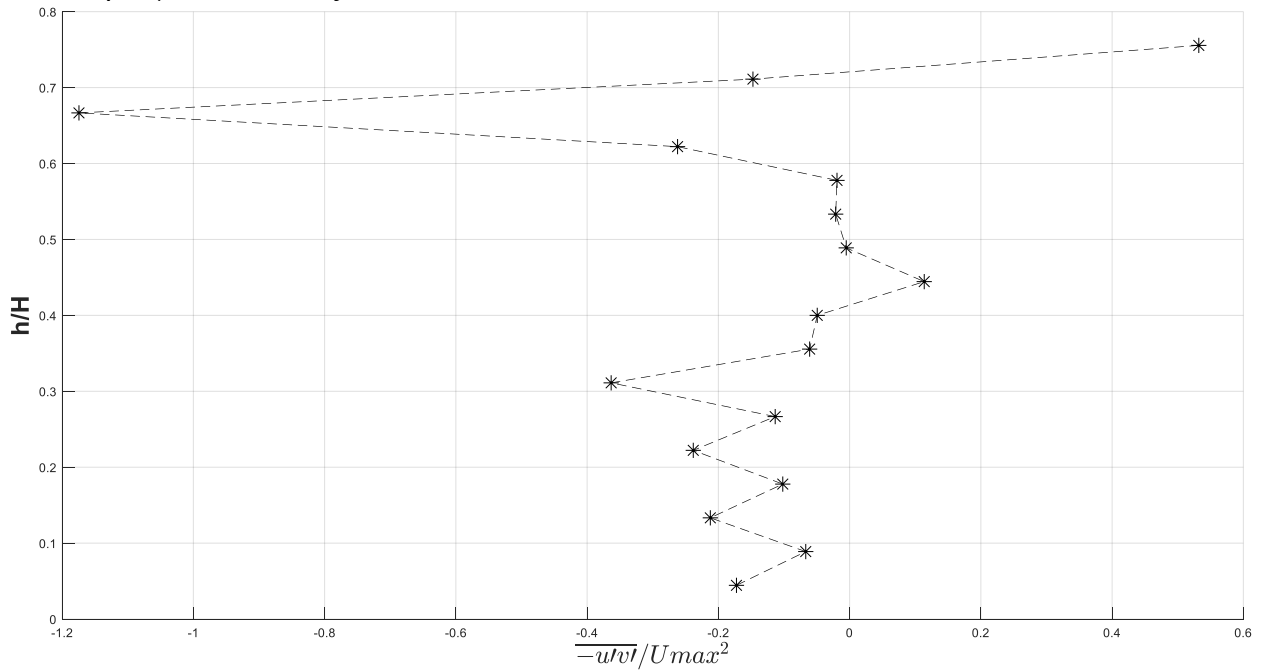


**Σχήμα 4.89** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

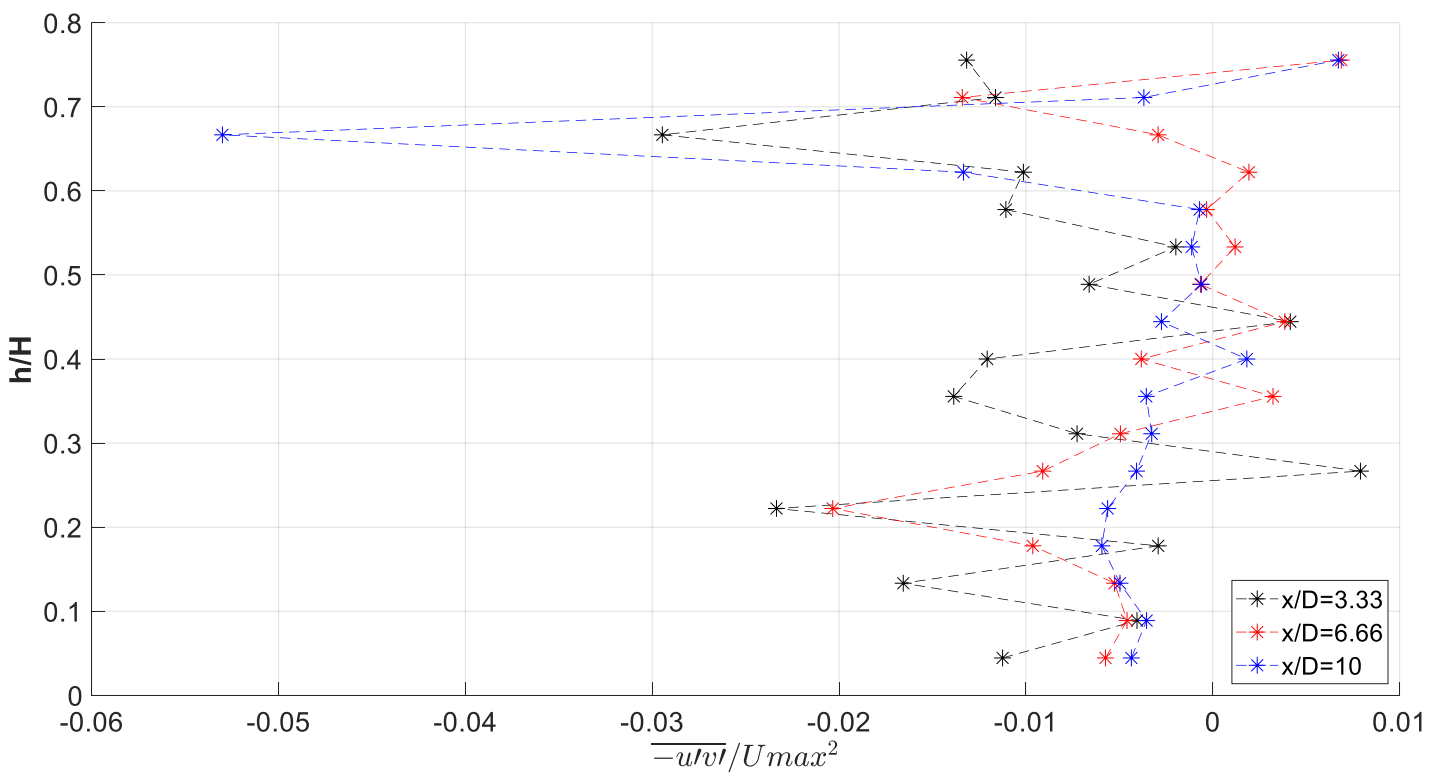


**Σχήμα 4.90** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2,5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7,5) κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 17.1cm

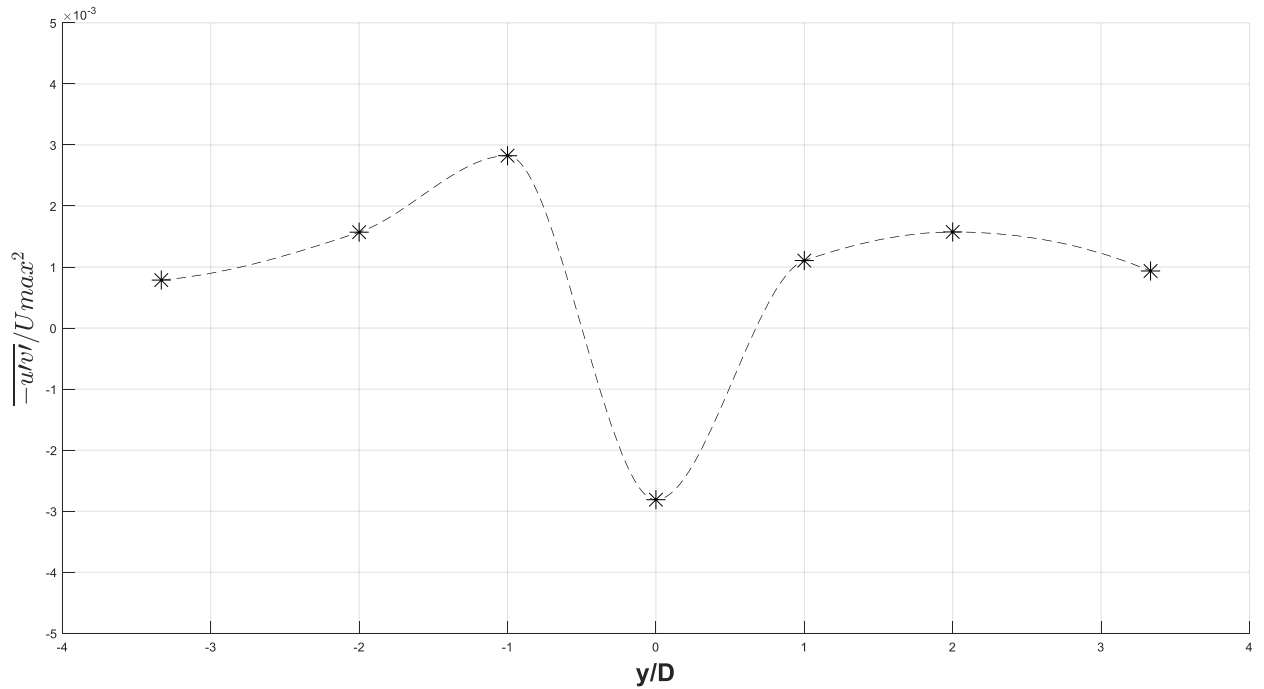
4.2.3 Ορθογώνιο πλάτους D=3cm και L=6cm (L/D=2)



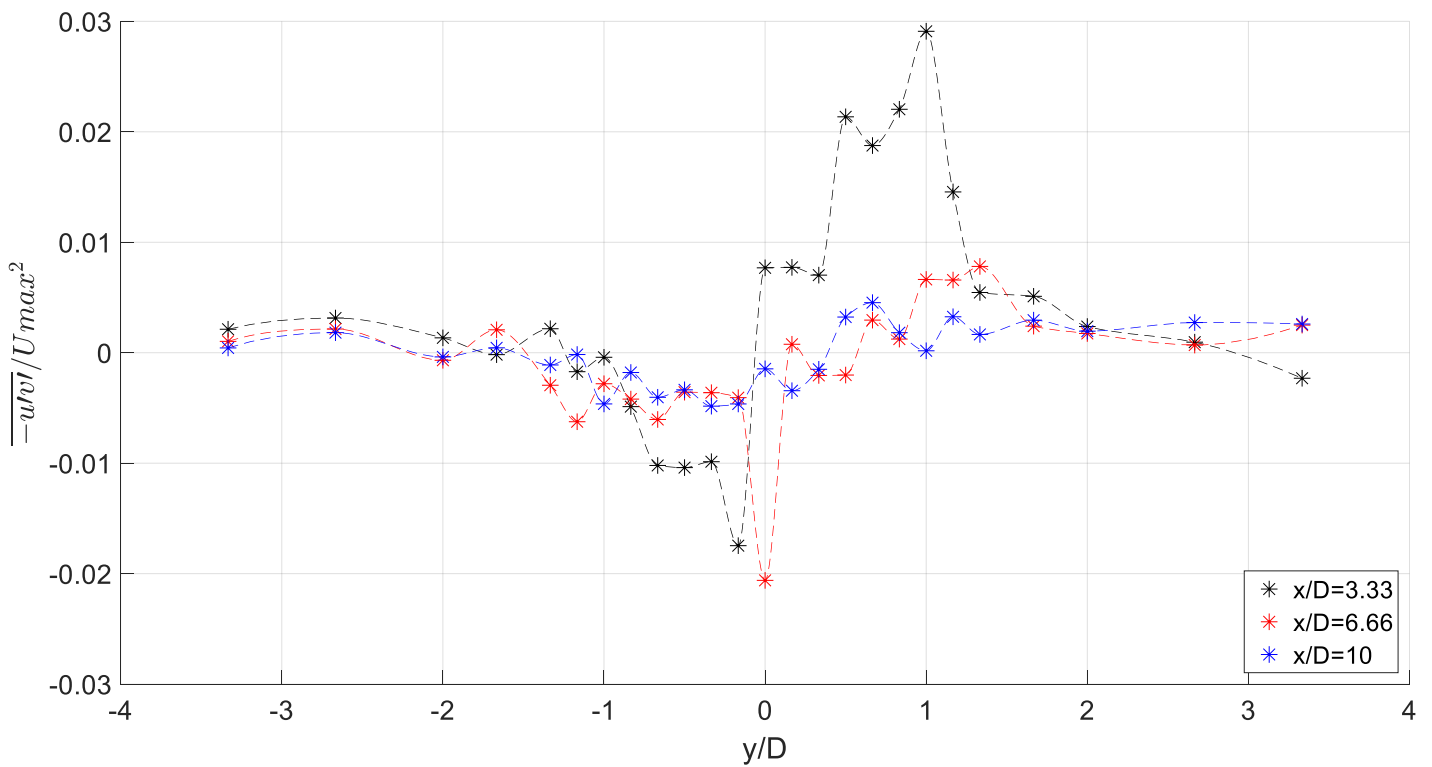
**Σχήμα 4.91** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 30cm (x/D=-10)



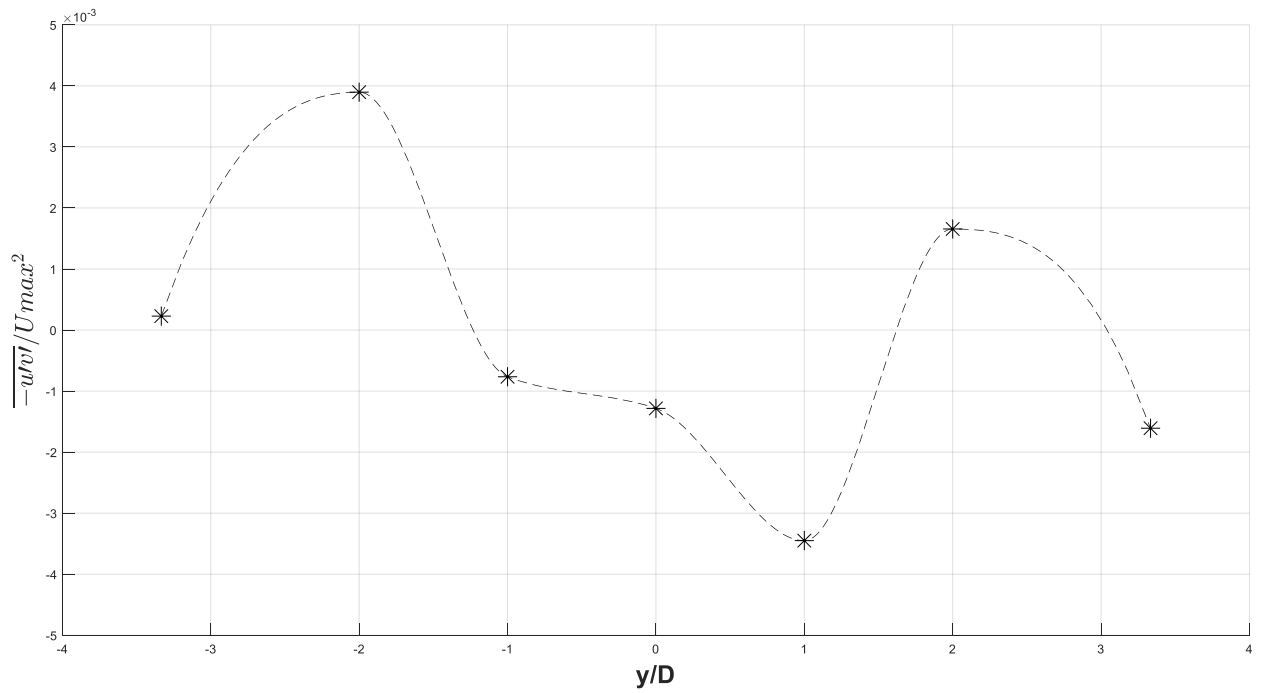
**Σχήμα 4.92** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3,33), 20 (x/D=6,66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6



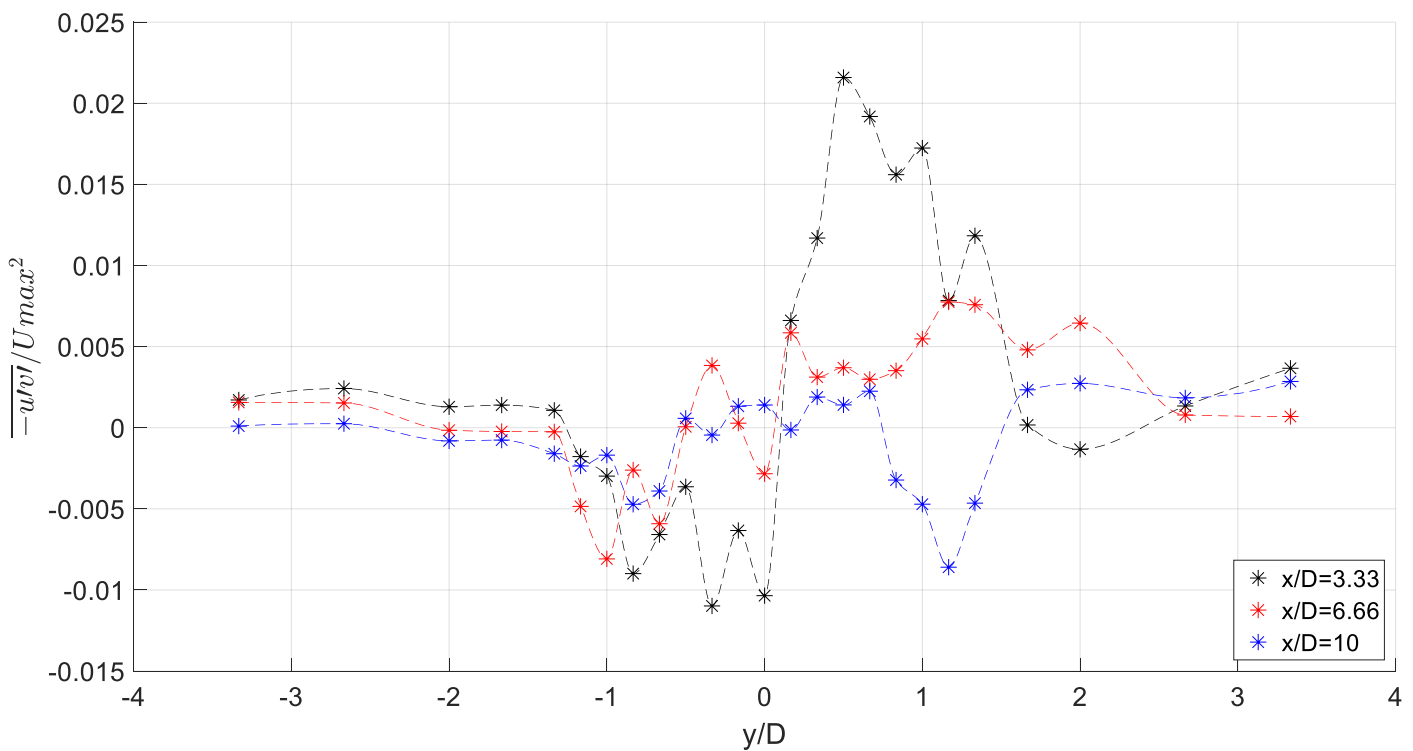
**Σχήμα 4.93** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



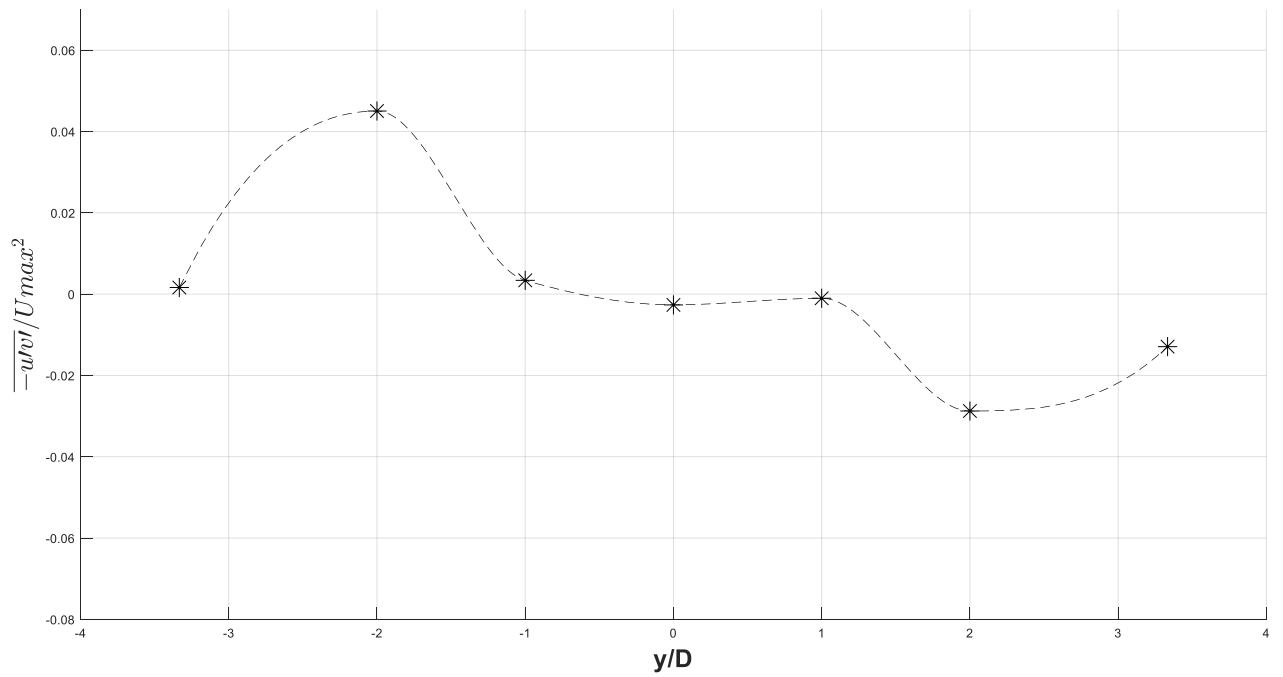
**Σχήμα 4.94** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



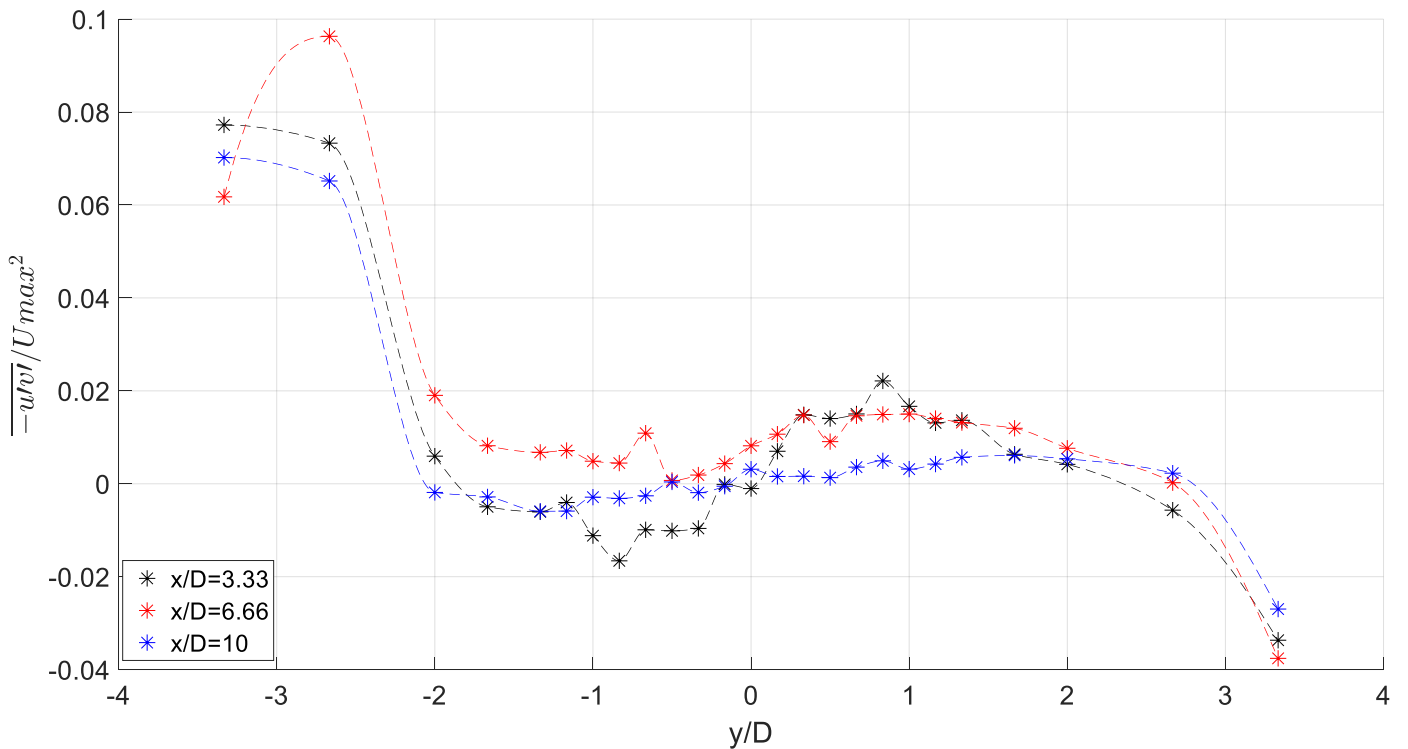
**Σχήμα 4.95** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



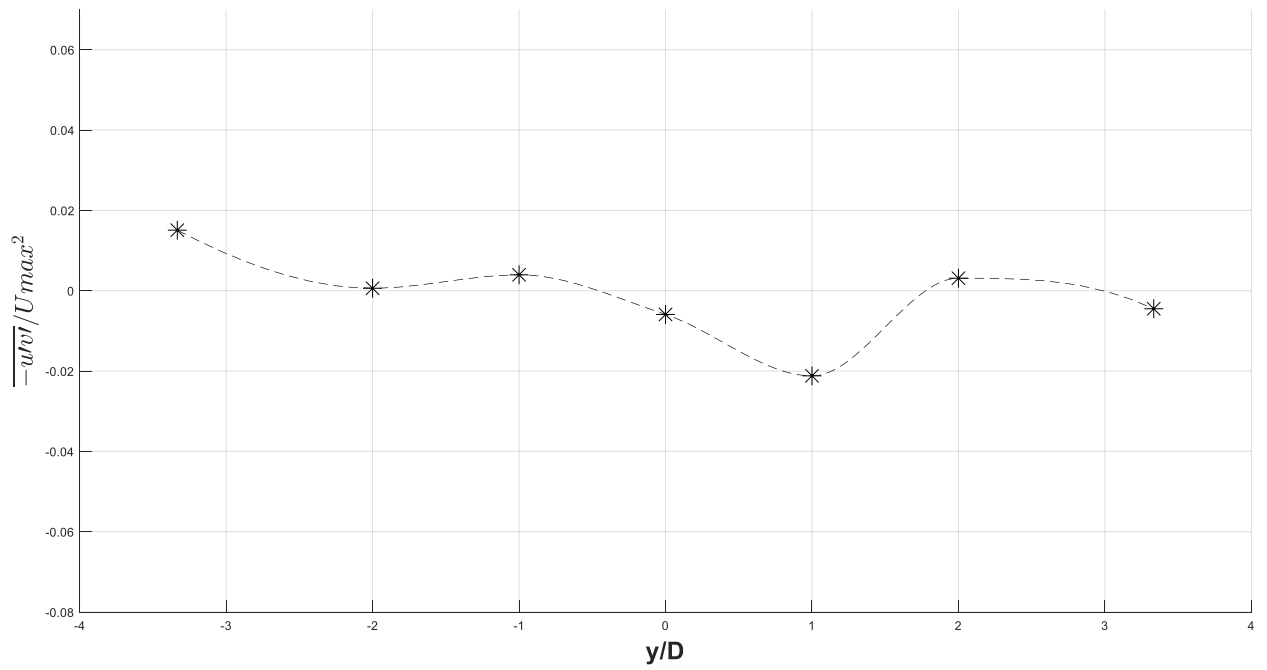
**Σχήμα 4.96** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm ( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



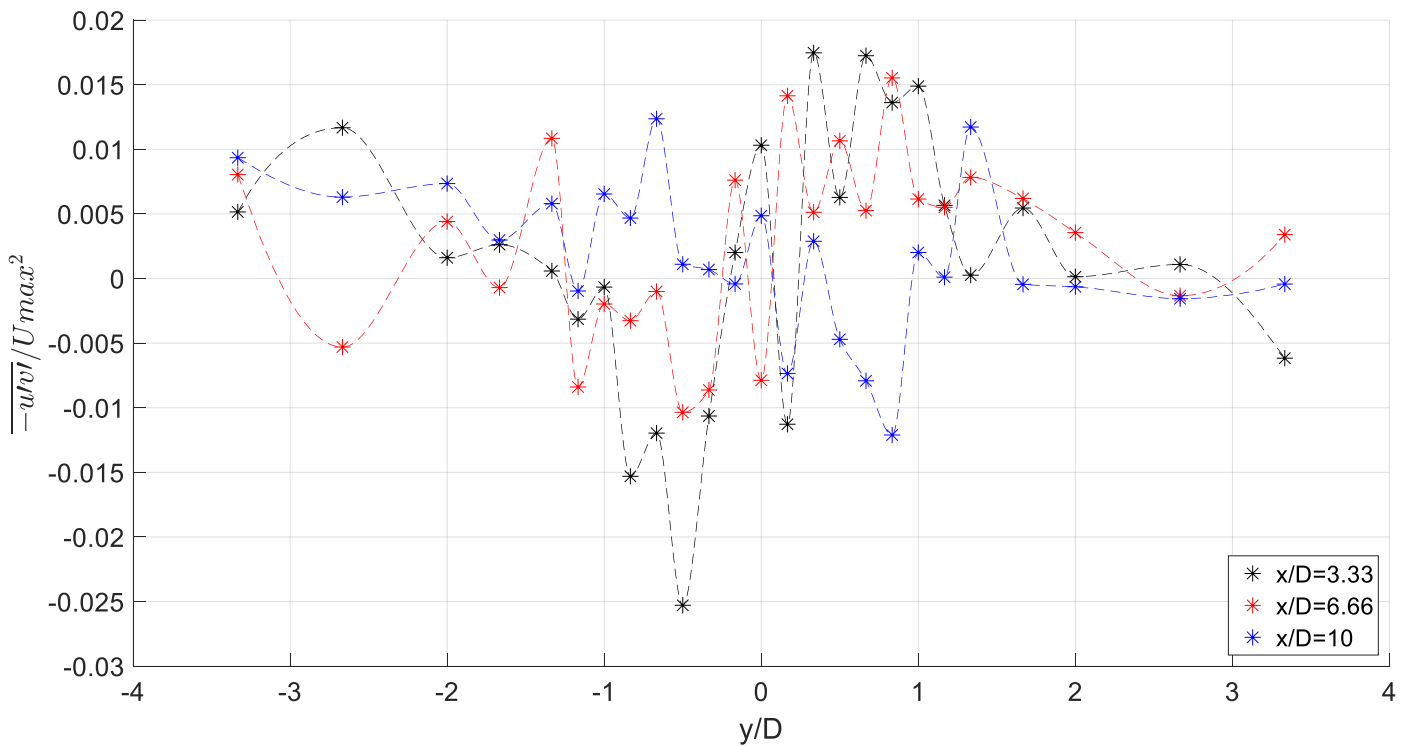
**Σχήμα 4.97** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.98** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

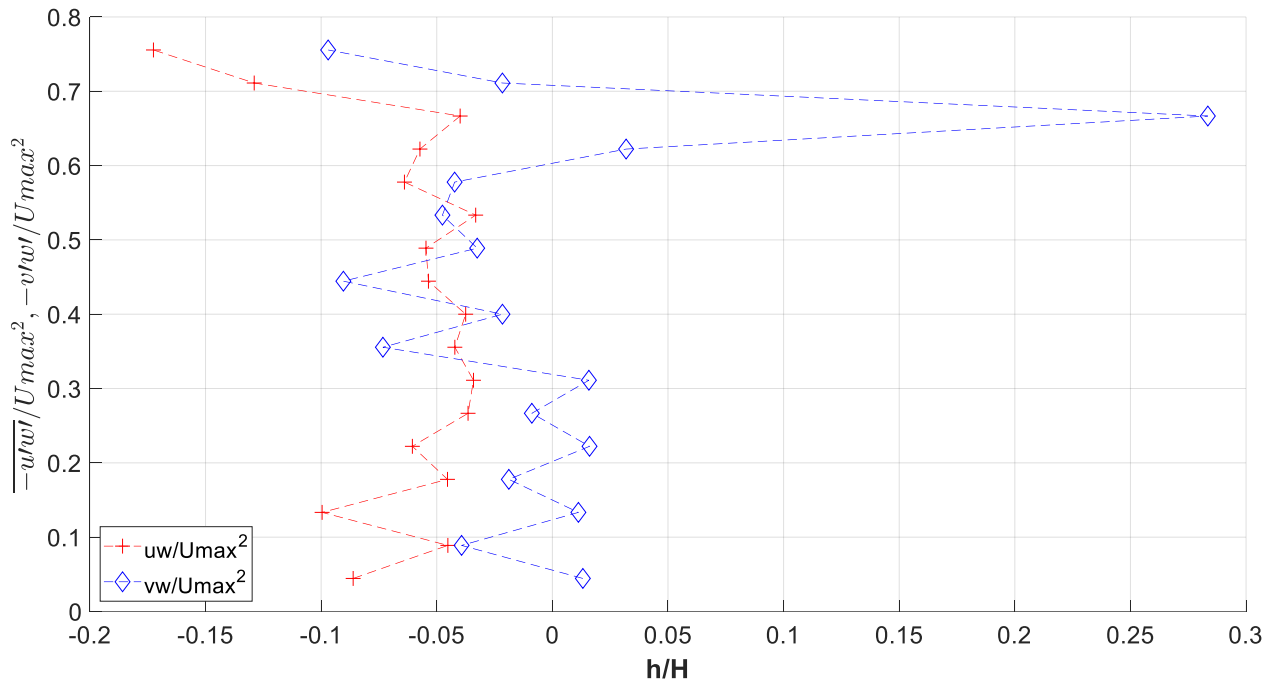


**Σχήμα 4.99** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

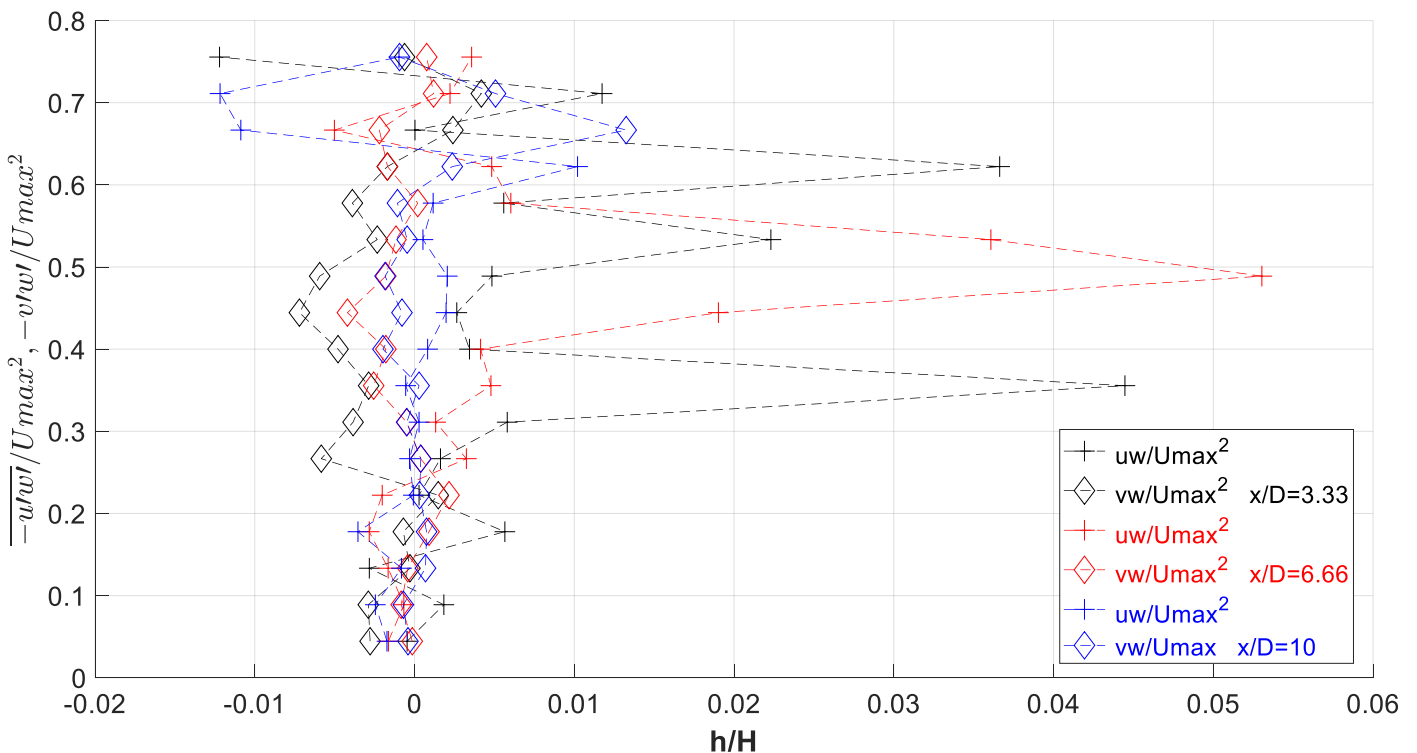


**Σχήμα 4.100** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 17.1cm

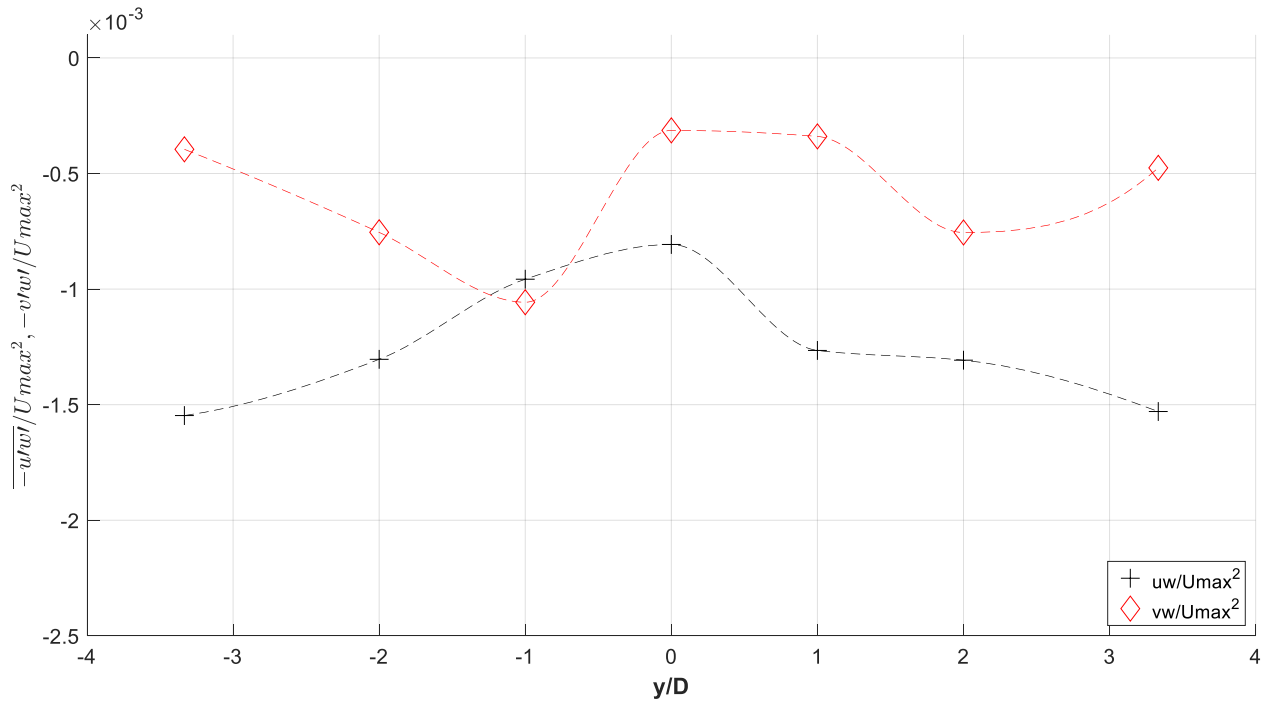




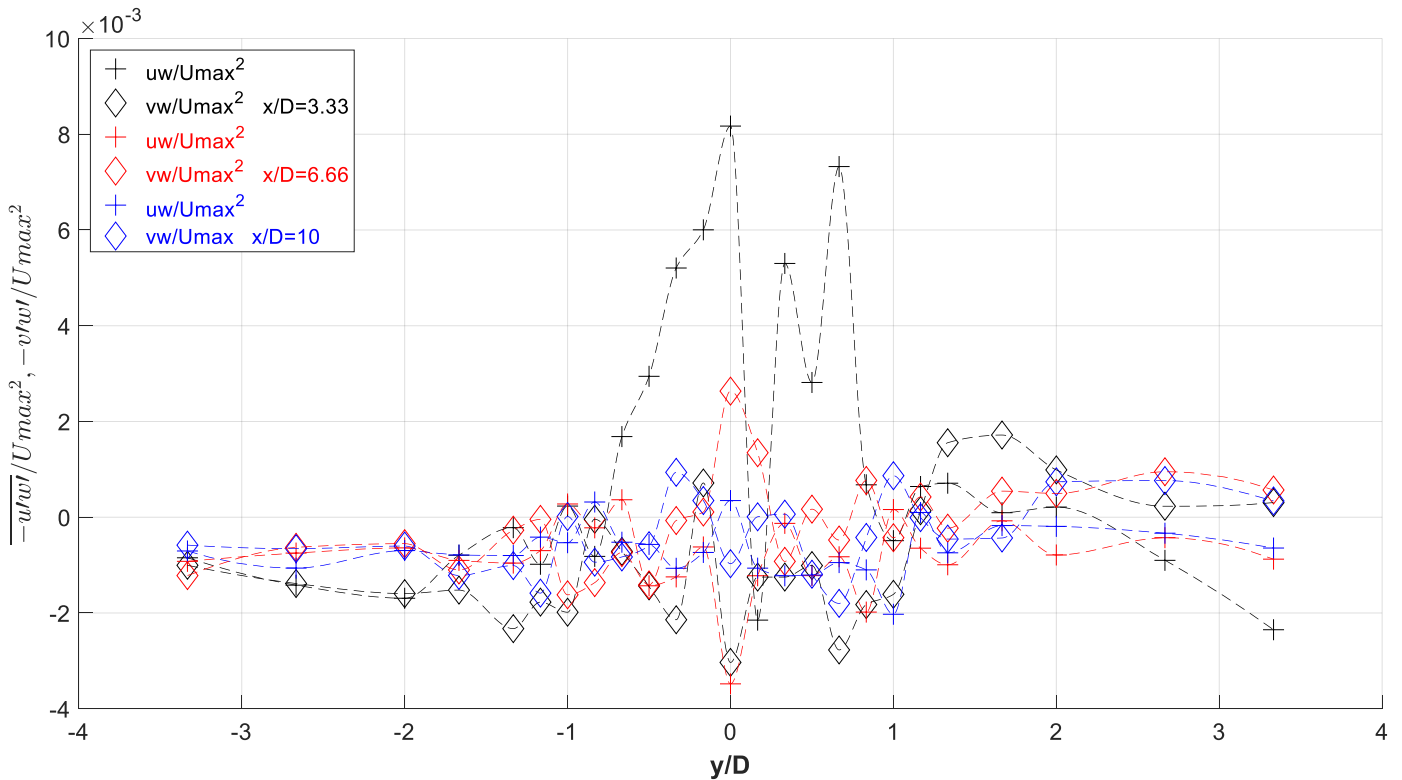
**Σχήμα 4.101** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 30cm ( $x/D=6$ )



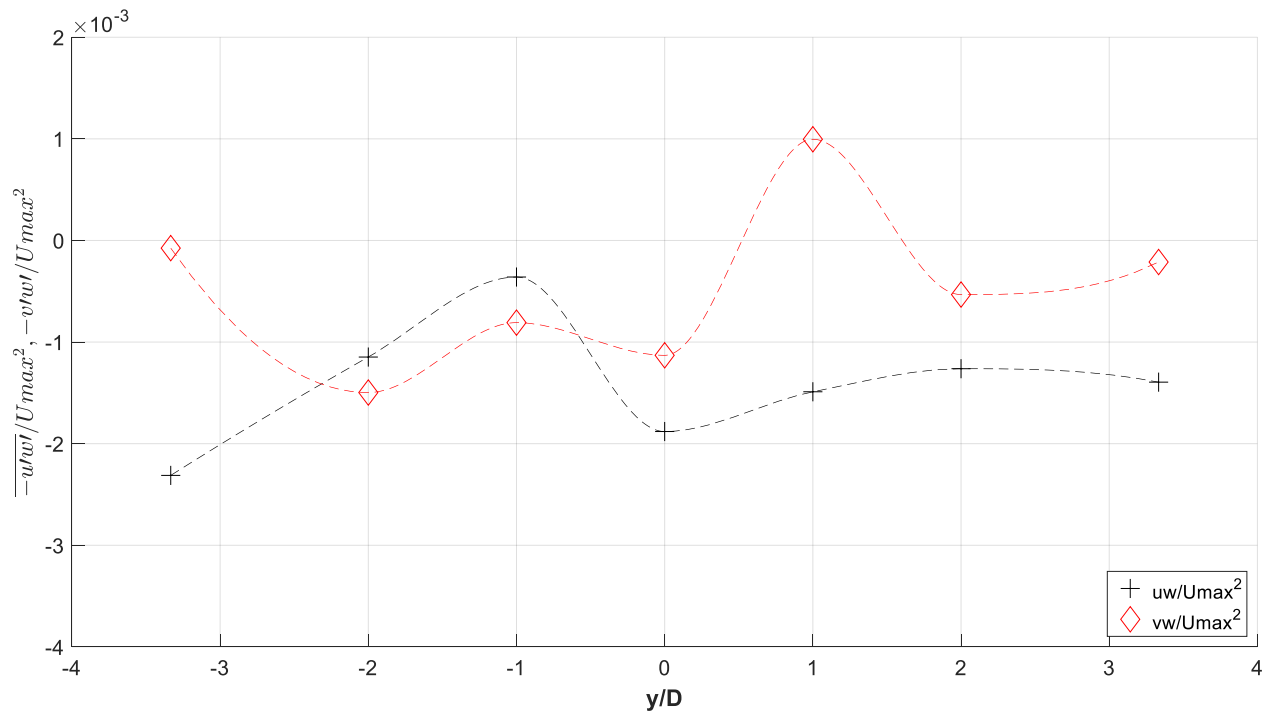
**Σχήμα 4.102** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6



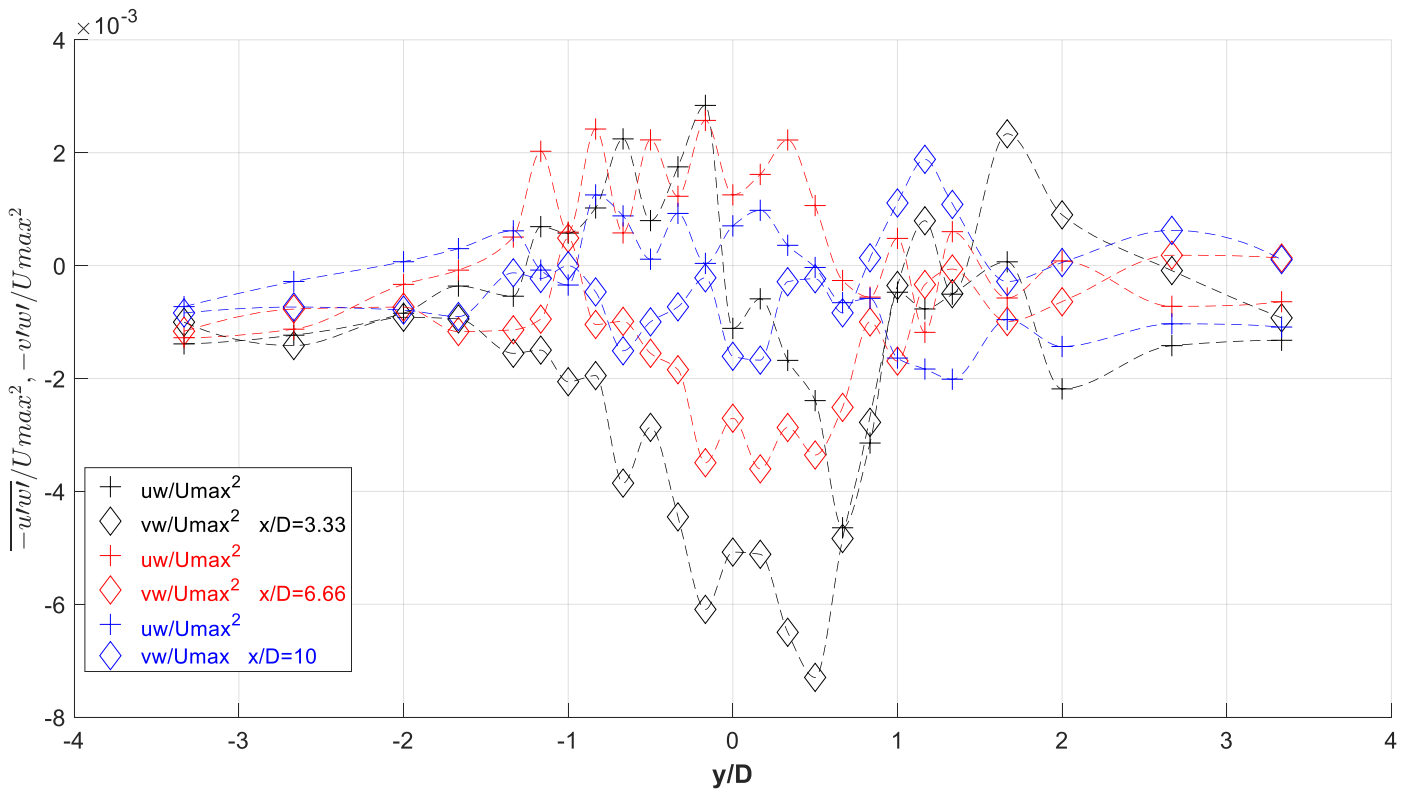
**Σχήμα 4.103** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάτη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



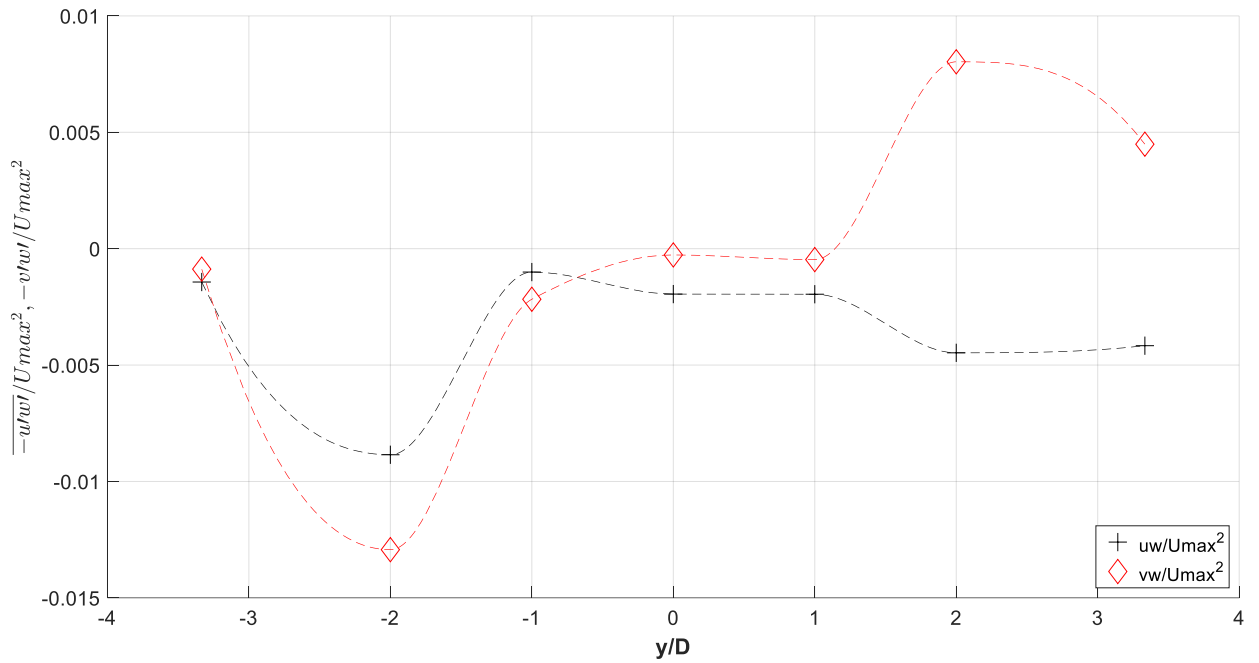
**Σχήμα 4.104** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 4.5cm



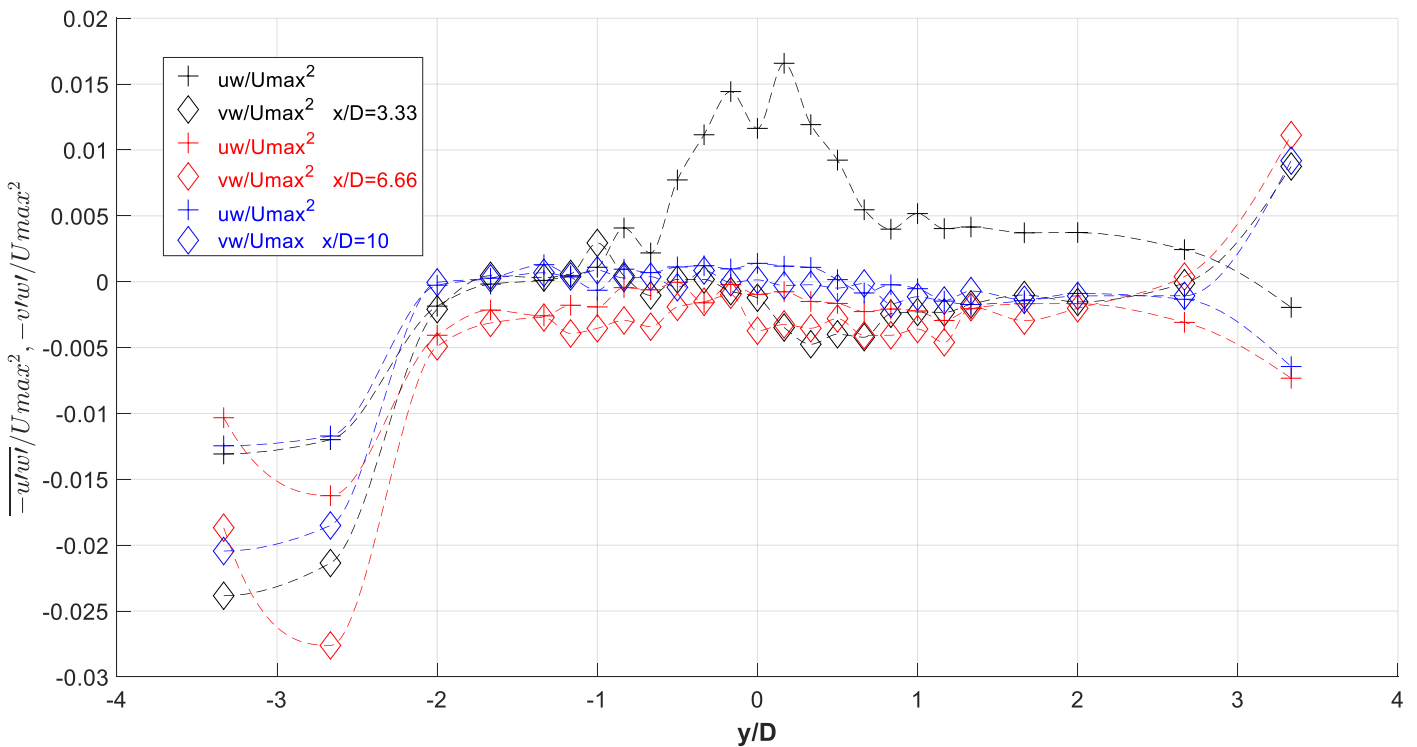
**Σχήμα 4.105** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



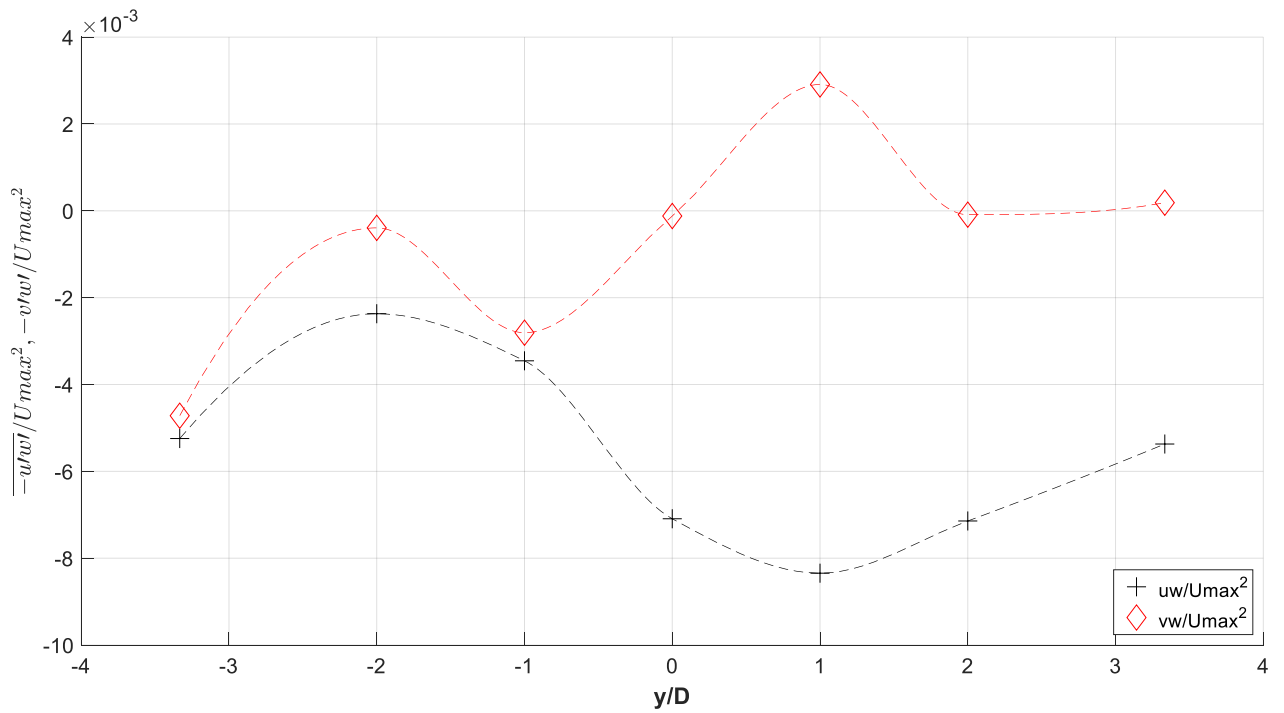
**Σχήμα 4.106** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 9cm



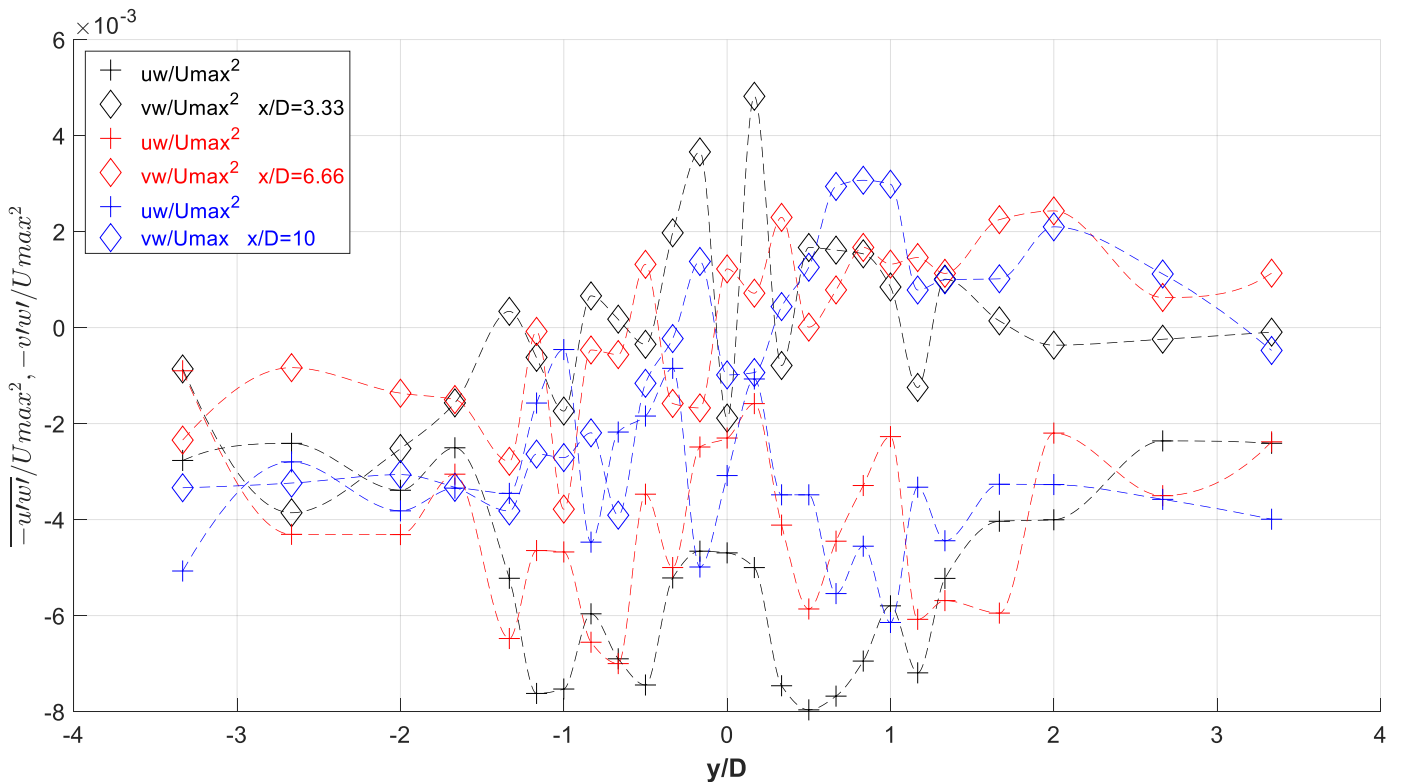
**Σχήμα 4.107** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.108** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε ύψος 13.5cm

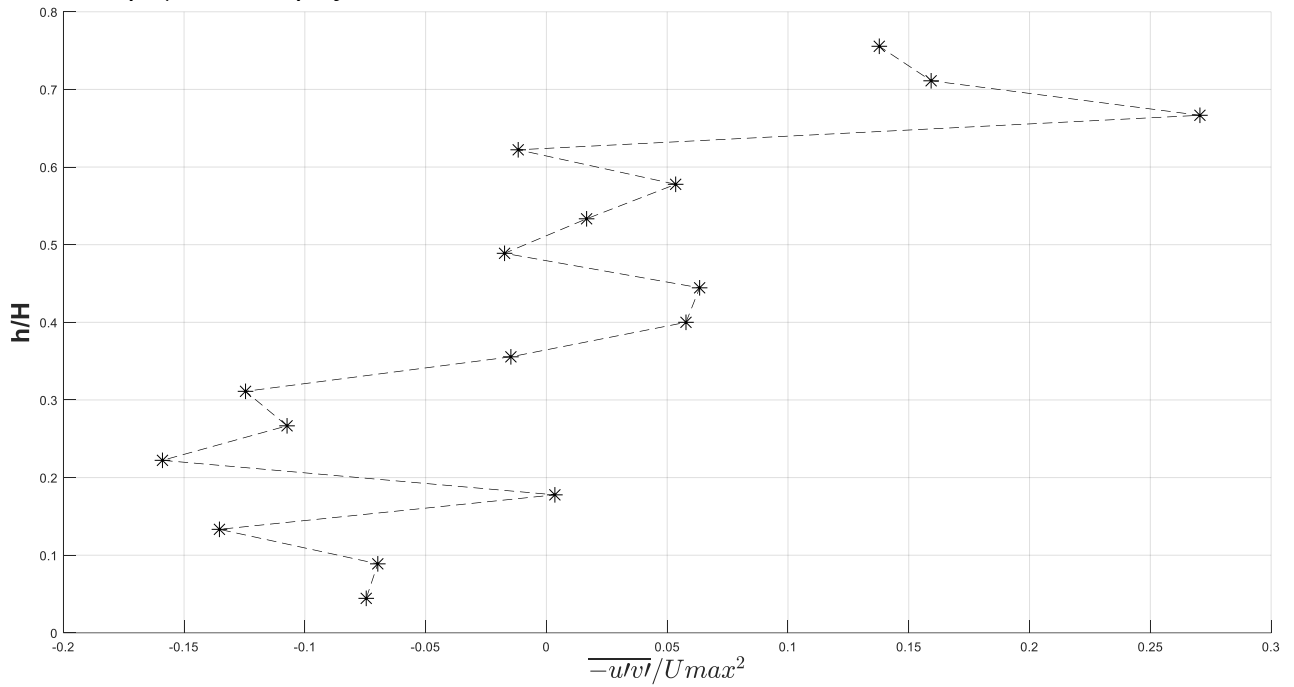


**Σχήμα 4.109** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ορθογωνικής διατομής 3Χ6 σε ύψος 17.1cm

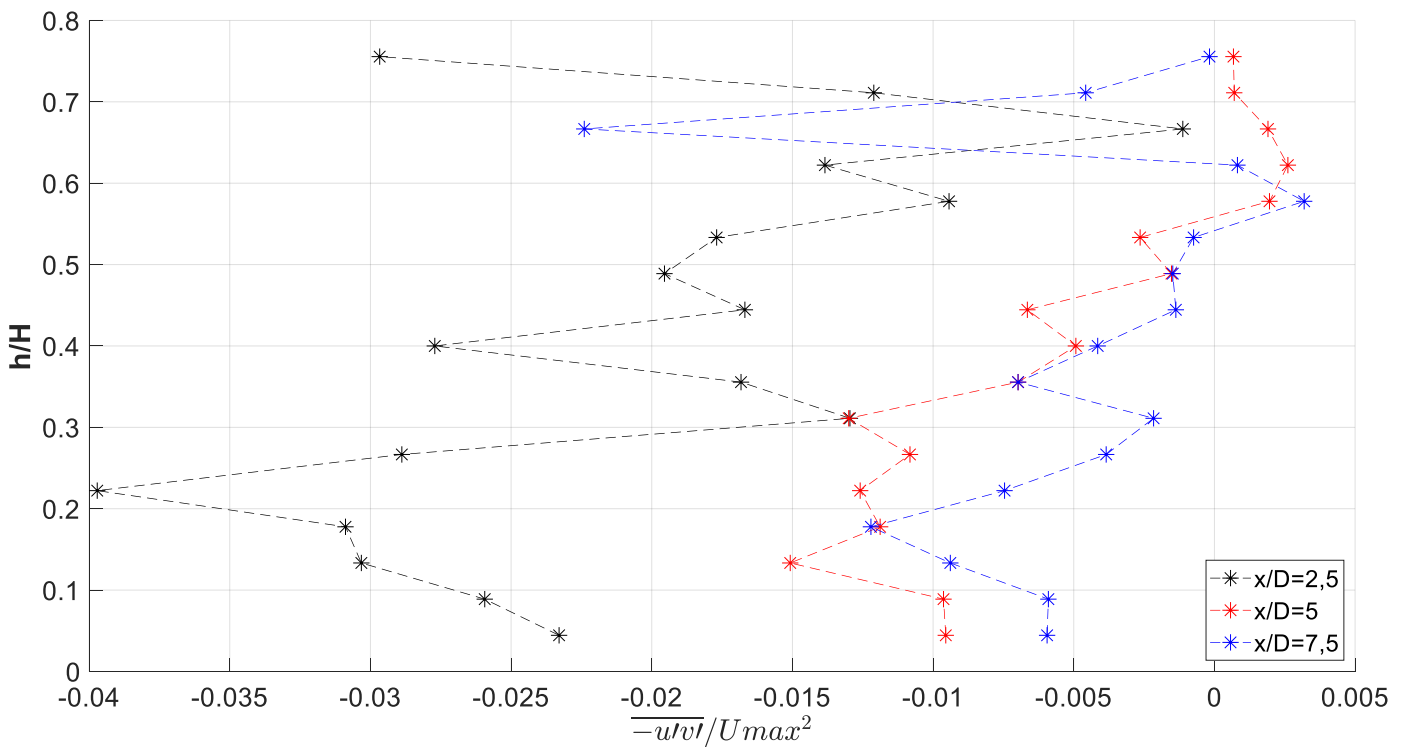


**Σχήμα 4.110** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) κατάντη ορθογωνικής διατομής 3Χ6 σε ύψος 17.1cm

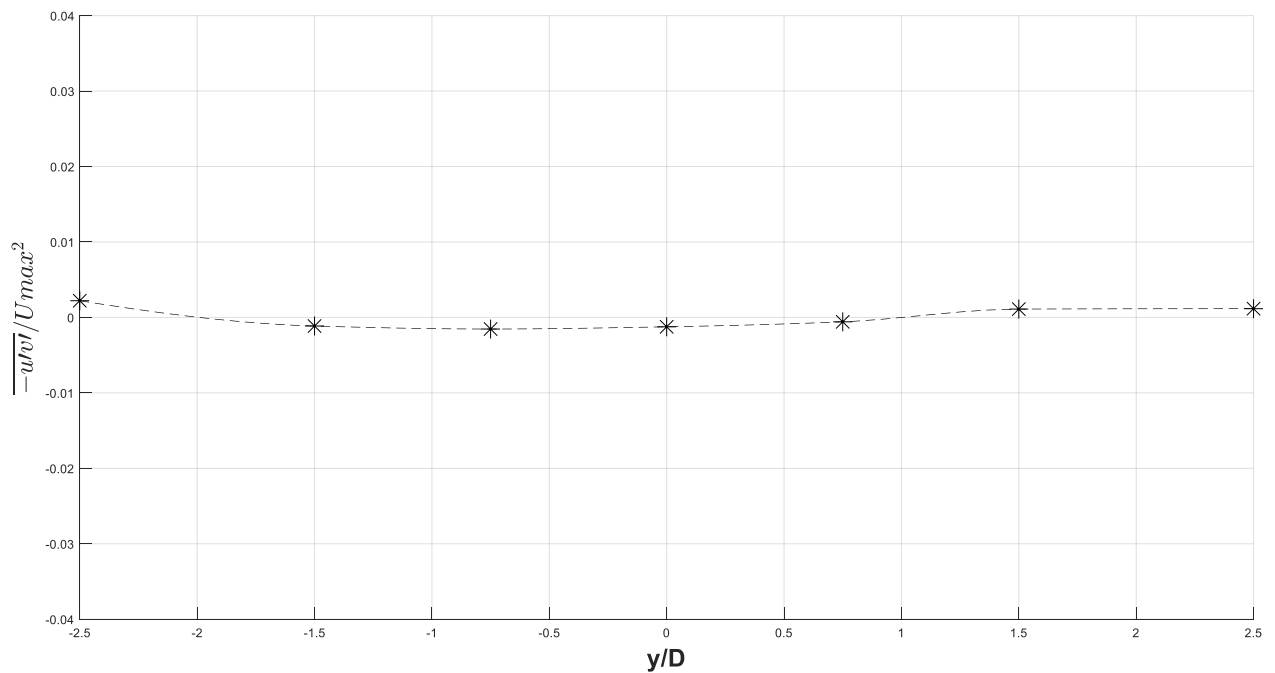
4.2.4 Τετράγωνο πλευράς D=4cm



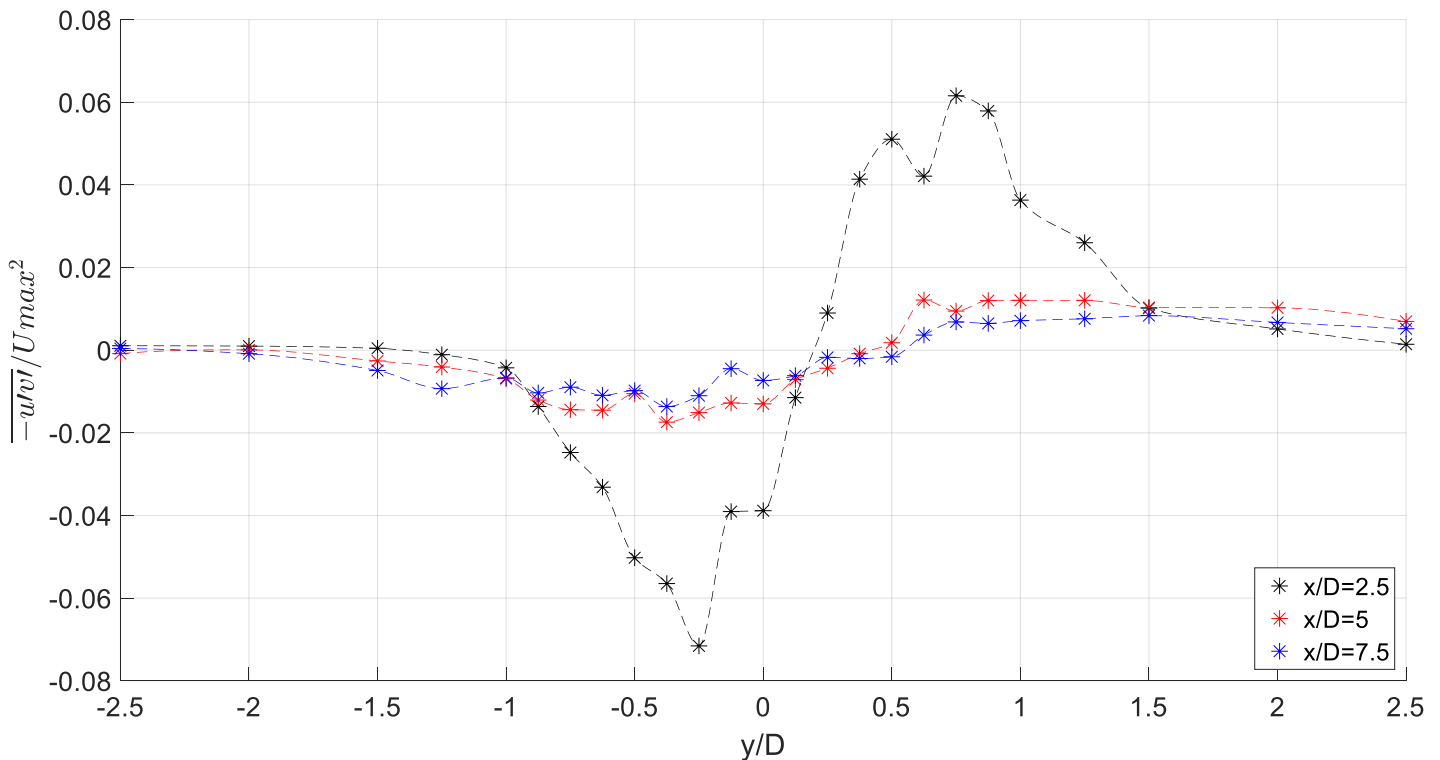
Σχήμα 4.111 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 30cm ( $x/D=-10$ )



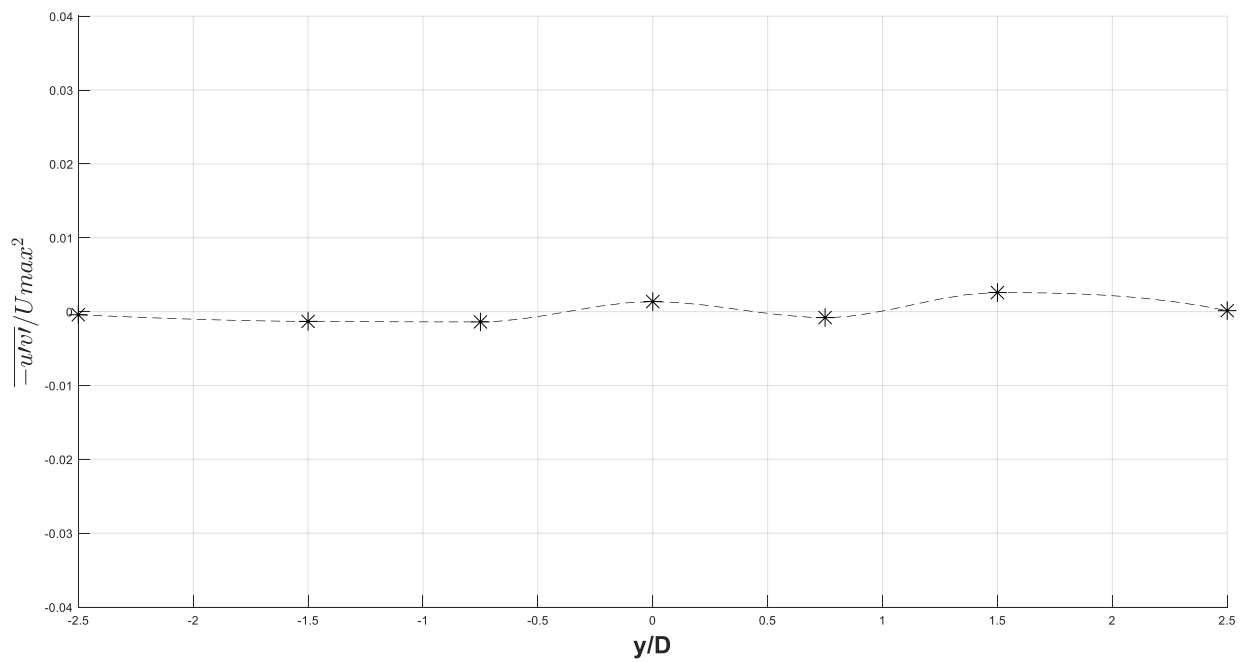
Σχήμα 4.112 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4



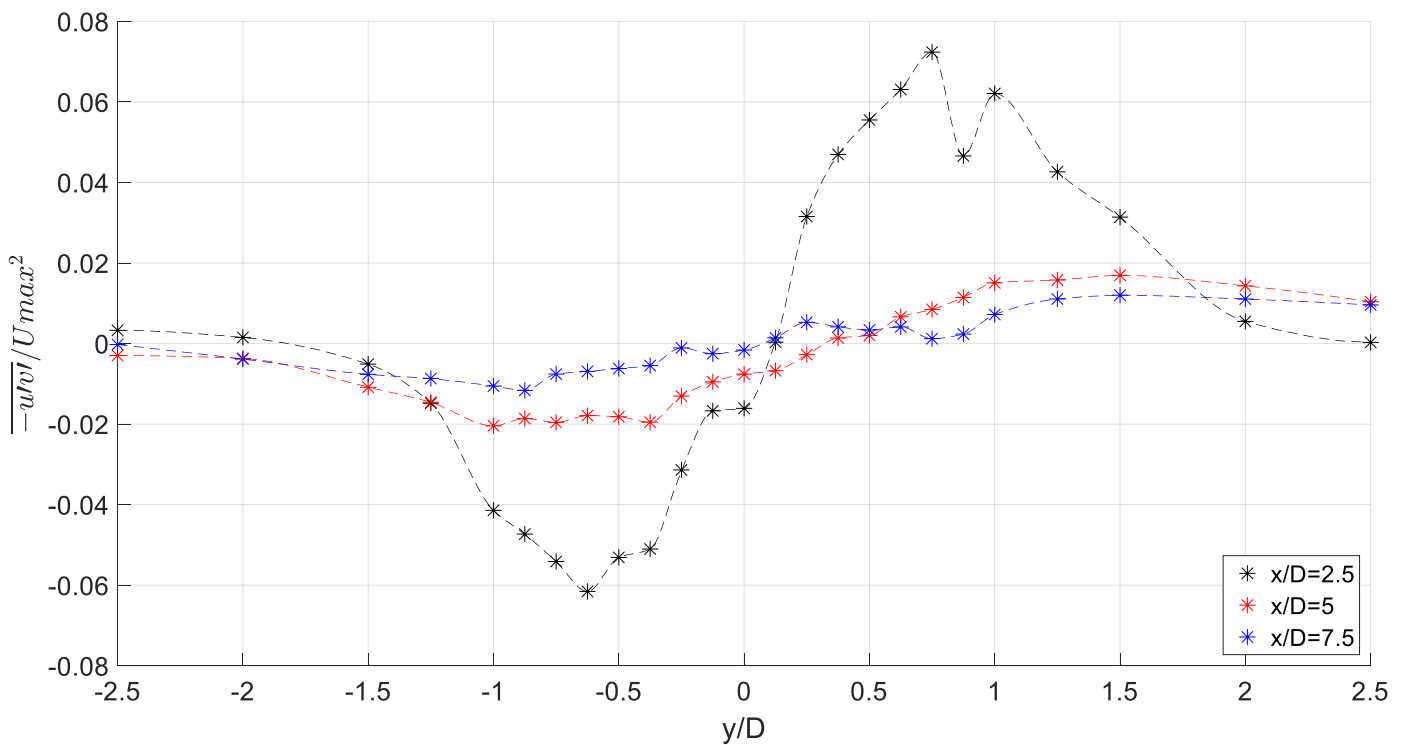
**Σχήμα 4.113** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm



**Σχήμα 4.114** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) καάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm

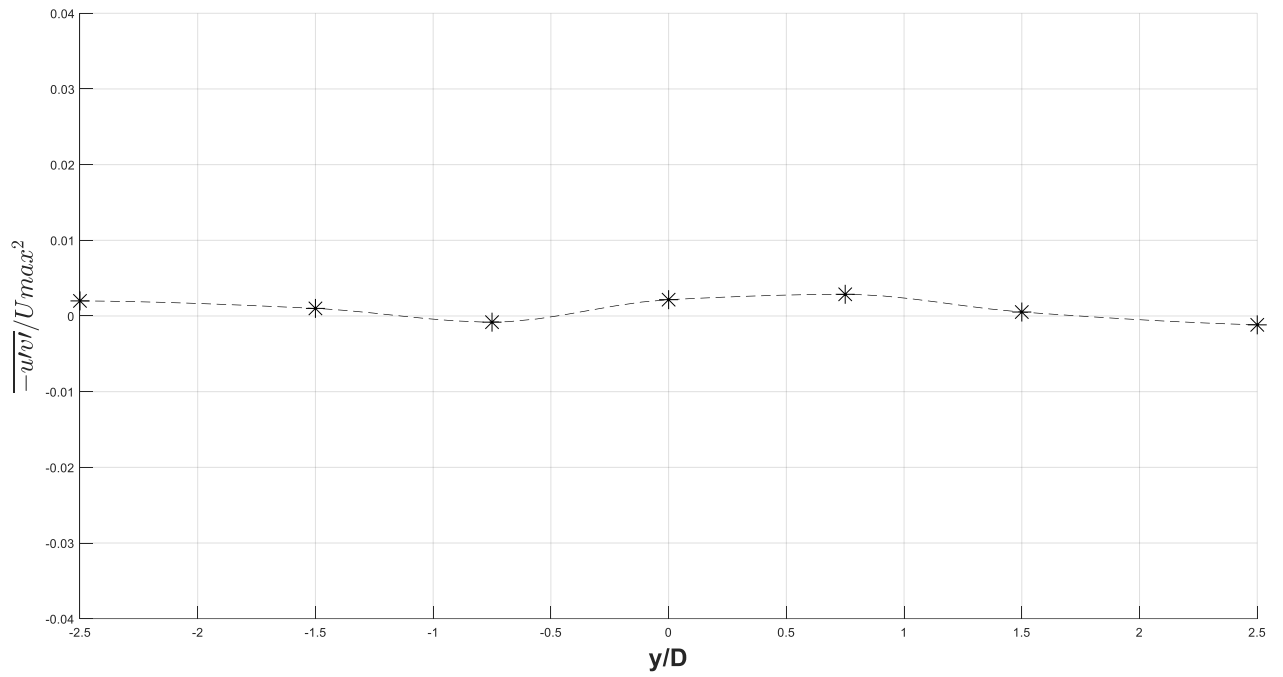


**Σχήμα 4.115** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4Χ4 σε ύψος 9cm

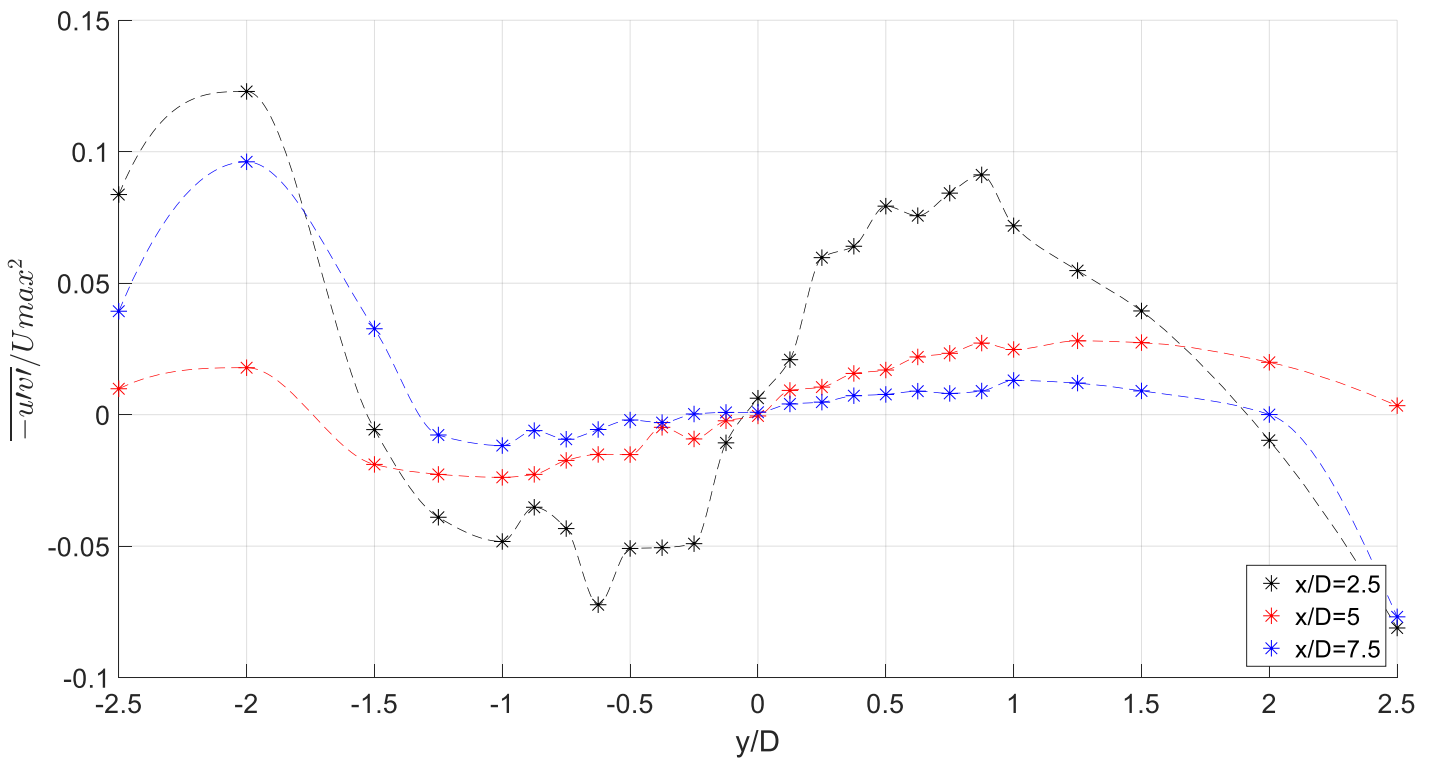


**Σχήμα 4.116** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) καάντη τετραγωνικής διατομής 4Χ4 σε ύψος 9cm

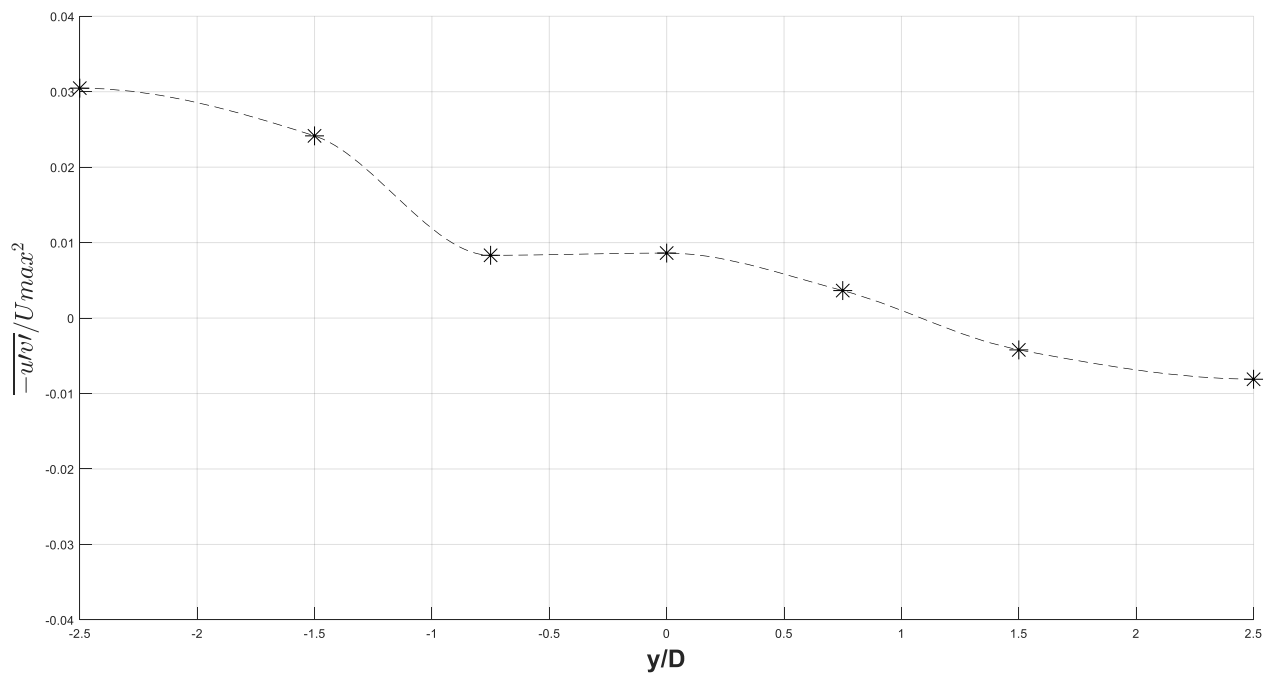




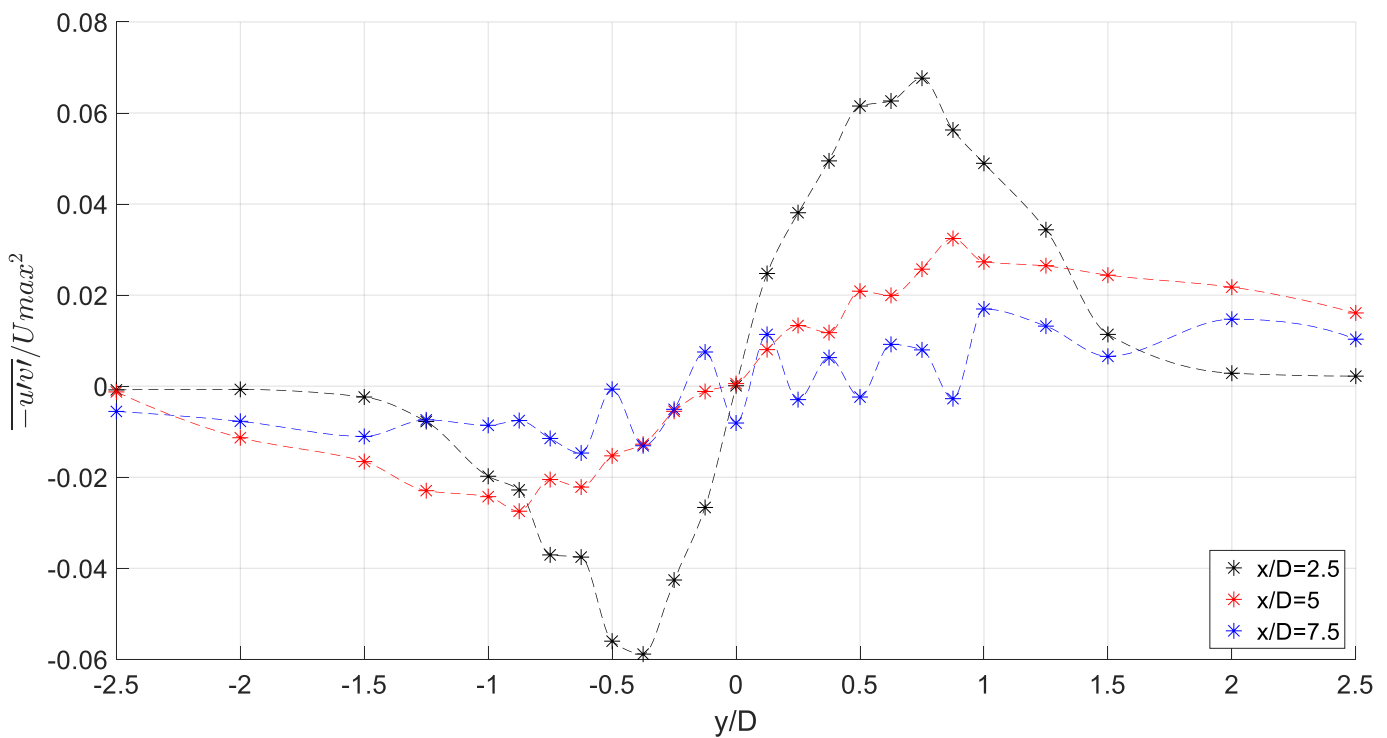
**Σχήμα 4.117** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm



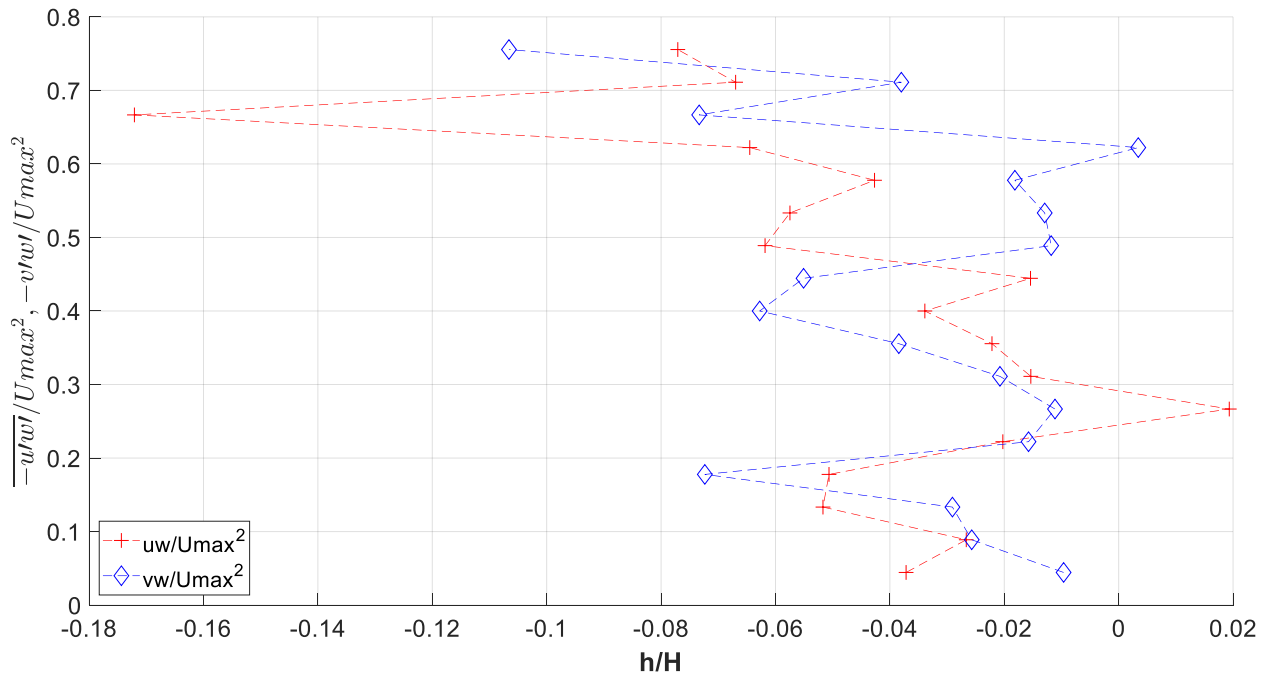
**Σχήμα 4.118** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm



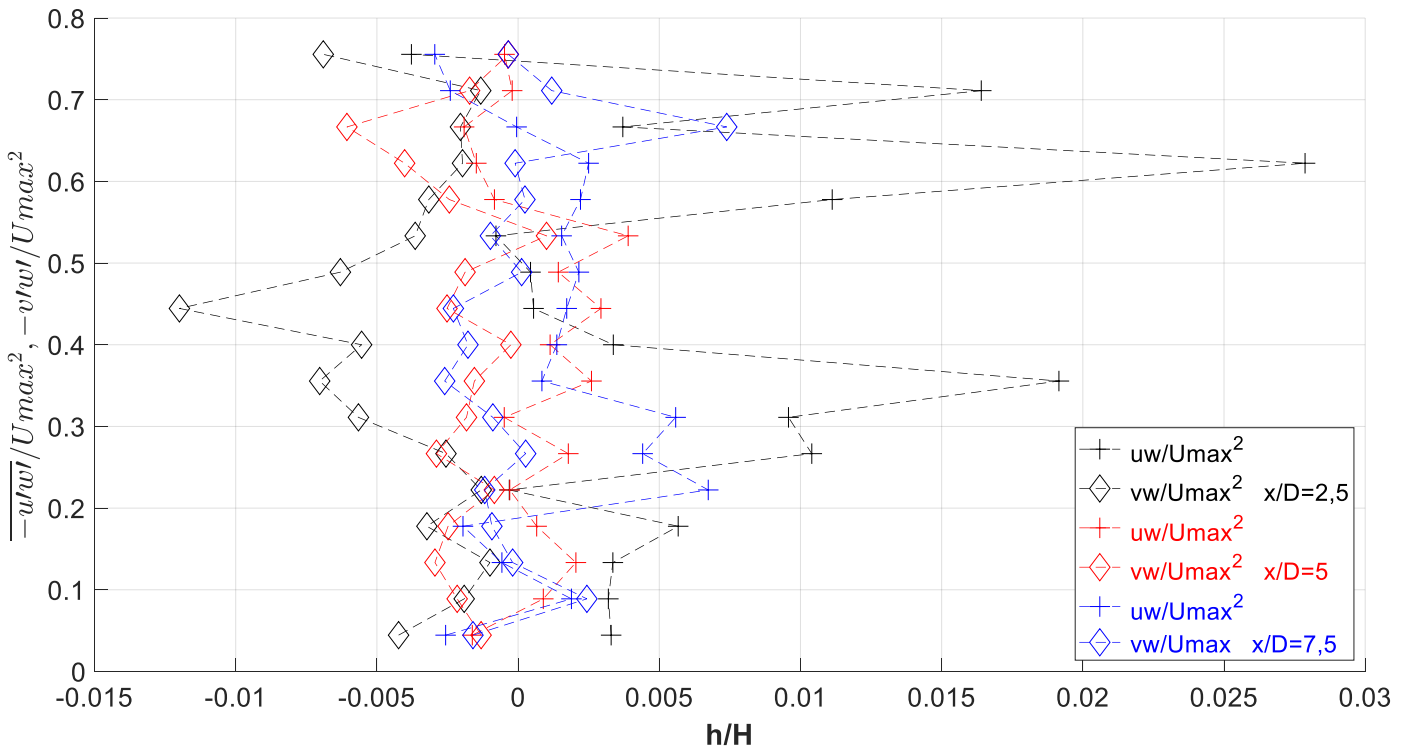
**Σχήμα 4.119** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm



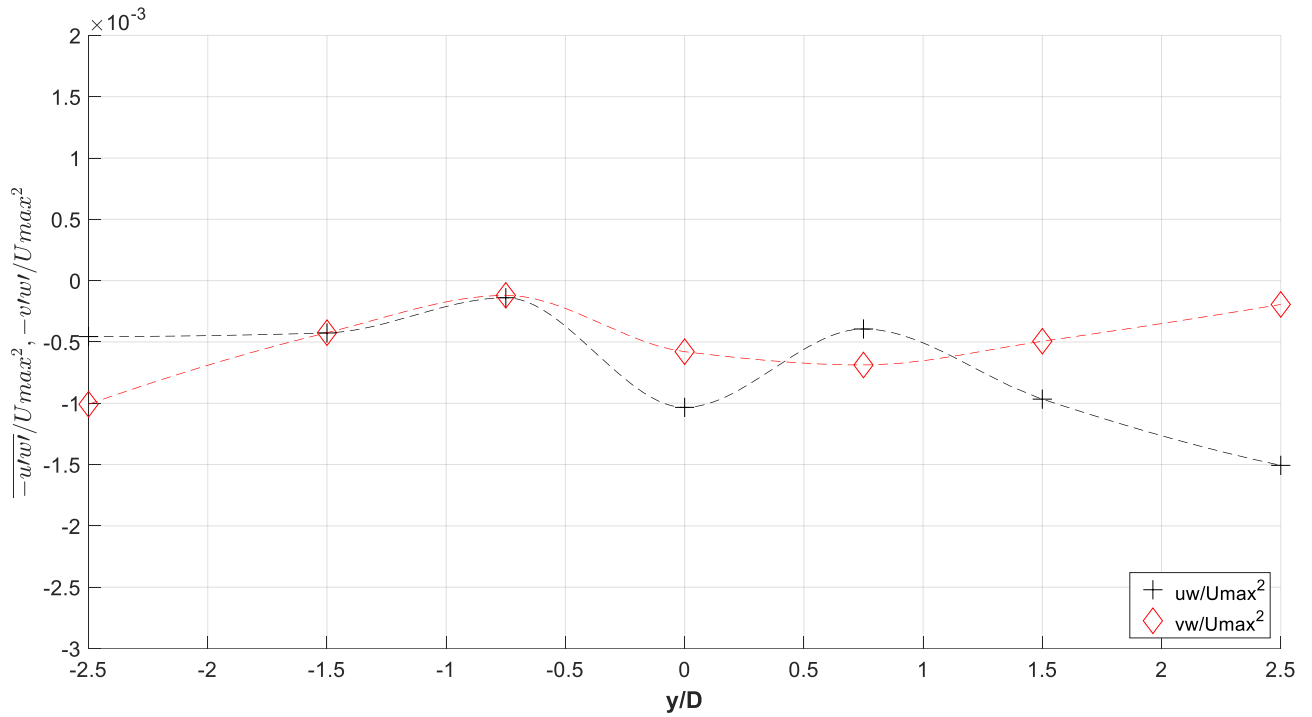
**Σχήμα 4.120** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm



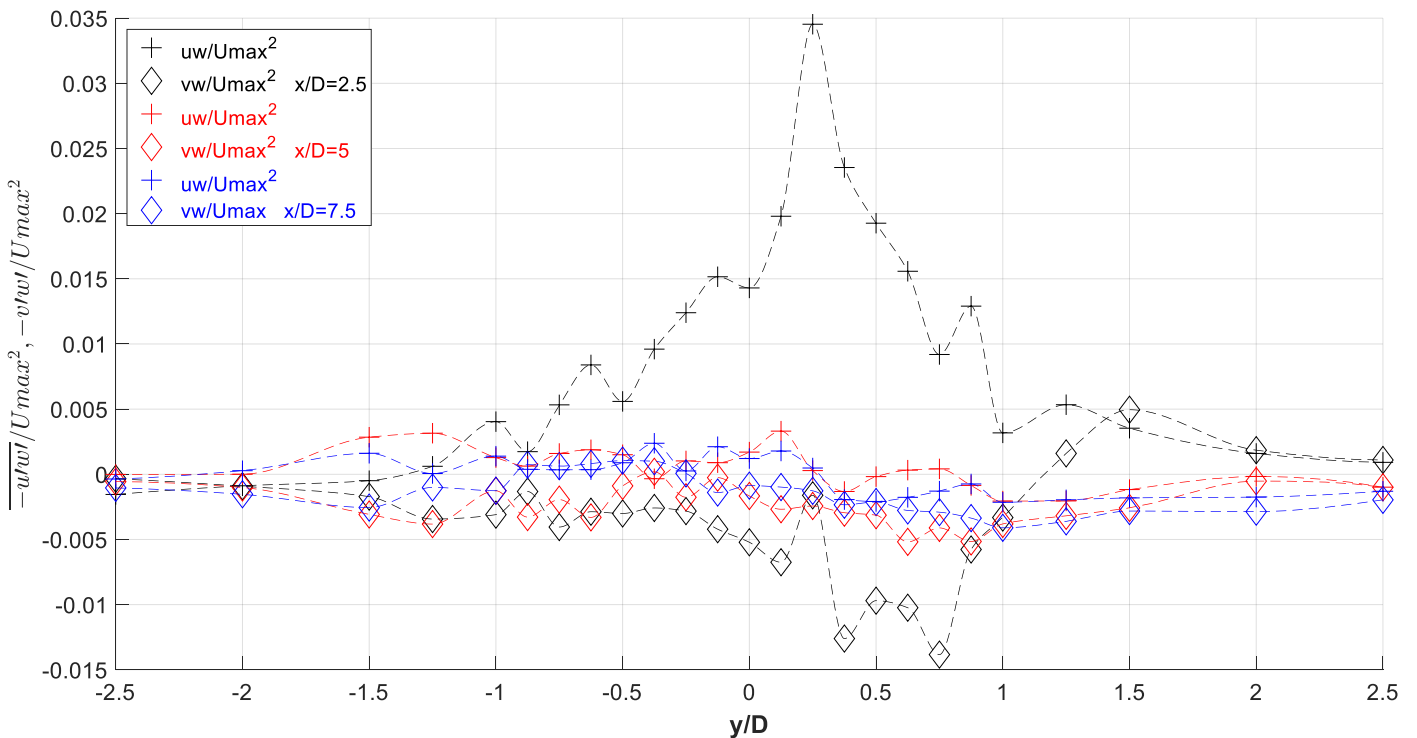
**Σχήμα 4.121** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4



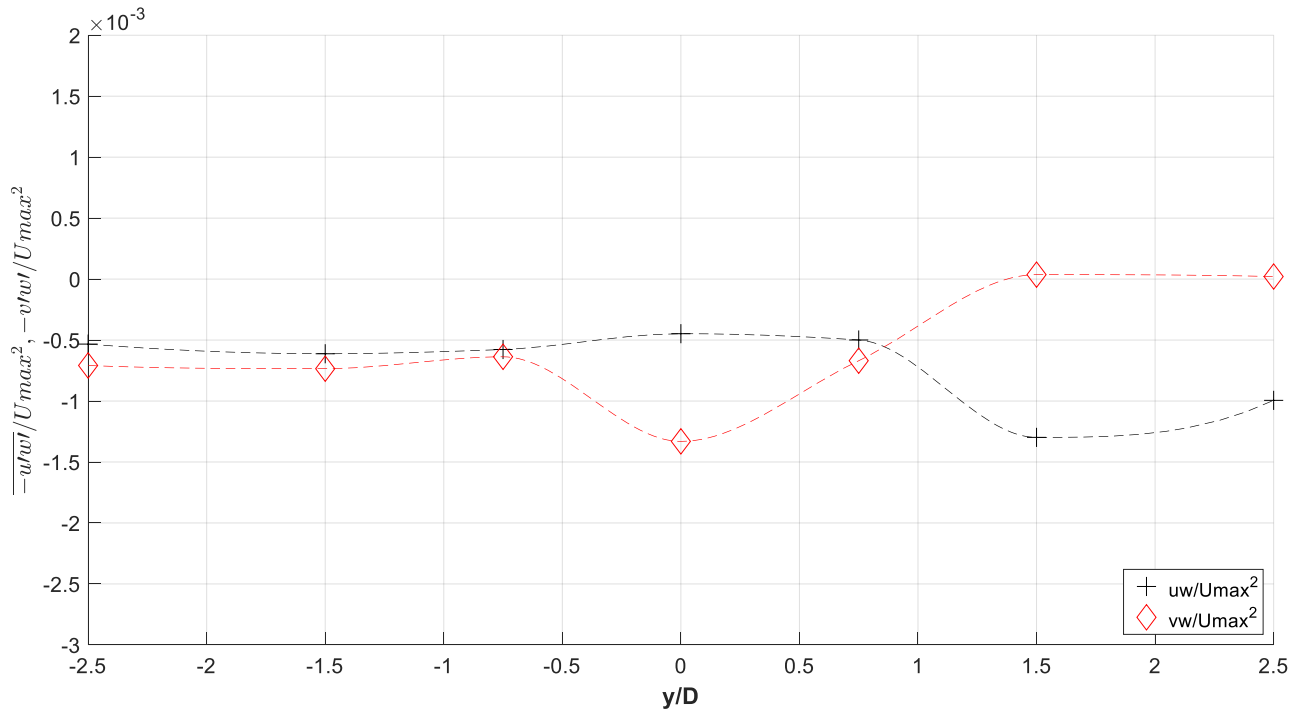
**Σχήμα 4.122** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ ) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4



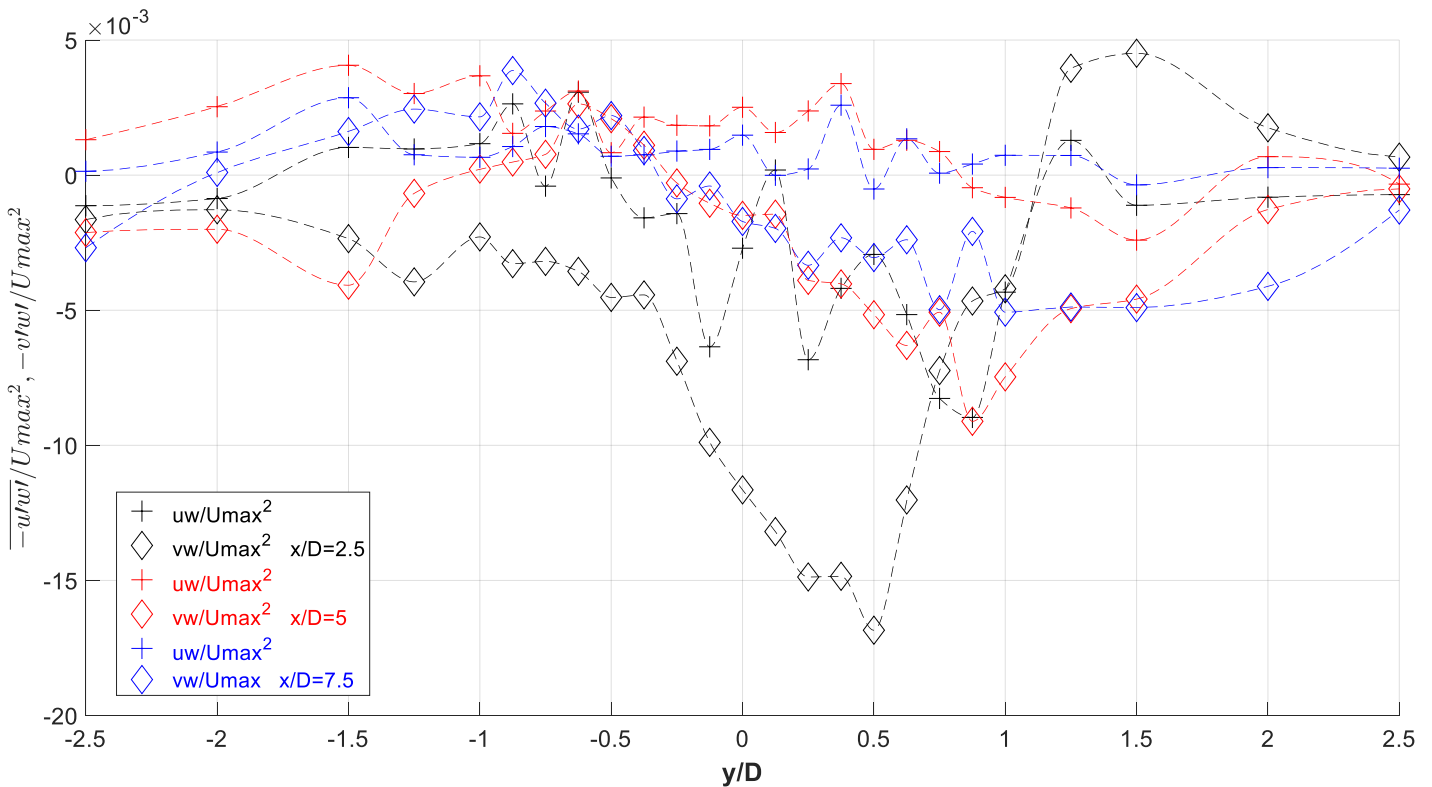
**Σχήμα 4.123** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 4,5cm



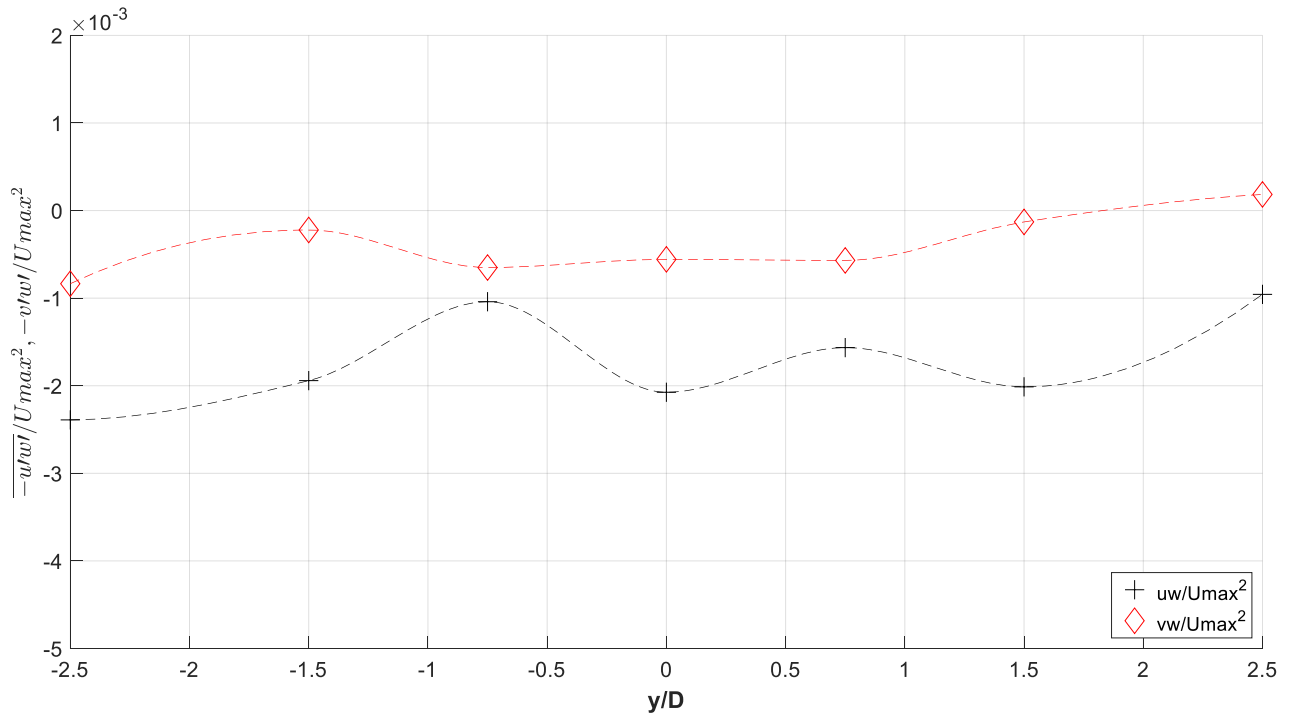
**Σχήμα 4.124** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X10 σε ύψος 4.5cm



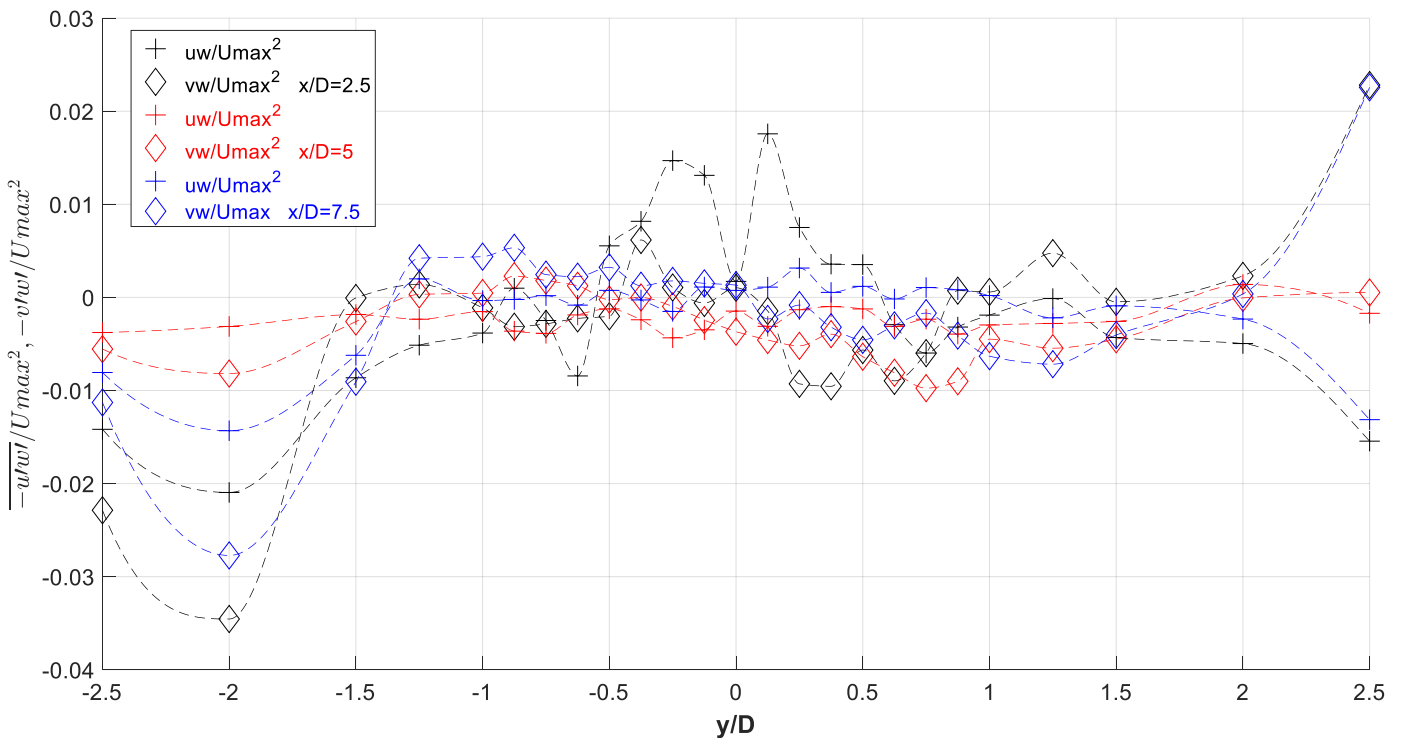
**Σχήμα 4.125** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm



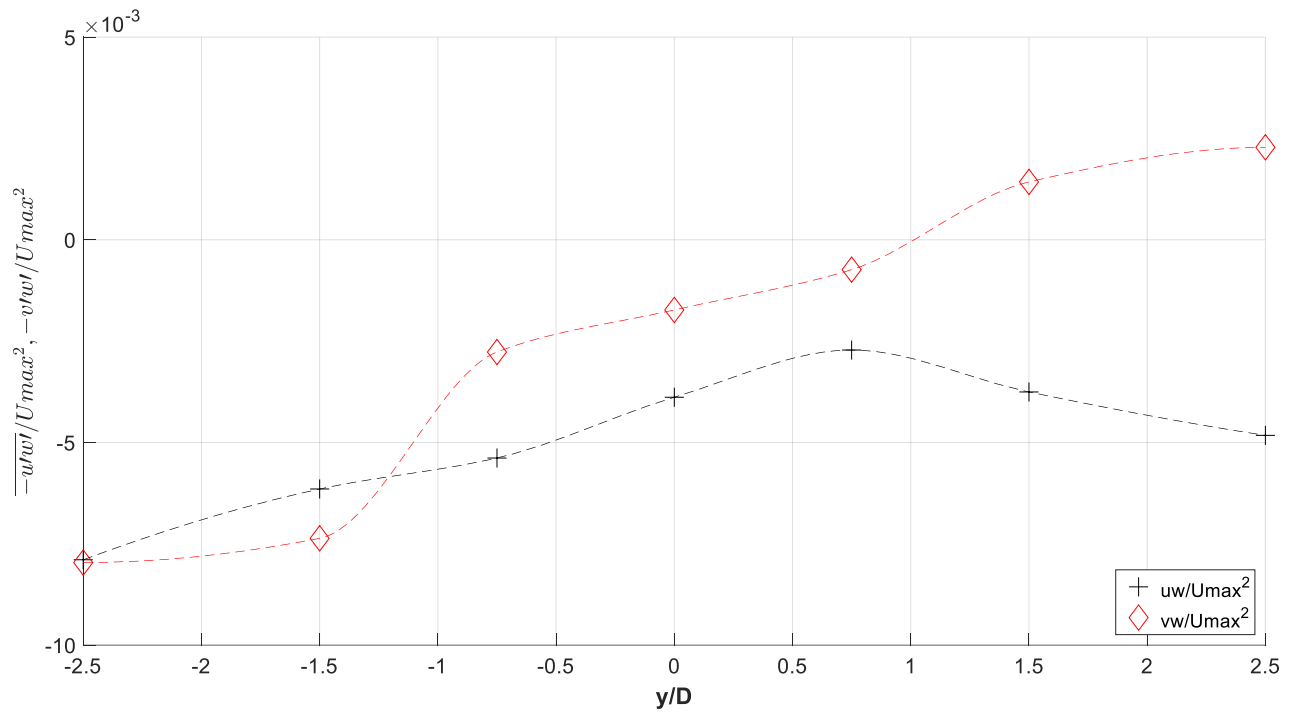
**Σχήμα 4.126** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 9cm



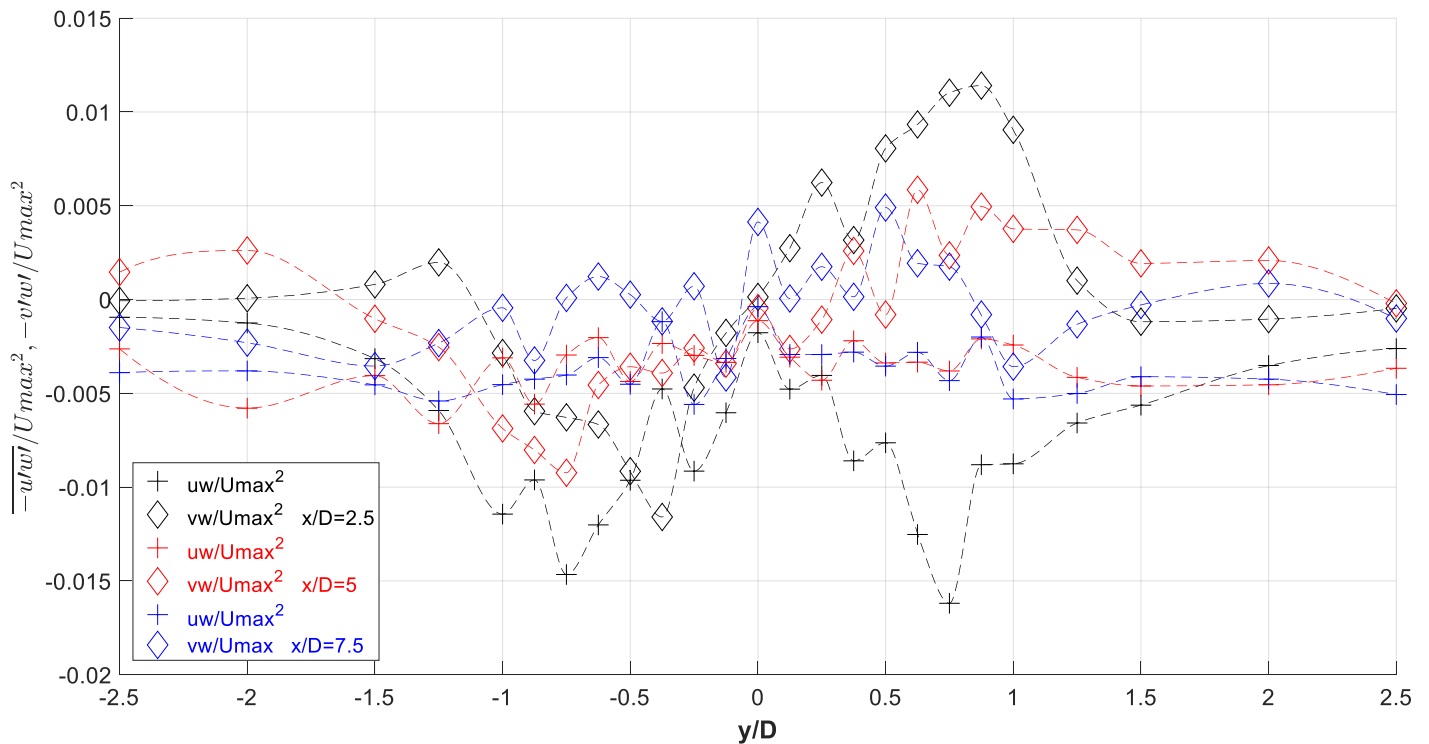
**Σχήμα 4.127** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.128** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ ) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 13.5cm

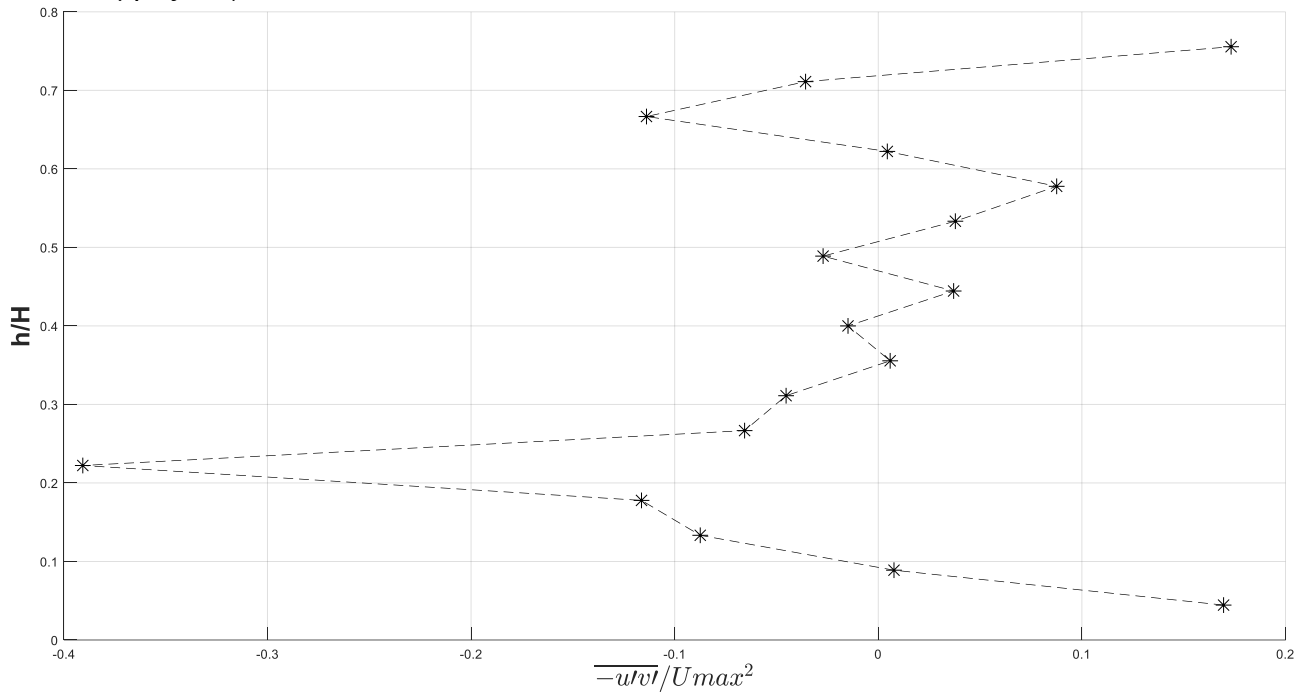


**Σχήμα 4.129** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

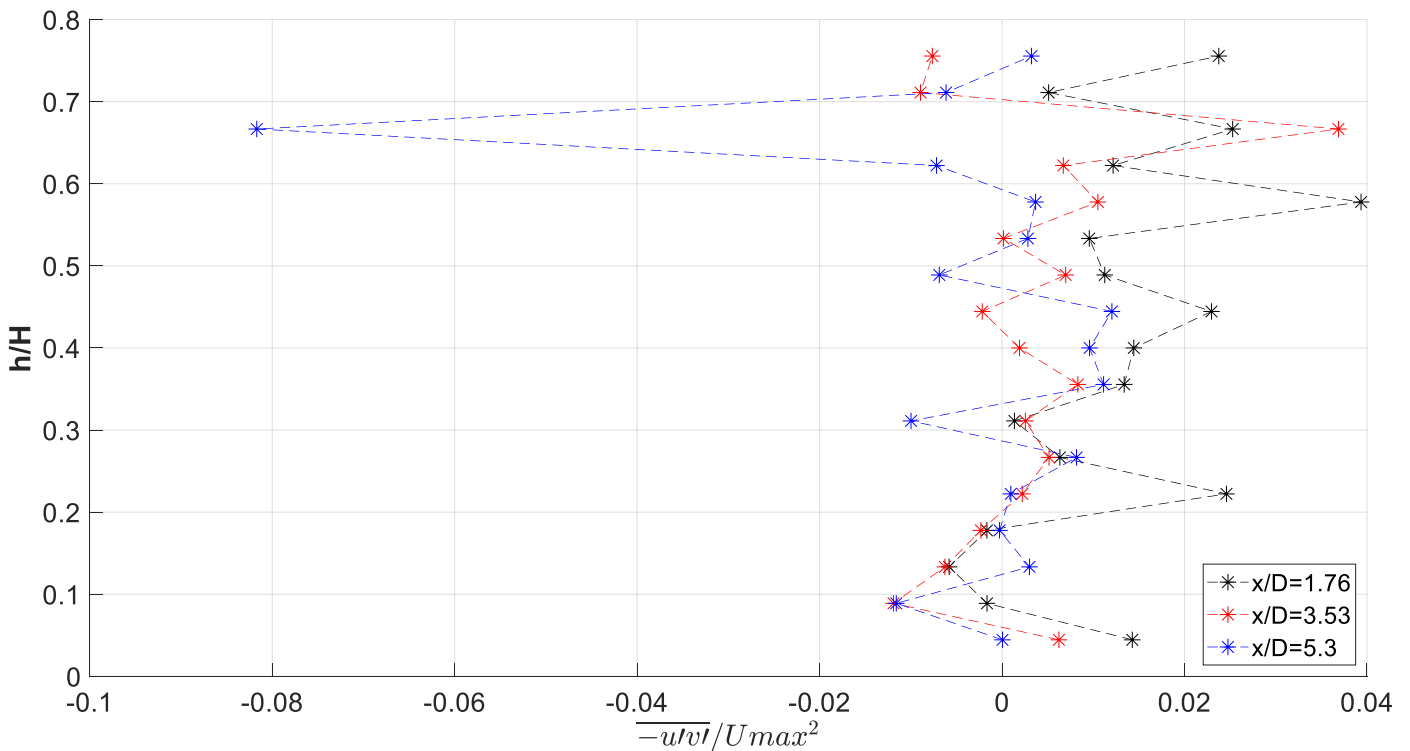


**Σχήμα 4.130** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση 10 (x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε ύψος 17.1cm

4.2.5 Ρόμβος διαγωνίου D=5.66cm

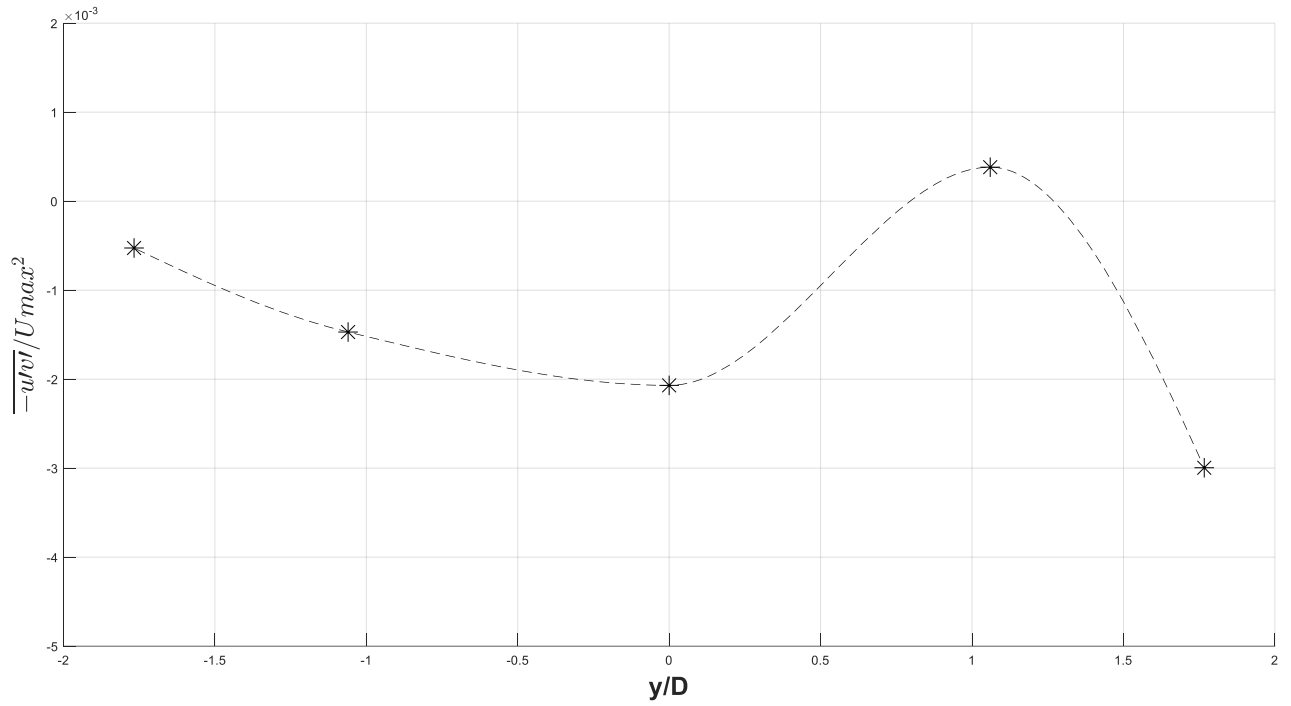


**Σχήμα 4.131** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου 5,66

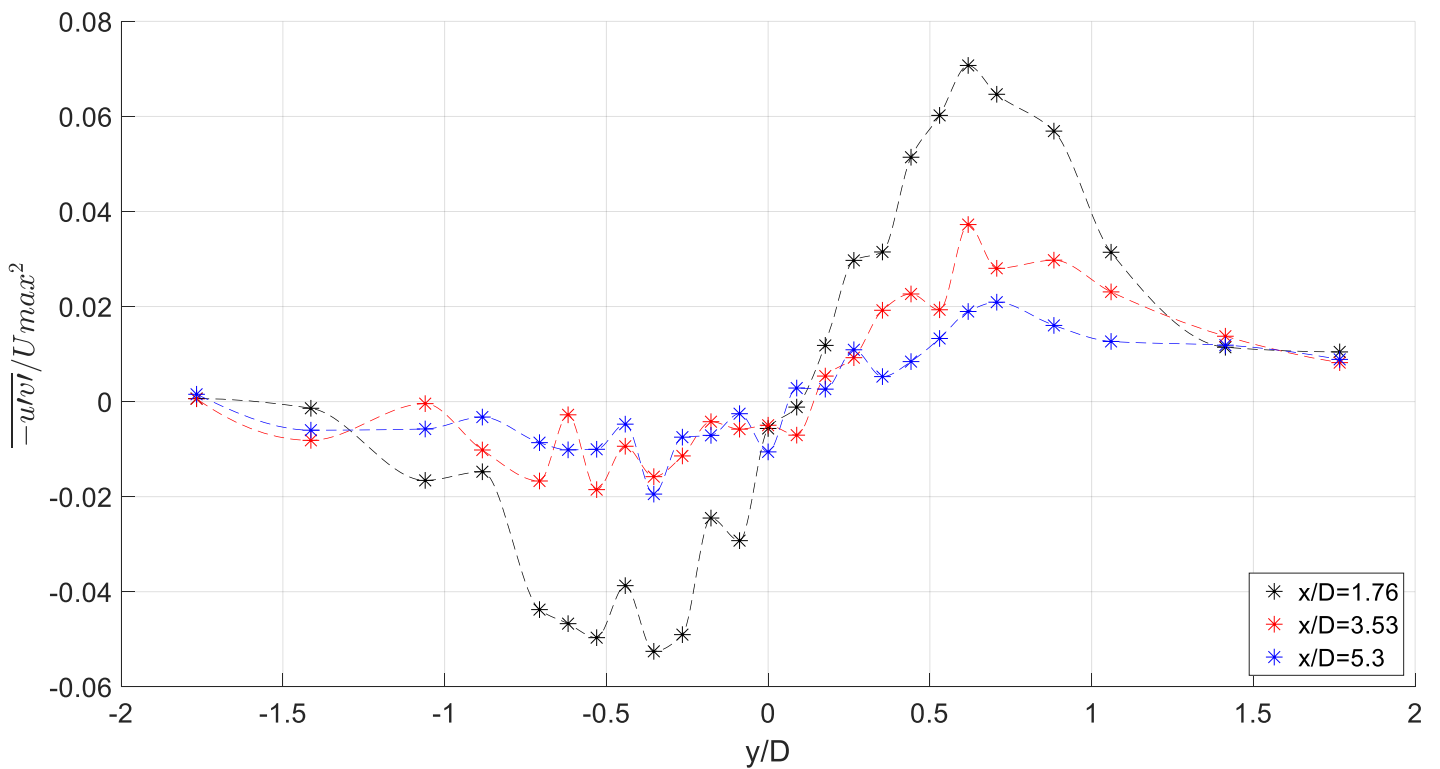


**Σχήμα 4.132** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=1,76$ ), 20 ( $x/D=3,53$ ) και 30cm( $x/D=5,3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου 5,66

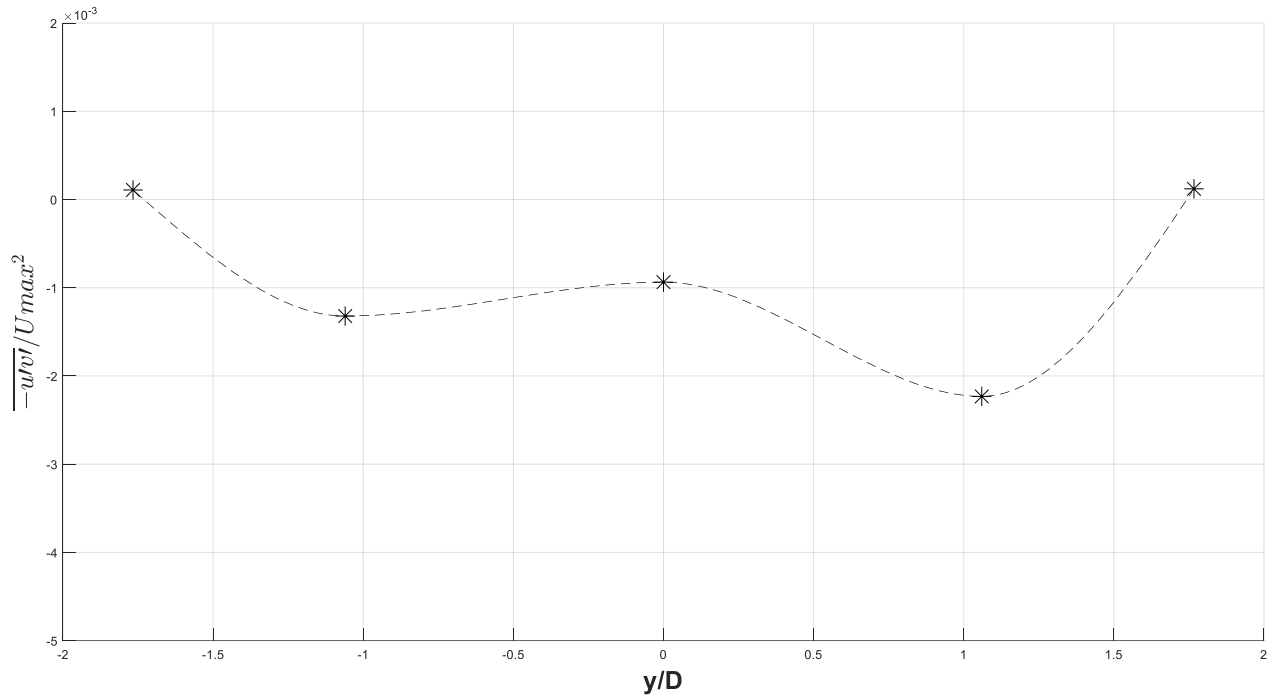




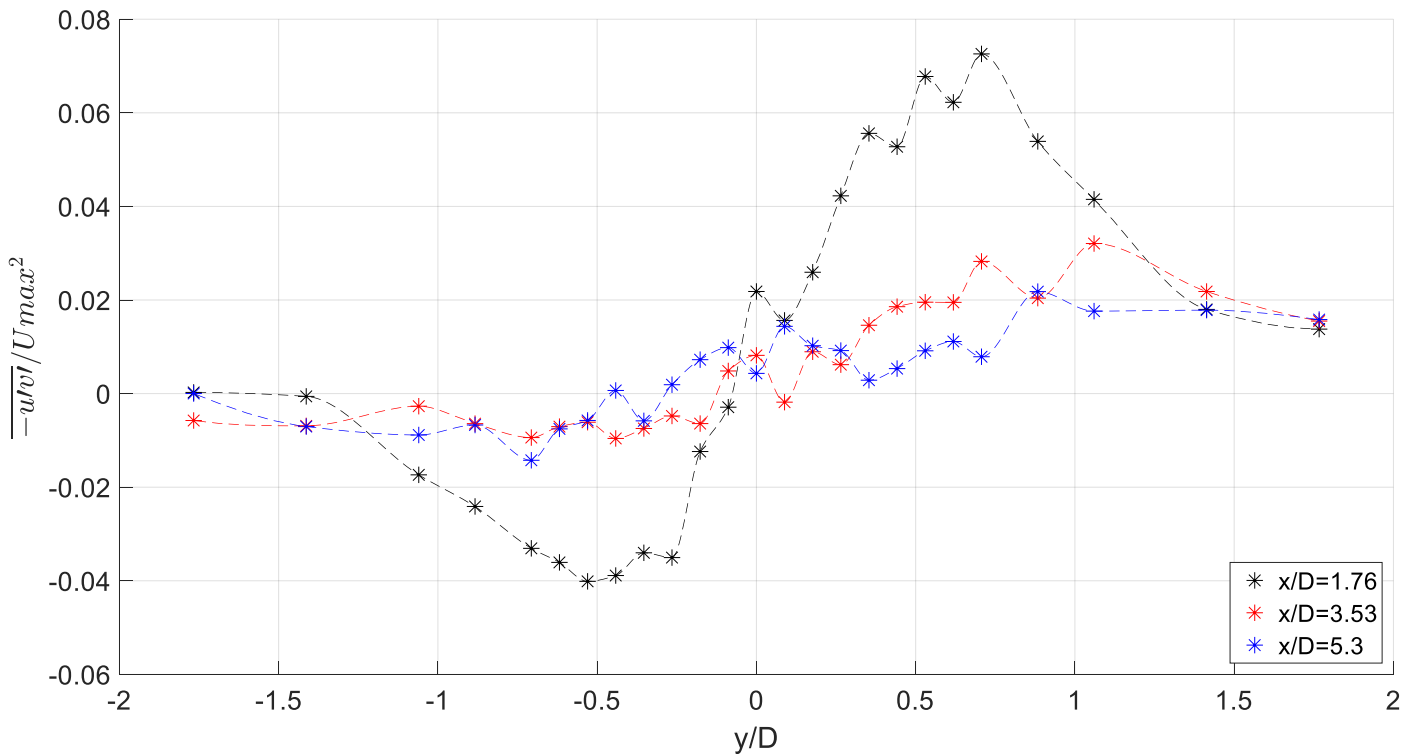
**Σχήμα 4.133** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-u'v'$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$



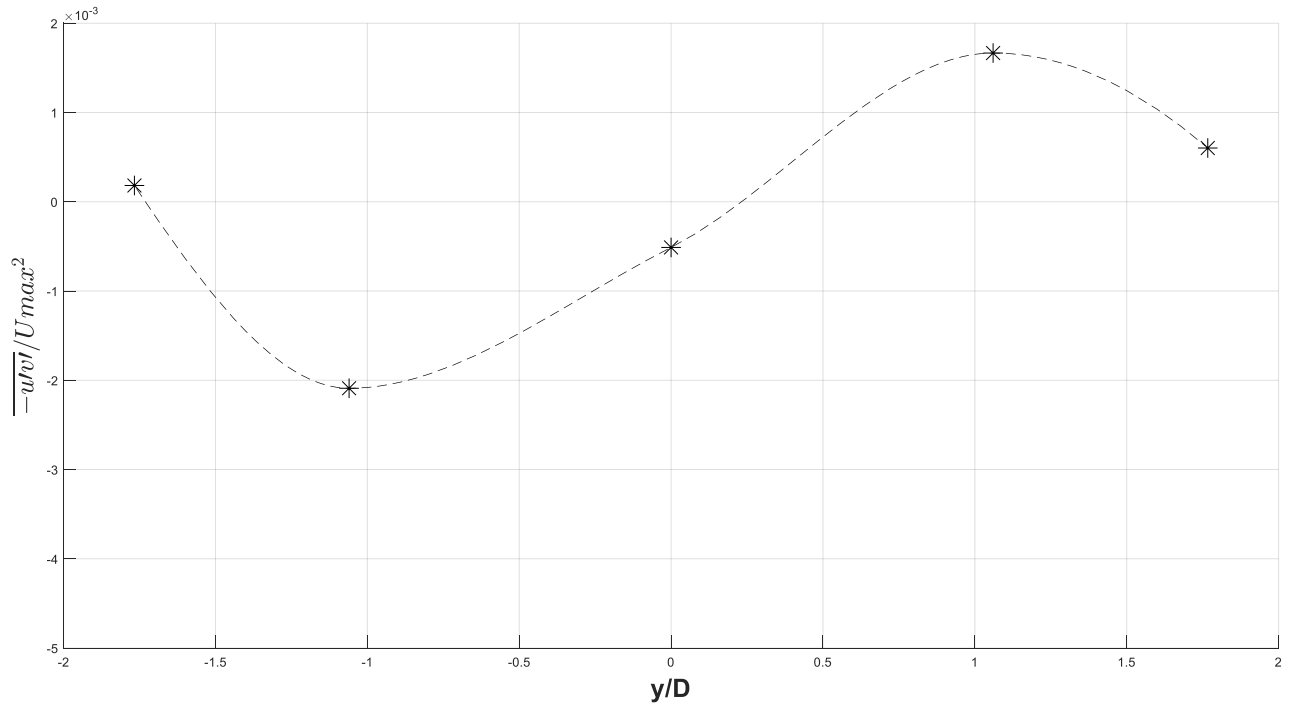
**Σχήμα 4.134** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-u'v'$  σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$



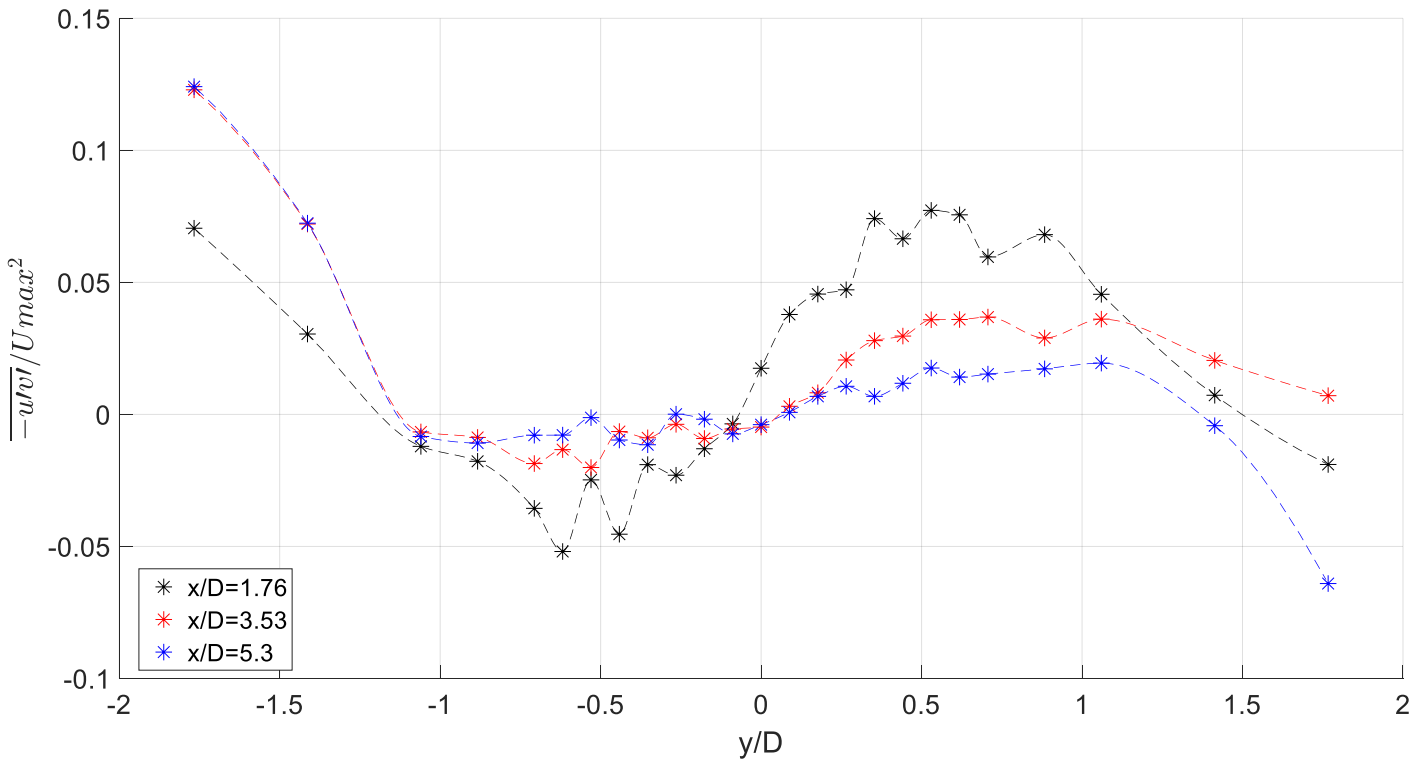
**Σχήμα 4.135** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$



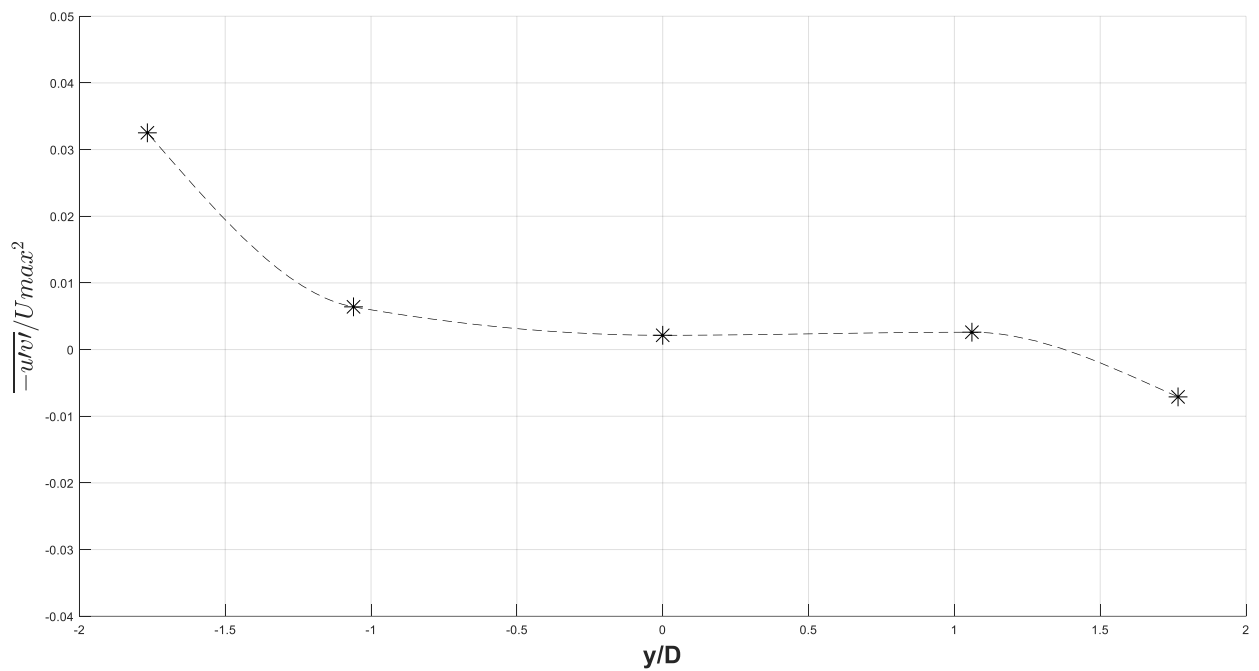
**Σχήμα 4.136** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'v'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$  σε ύψος  $9\text{cm}$



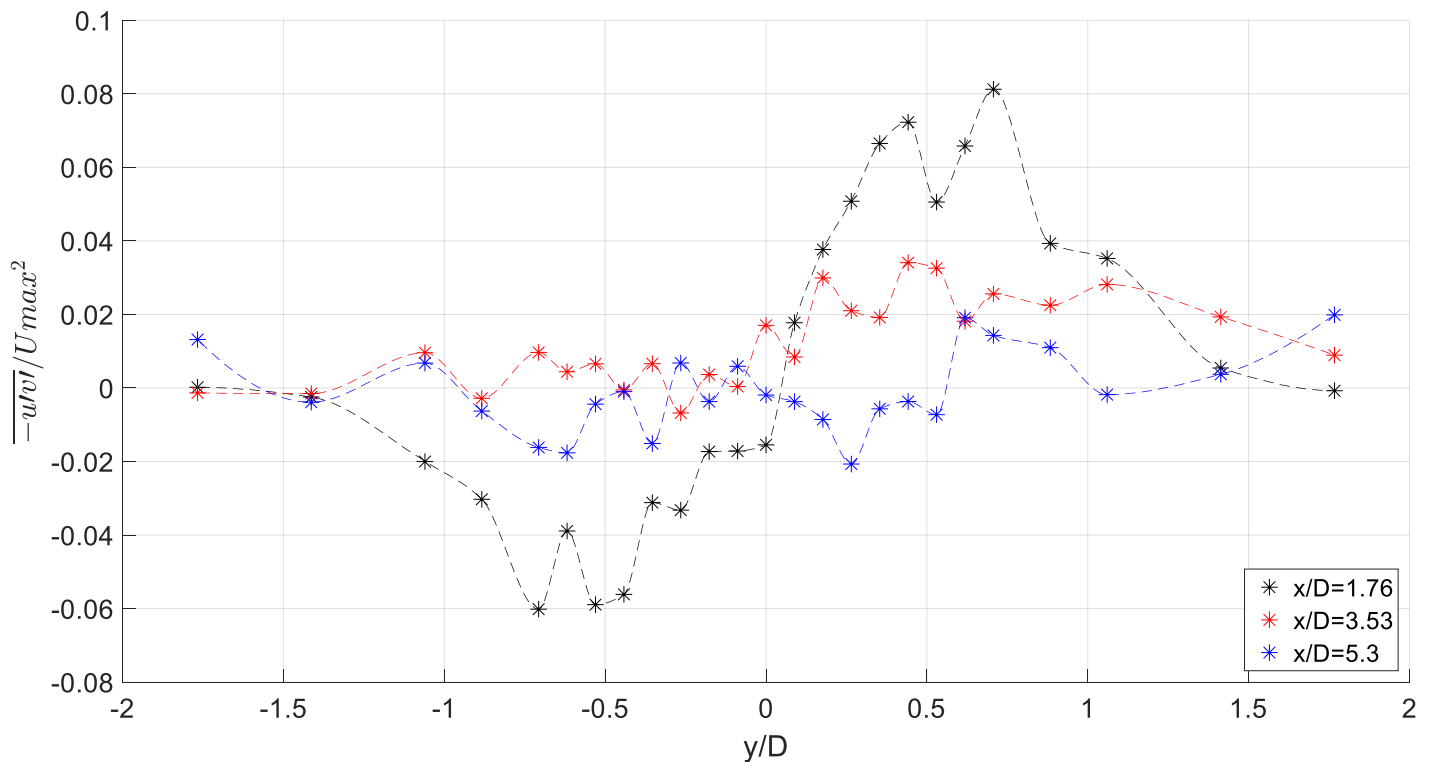
**Σχήμα 4.137** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$



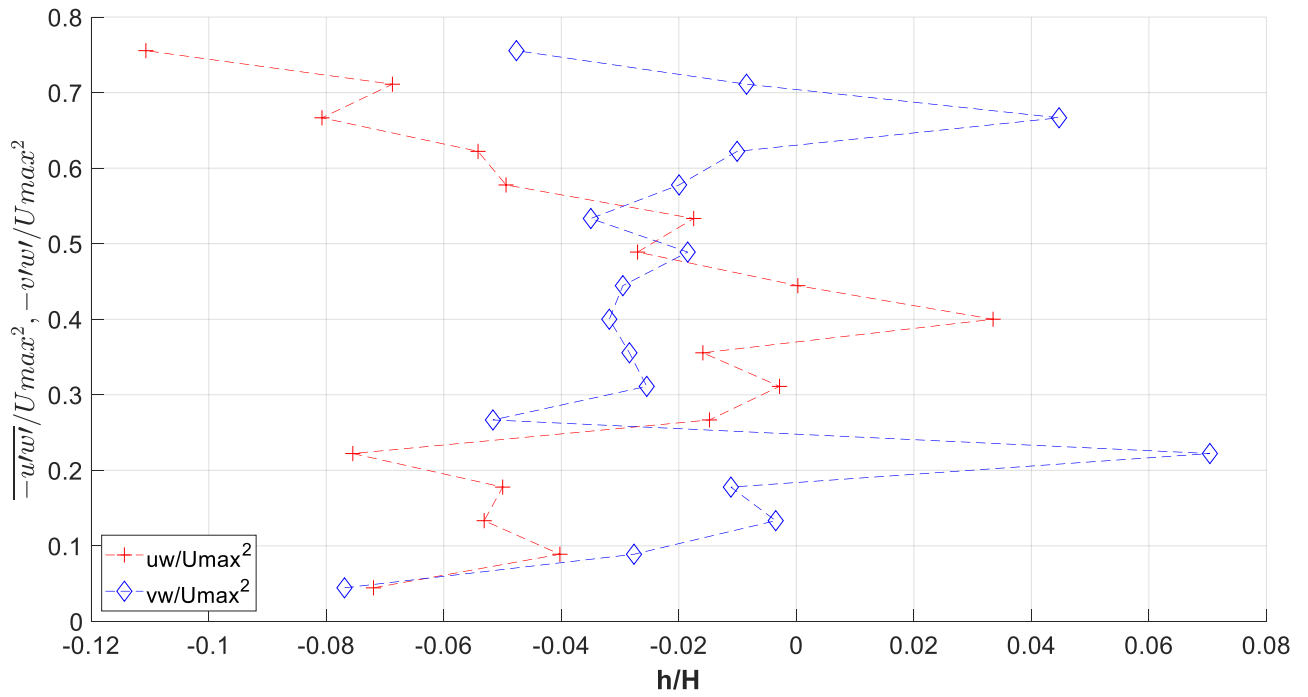
**Σχήμα 4.138** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$



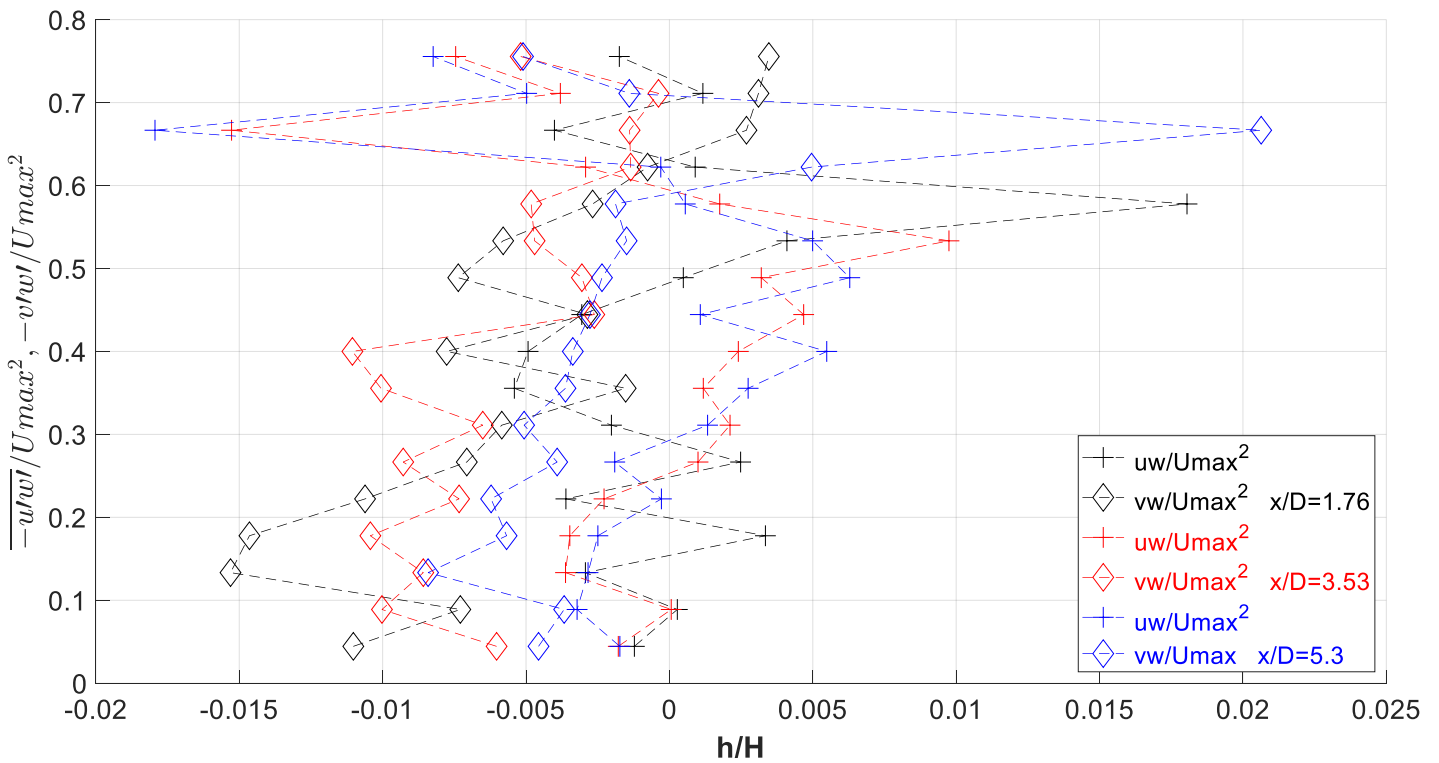
**Σχήμα 4.139** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$



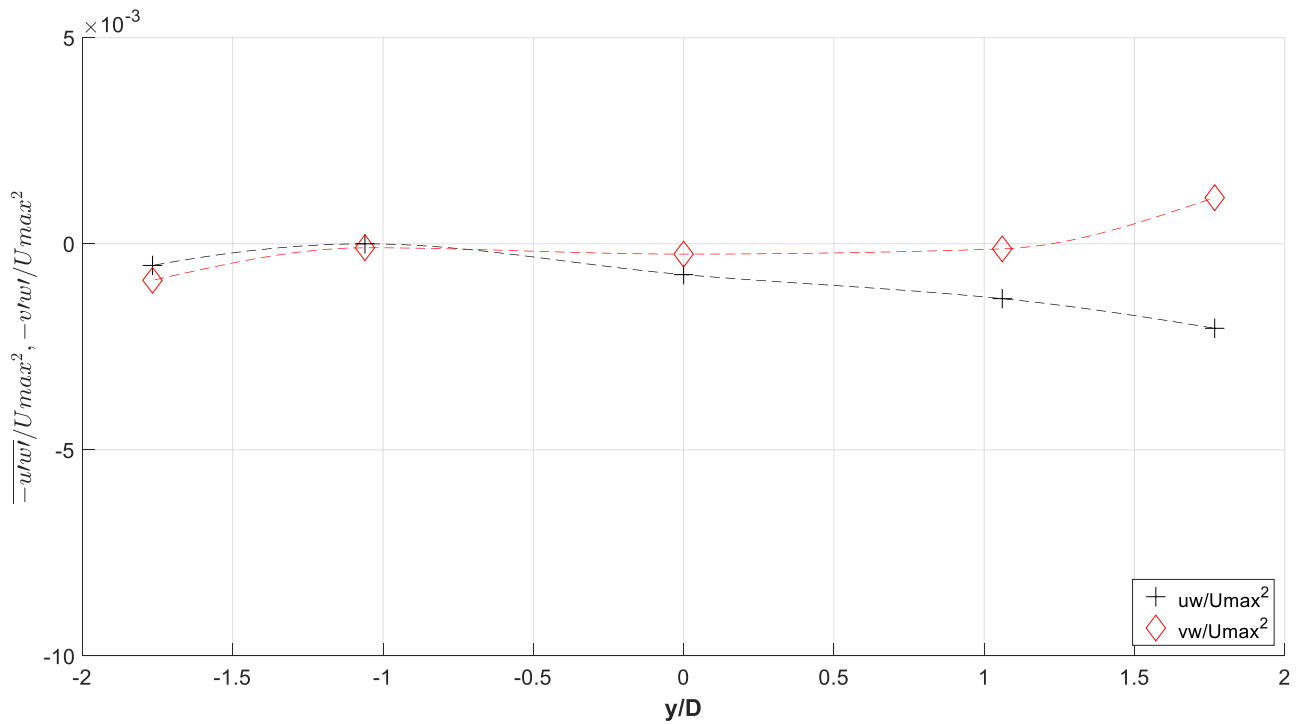
**Σχήμα 4.140** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'v'}$  σε απόσταση 10 ( $x/D=1.76$ ), 20 ( $x/D=3.53$ ) και 30cm ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$



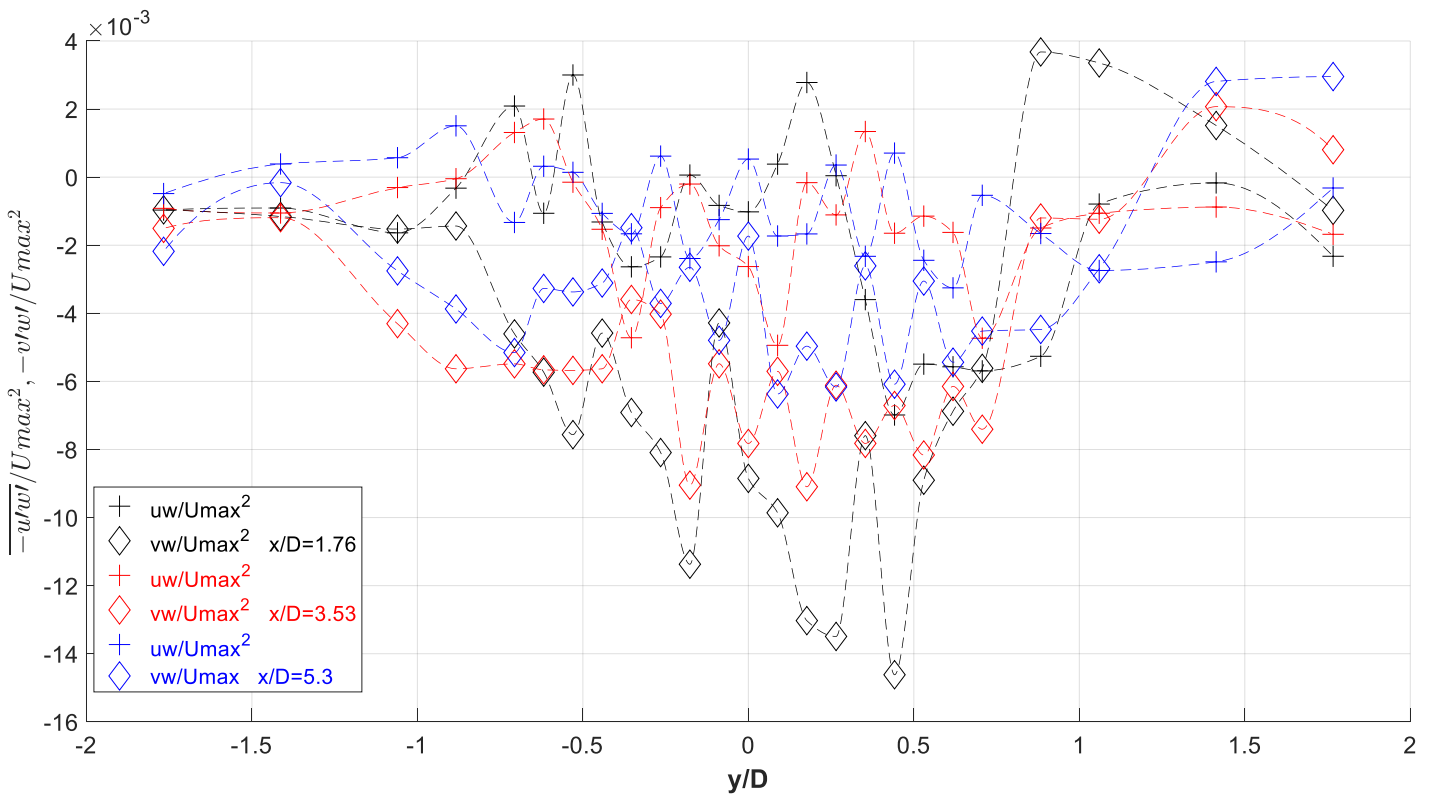
**Σχήμα 4.141** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$  σε απόσταση  $30\text{cm}(x/D=-5.3)$



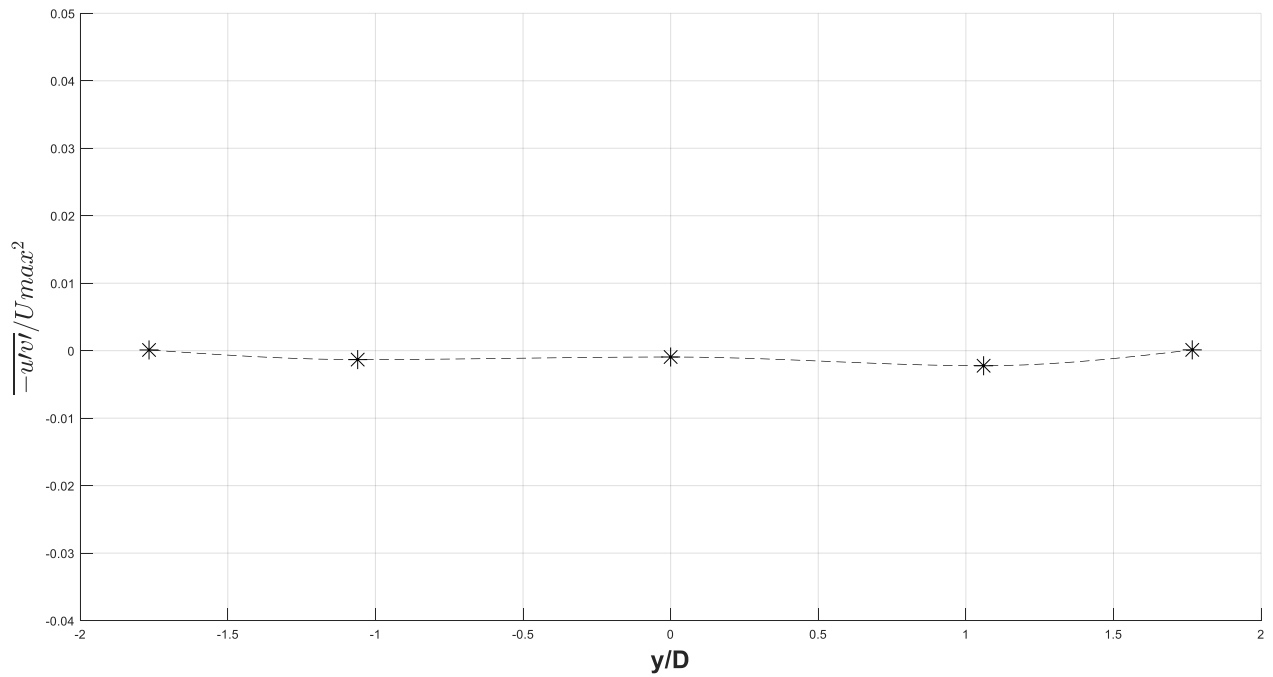
**Σχήμα 4.142** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66$



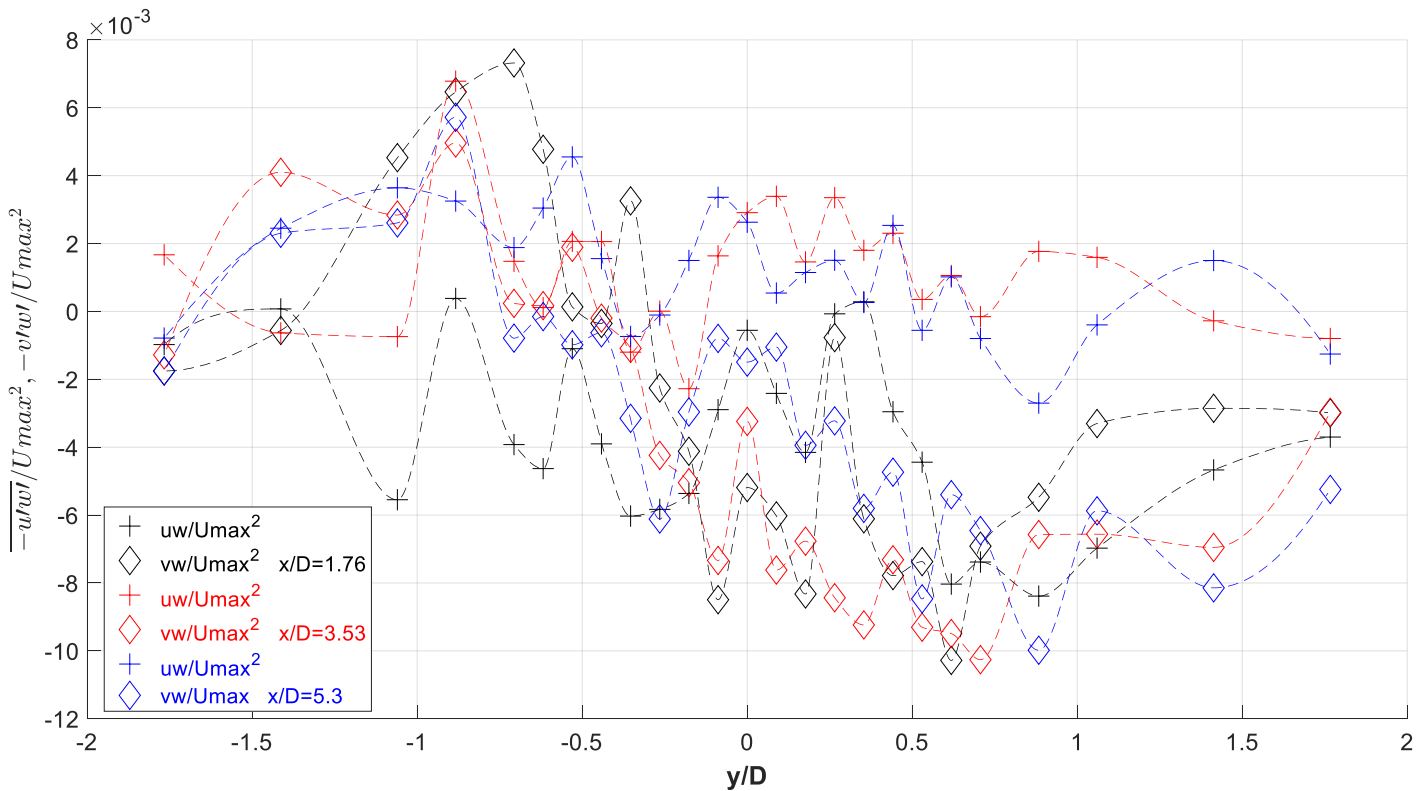
**Σχήμα 4.143** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D= 5.66\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$



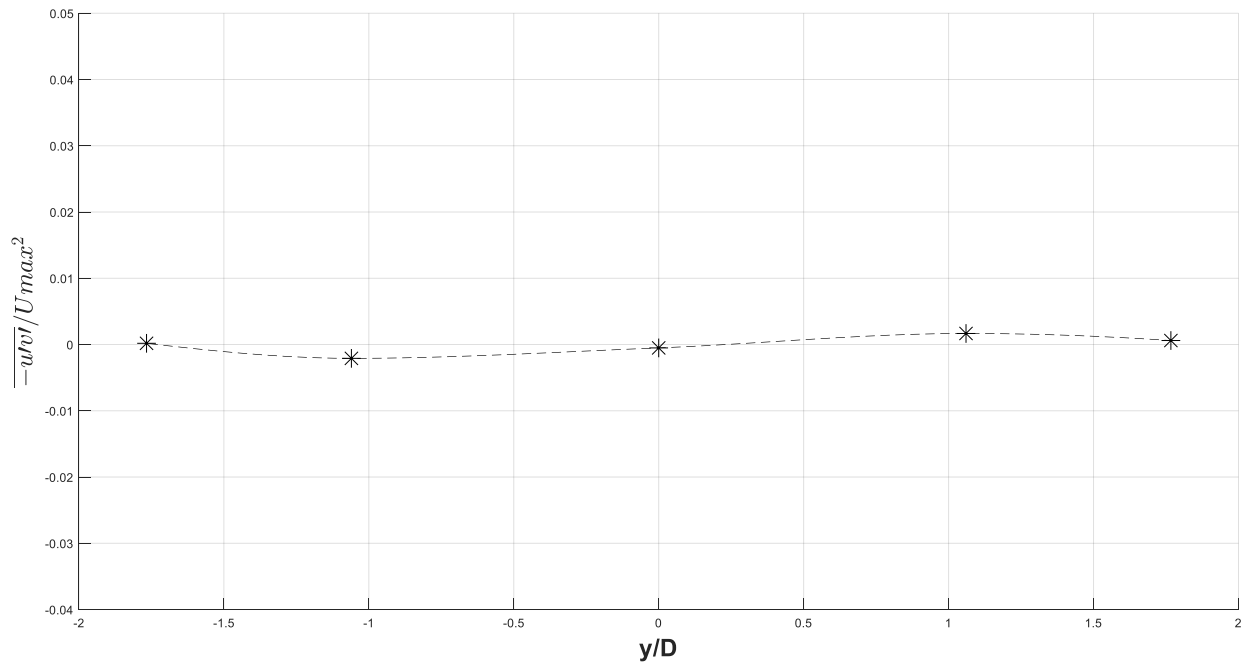
**Σχήμα 4.144** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $4.5\text{cm}$



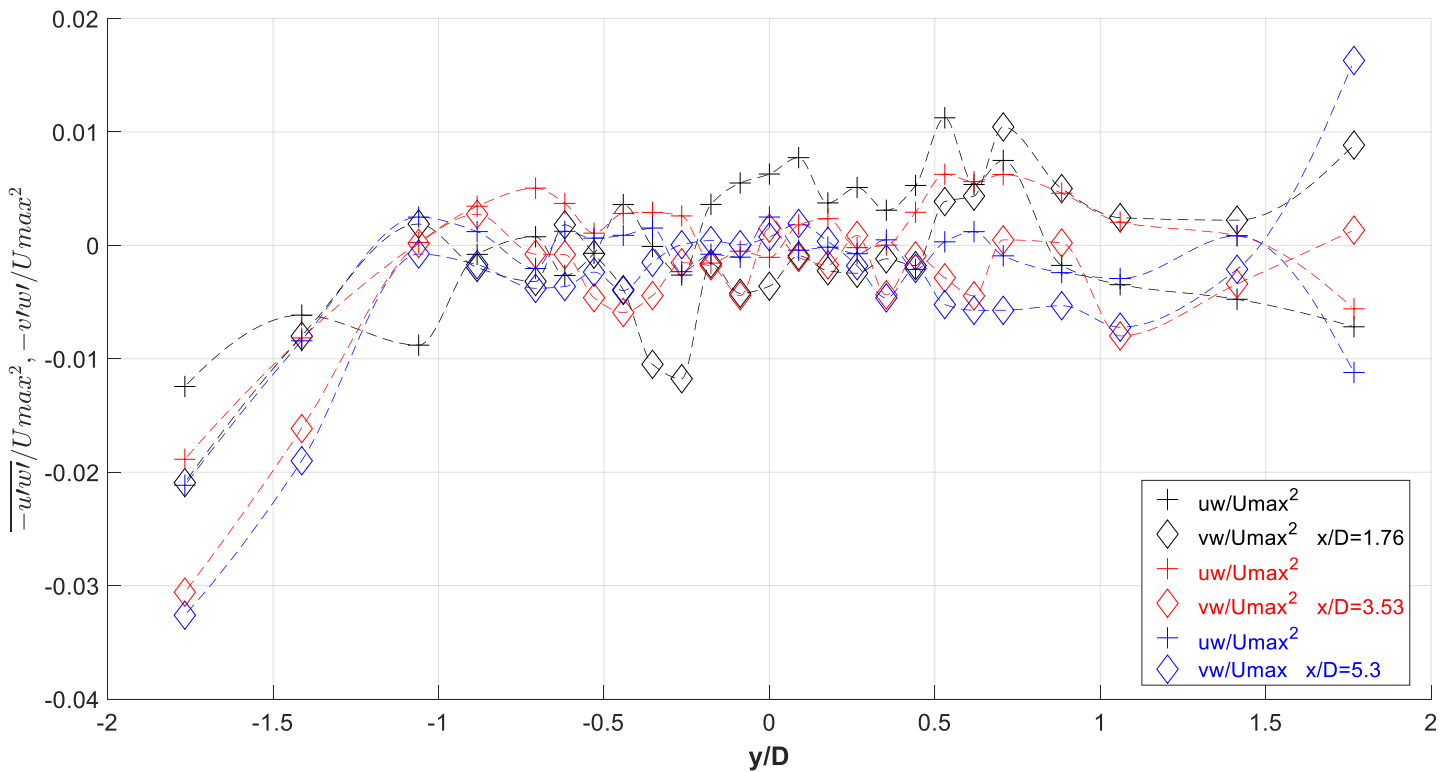
**Σχήμα 4.145** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D= 5.66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$



**Σχήμα 4.146** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

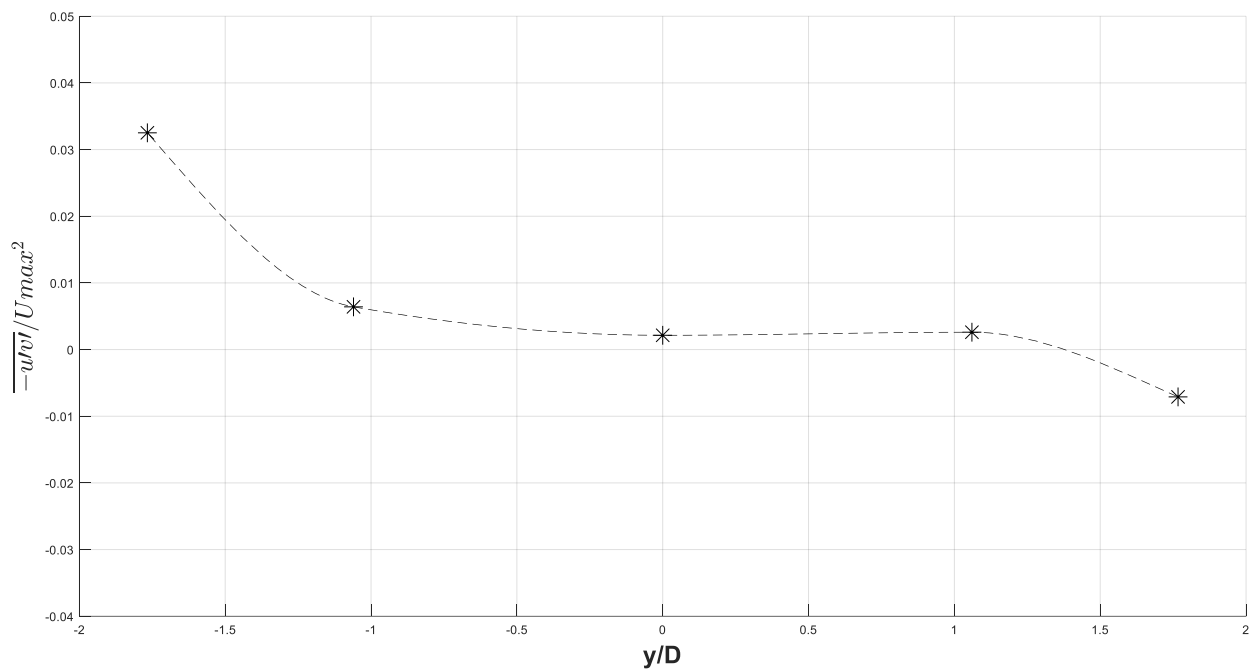


**Σχήμα 4.147** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$

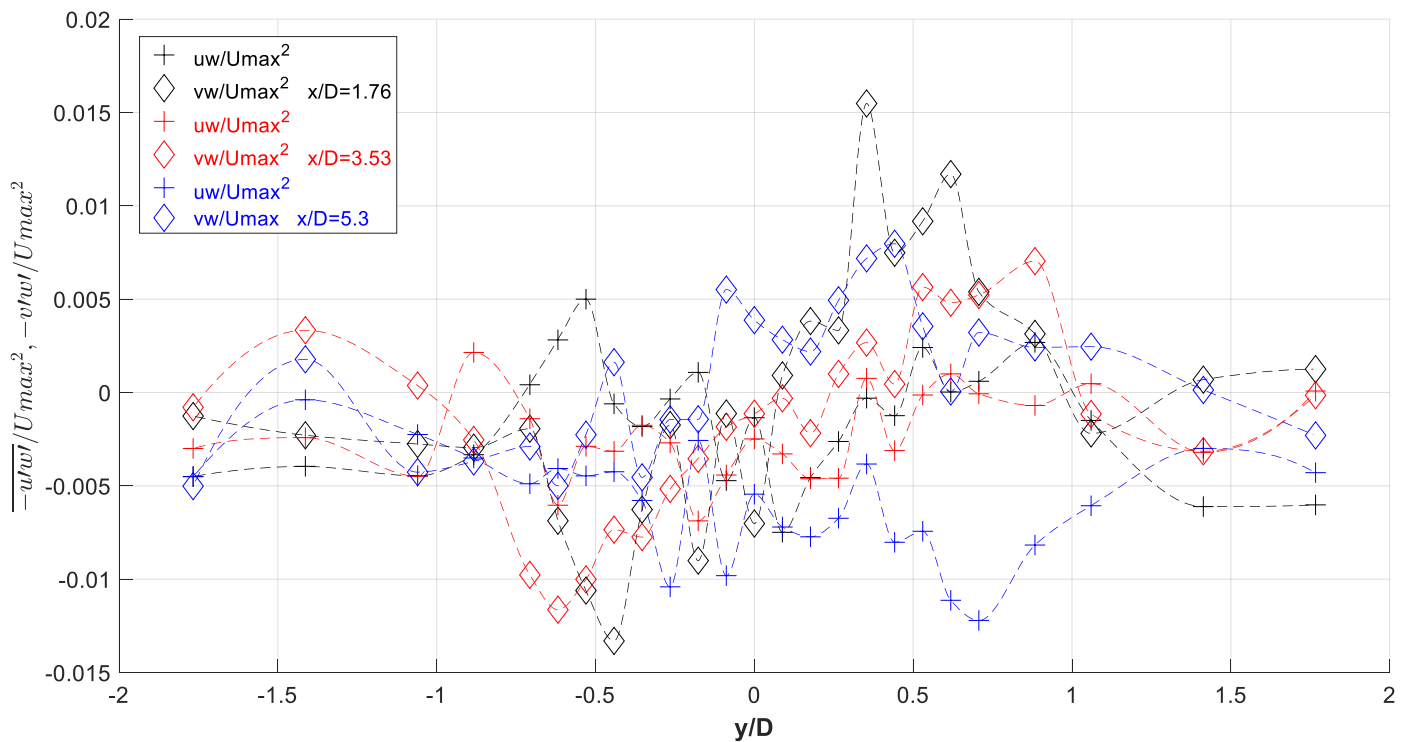


**Σχήμα 4.148** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $-\overline{u'w'}$  και  $-\overline{v'w'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$





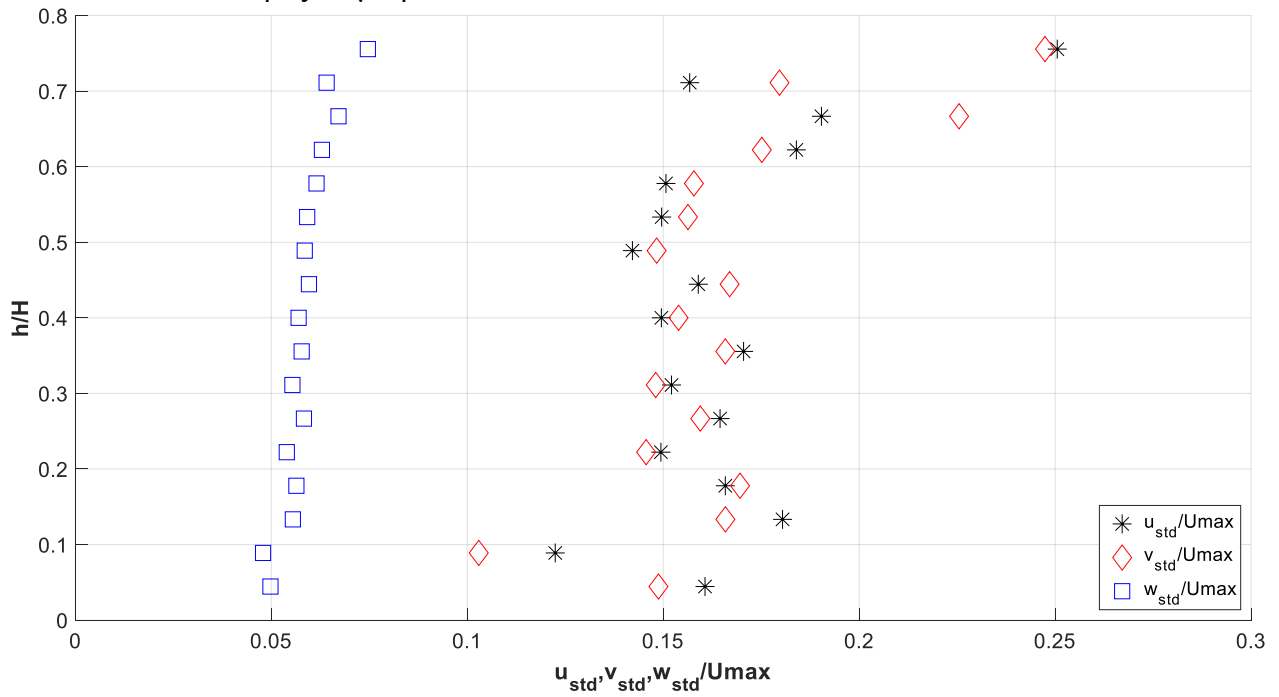
**Σχήμα 4.149** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσότητας  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  ανάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$



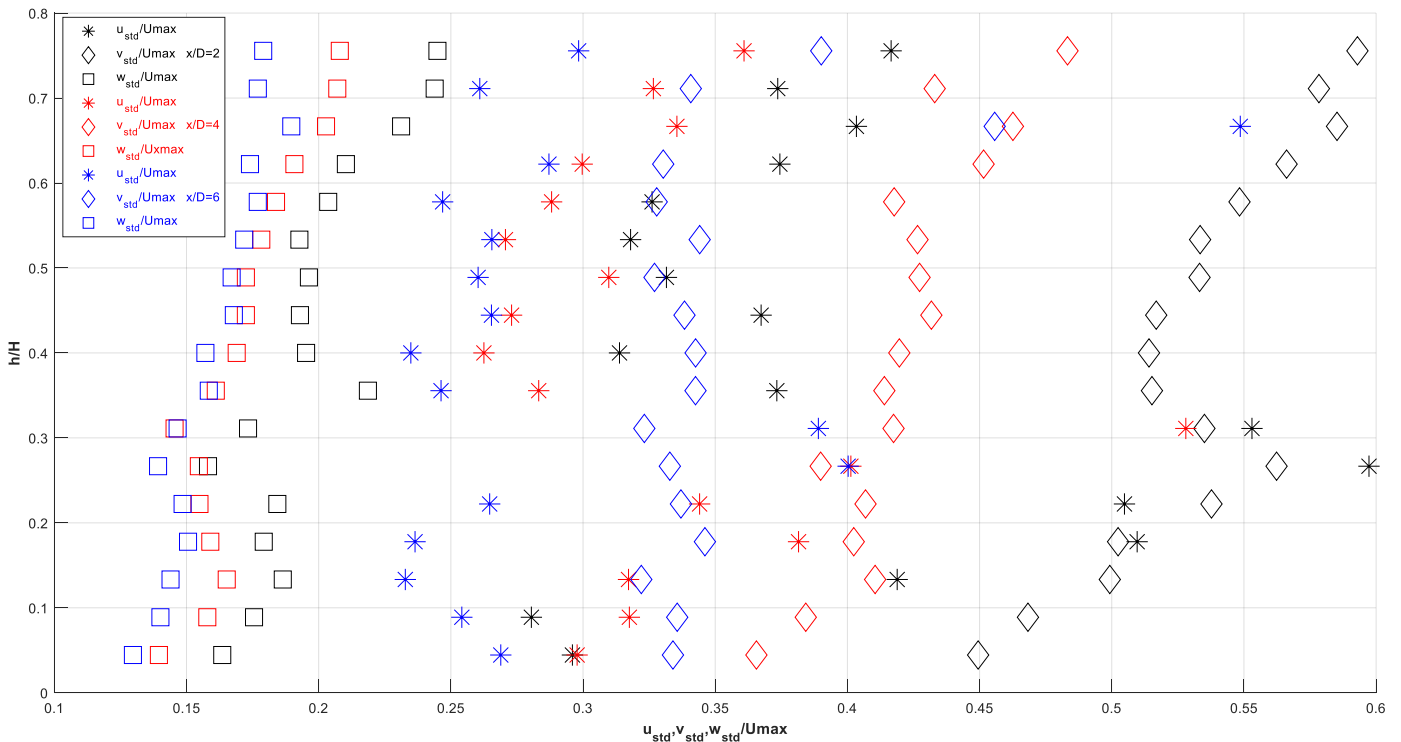
**Σχήμα 4.150** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια κατανομή τυρβώδων τάσεων ποσοτήτων  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  σε απόσταση  $10$  ( $x/D=1.76$ ),  $20$  ( $x/D=3.53$ ) και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) κατάντη ρομβοειδής διατομής διαμέτρου  $D=5.66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

### 4.3 Ένταση τύρβης

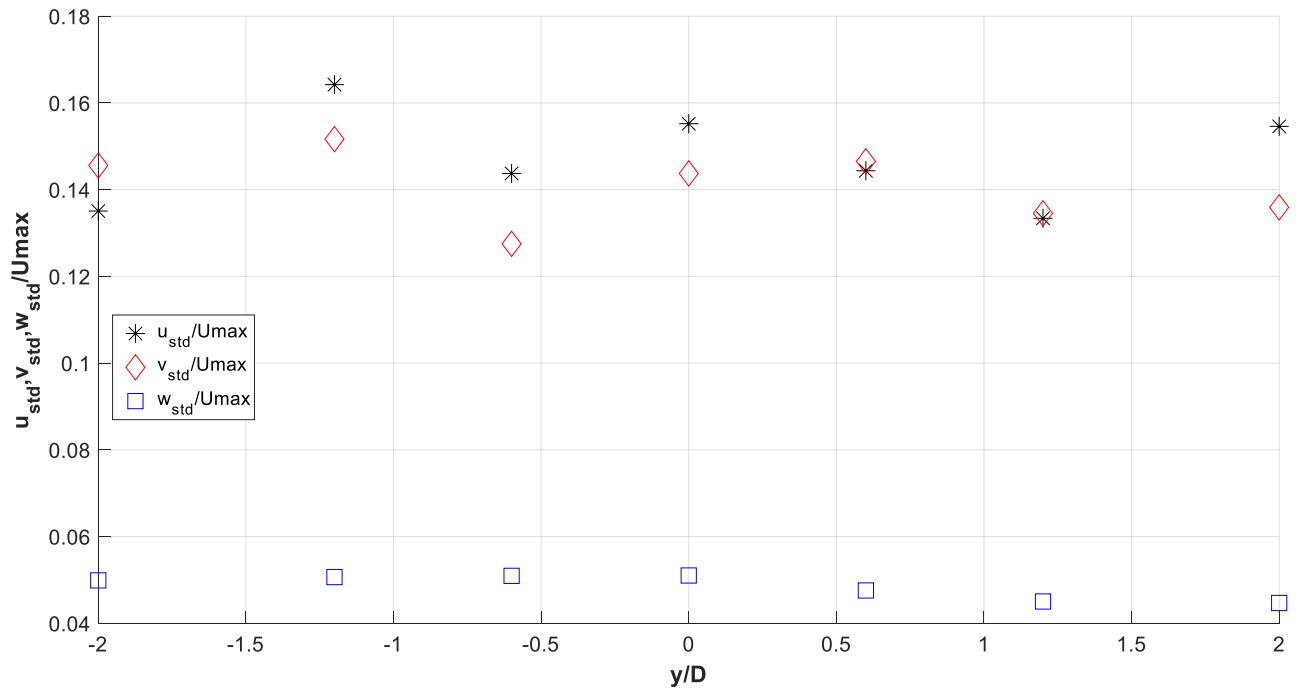
#### 4.3.1 Κύλινδρος διαμέτρου D=5cm



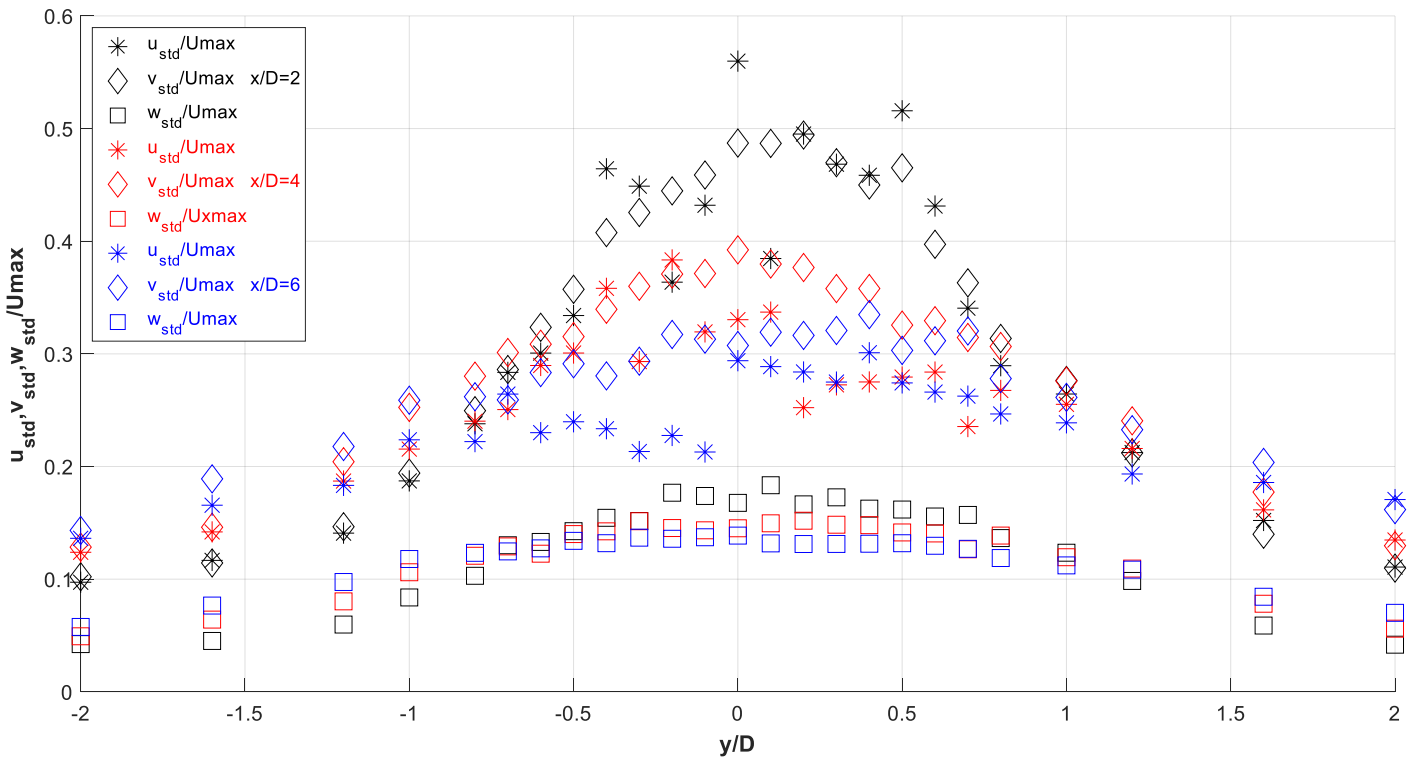
Σχήμα 4.151 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 30cm ( $x/D=7.5$ )



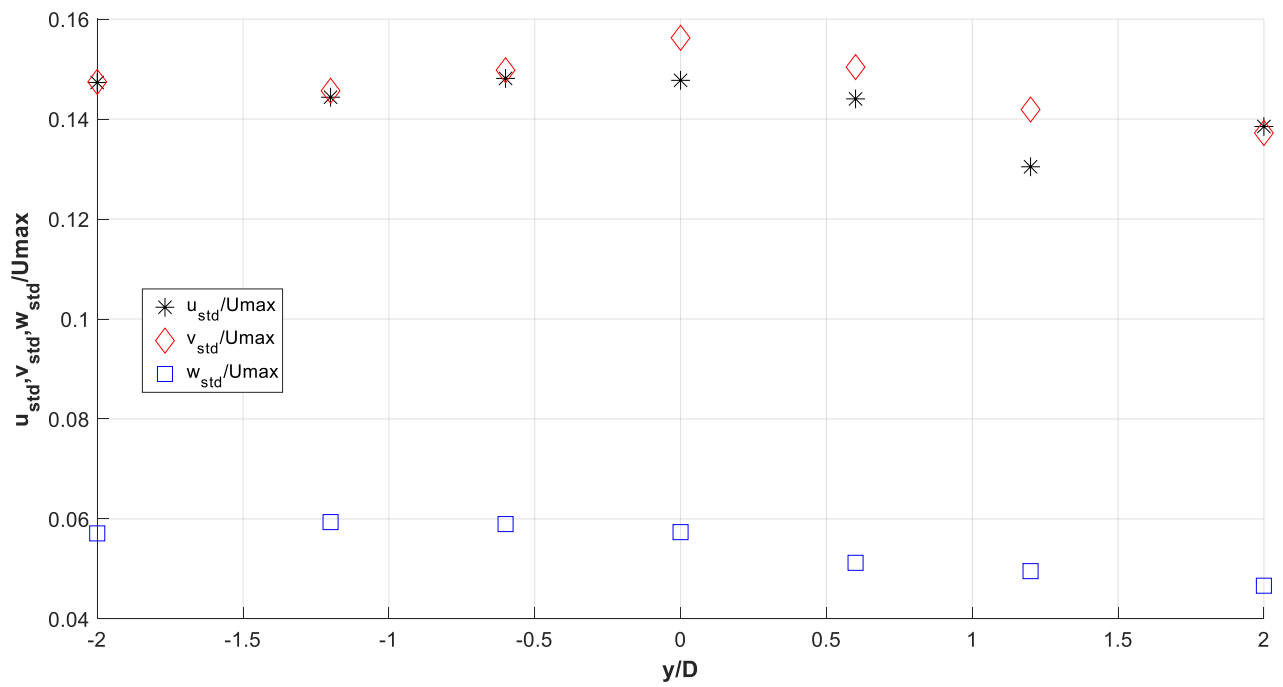
Σχήμα 4.152 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 10cm( $x/D=2$ ), 20cm( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ )



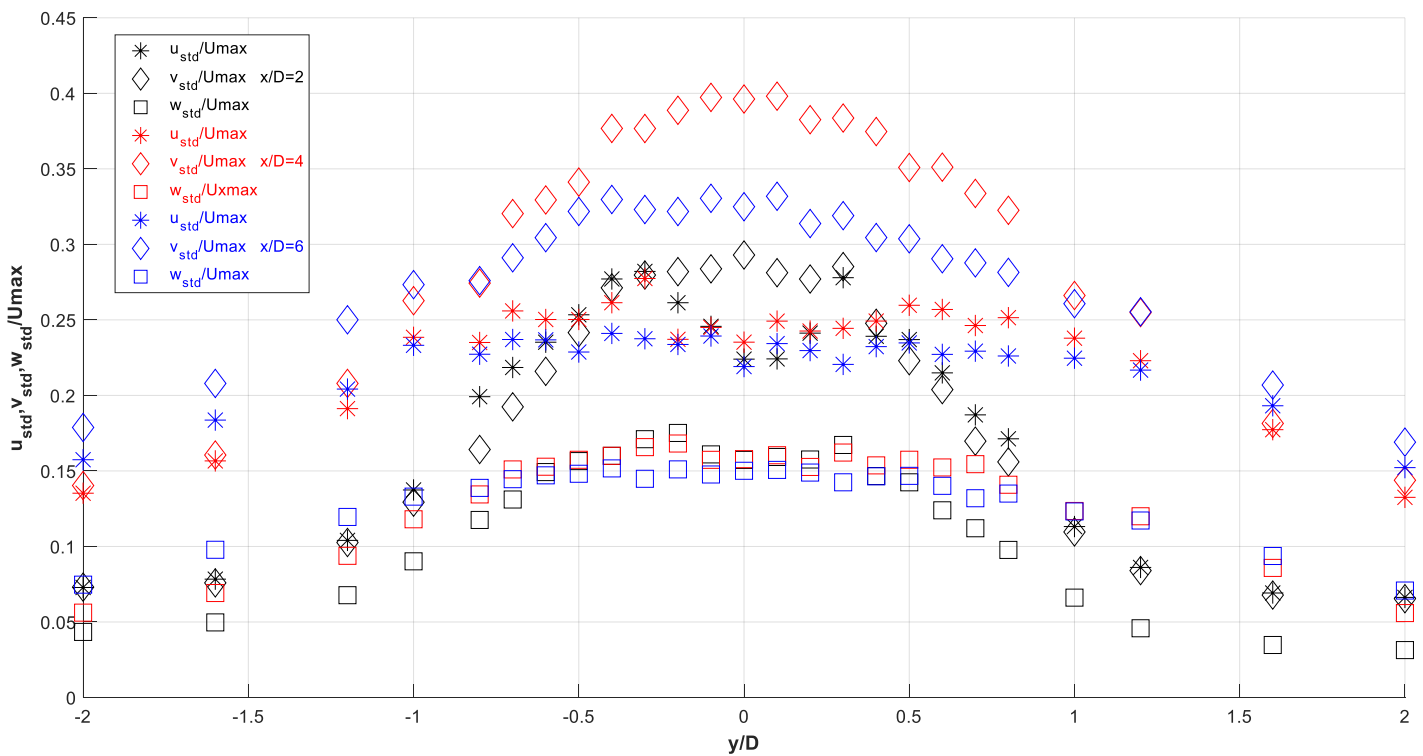
**Σχήμα 4.153** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση -30cm σε ύψος 4,5cm



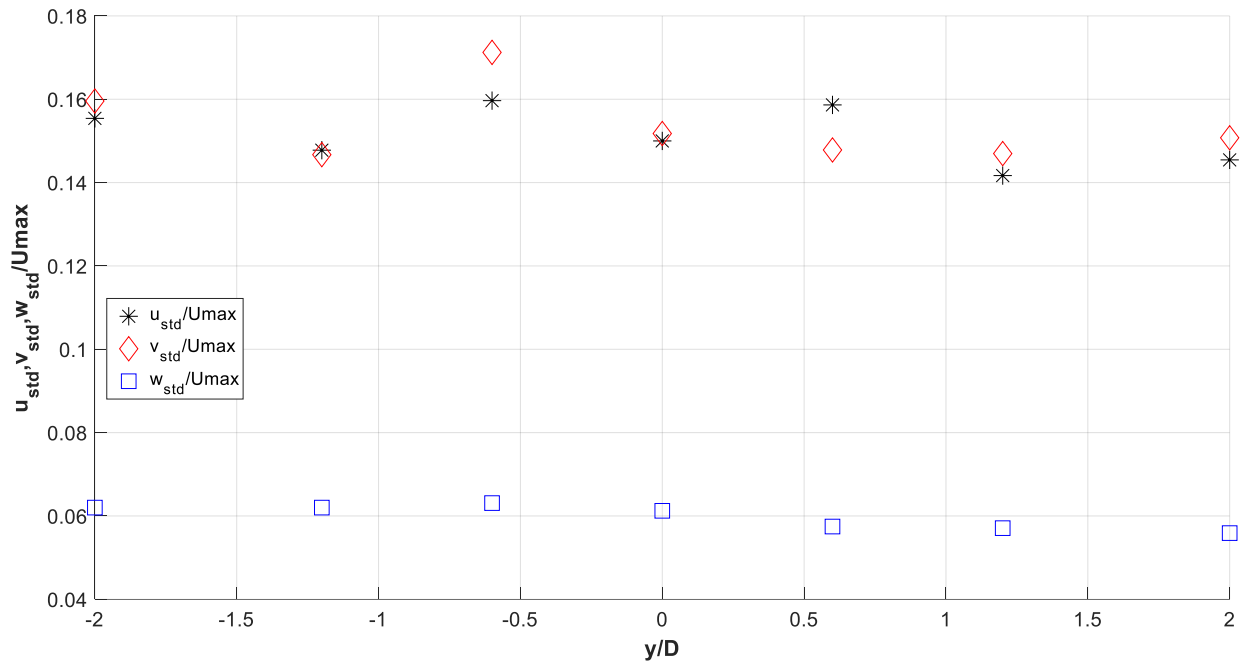
**Σχήμα 4.154** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατόντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 10(x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) σε ύψος 4,5cm



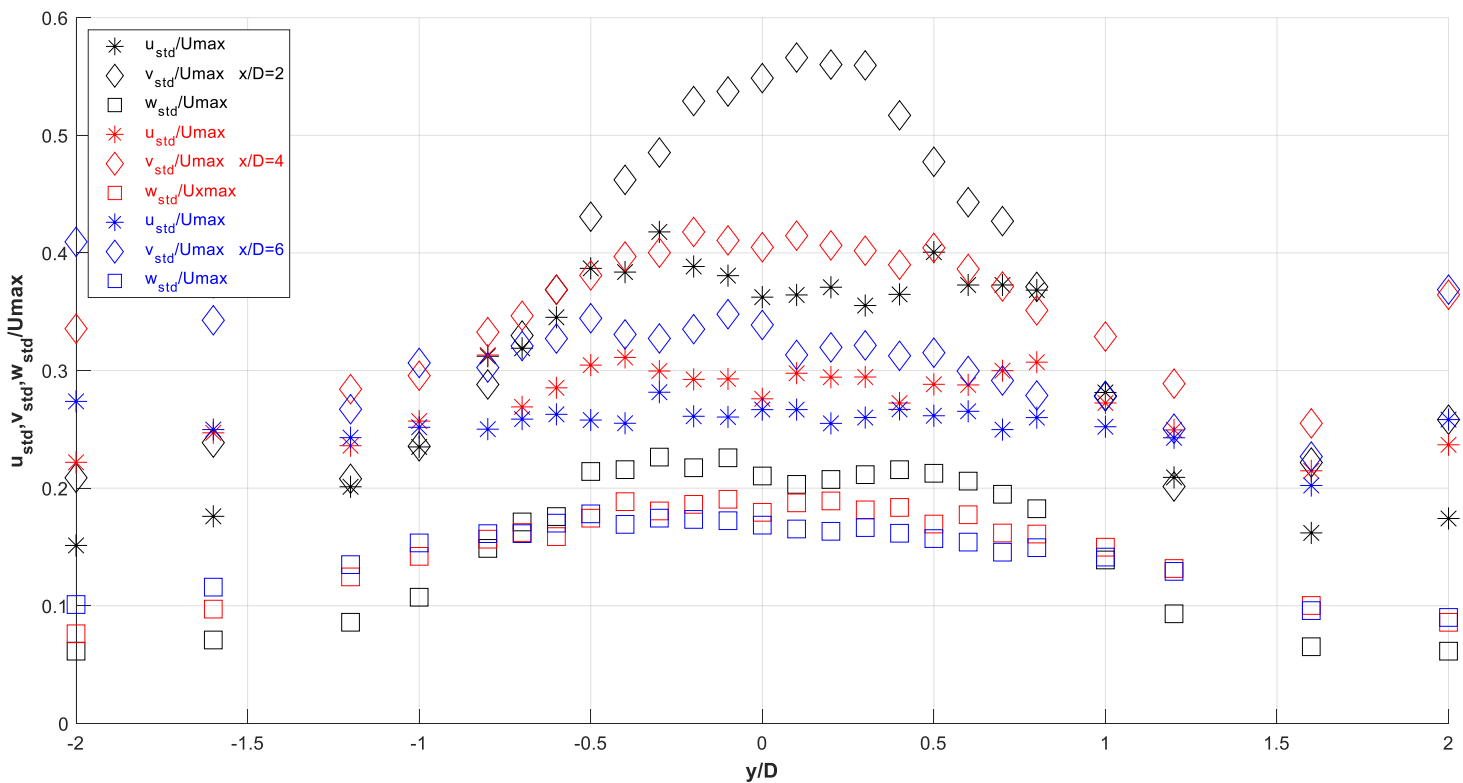
**Σχήμα 4.155** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση -30cm σε ύψος 9cm



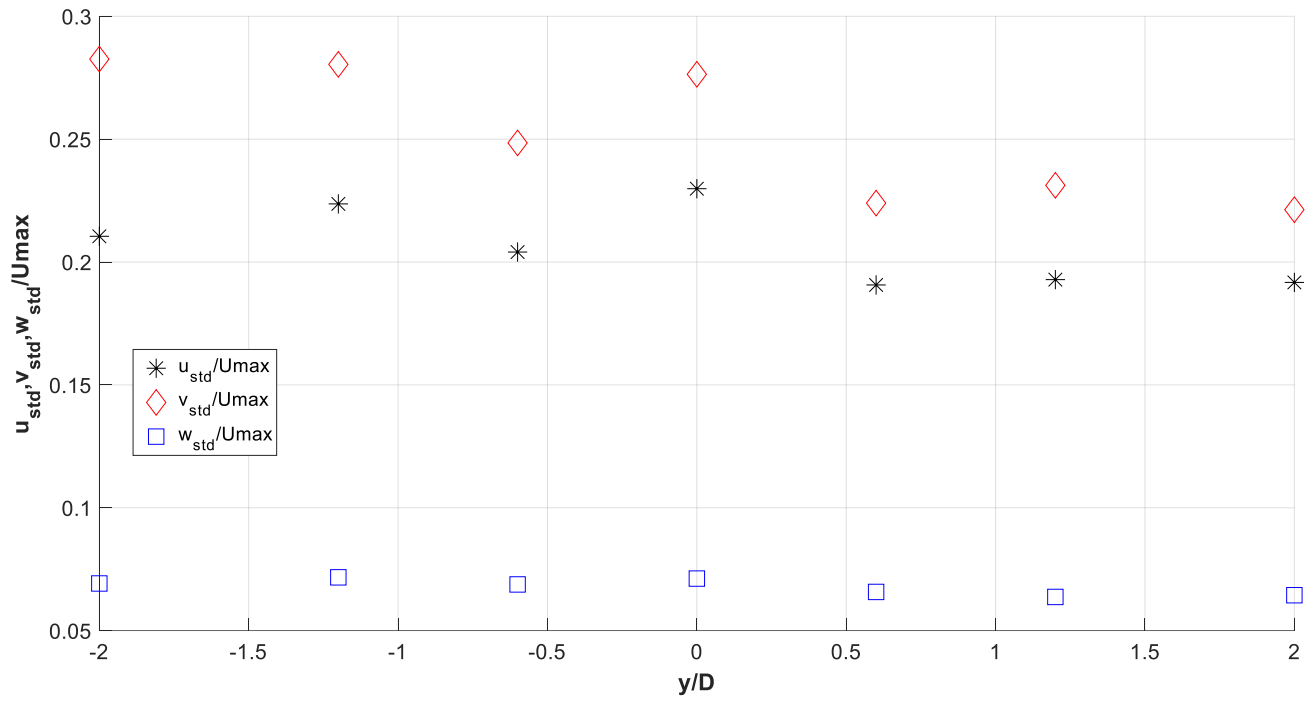
**Σχήμα 4.156** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 10(x/D=2), 20 (x/D=4) και 30cm(x/D=6) σε ύψος 9cm



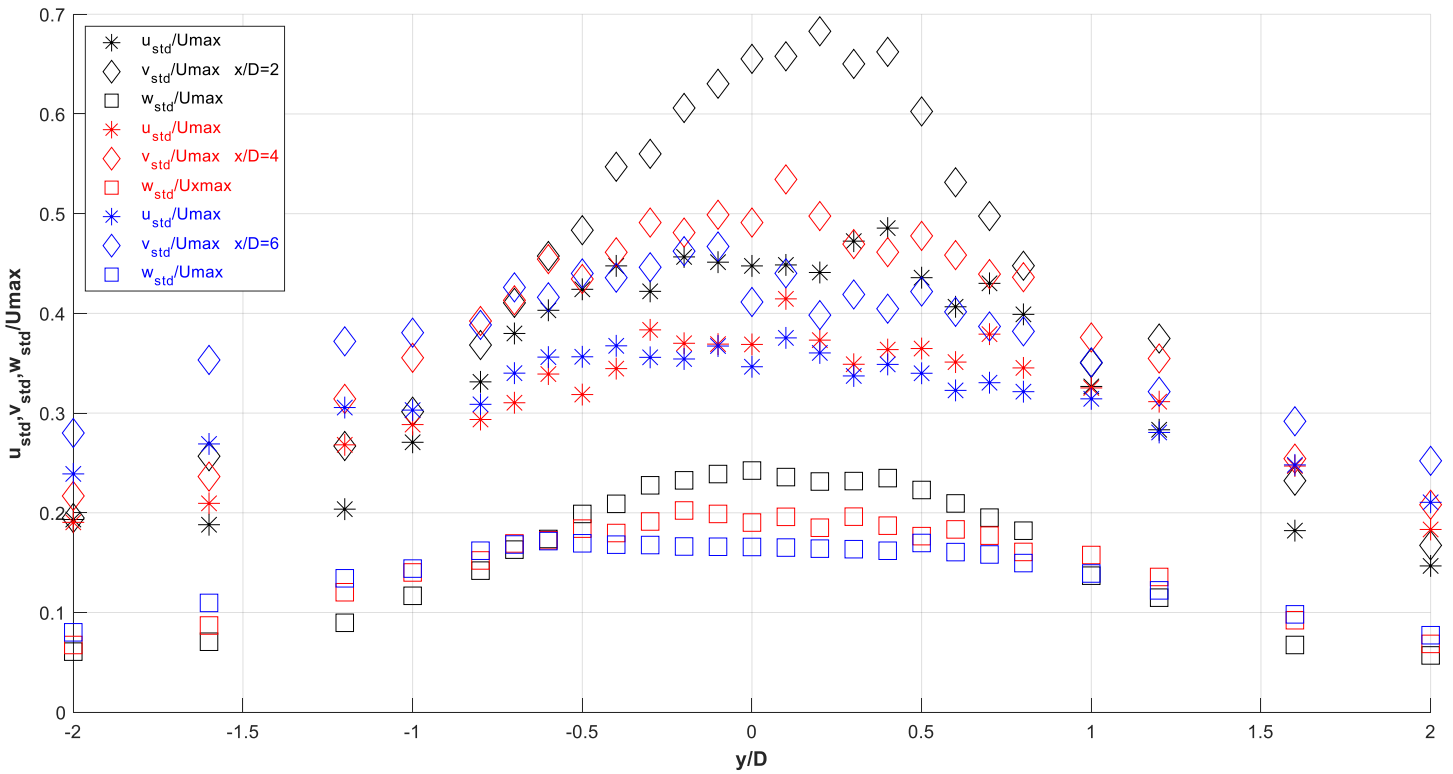
**Σχήμα 4.157** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση -30cm σε ύψος 13,5cm



**Σχήμα 4.158** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατόντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 10( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) σε ύψος 13.5cm

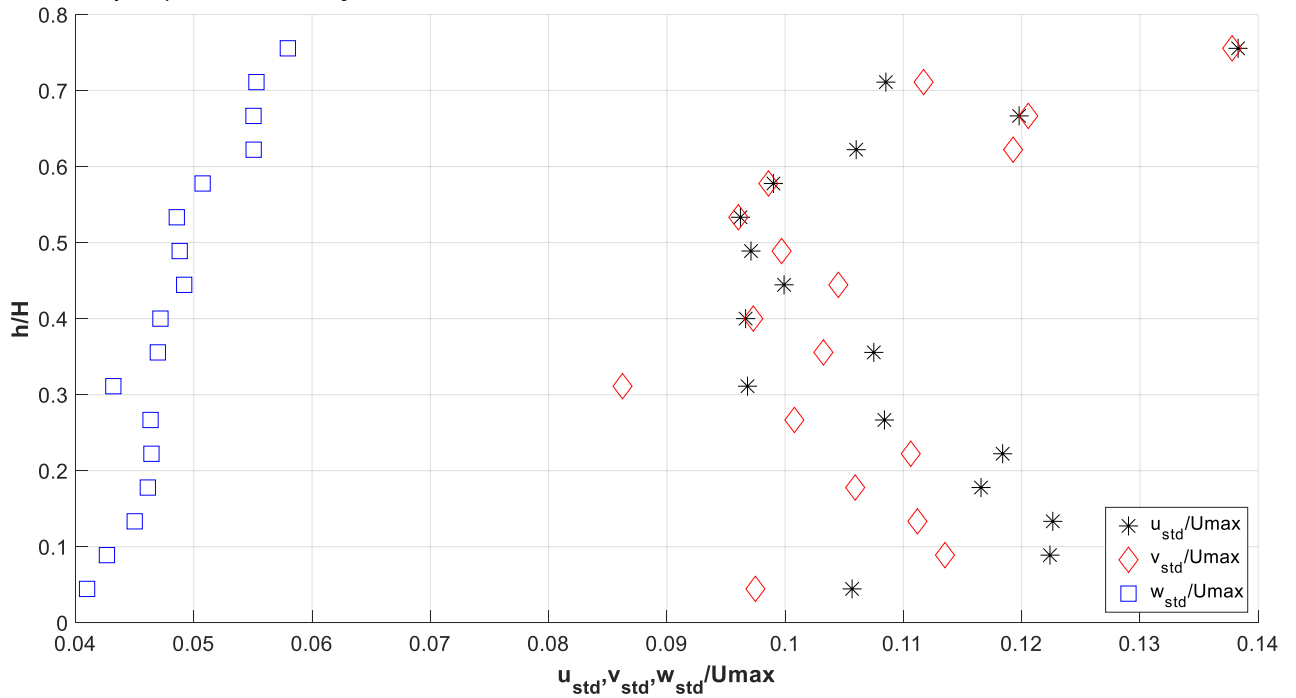


**Σχήμα 4.159** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση -30cm σε ύψος 17.1cm

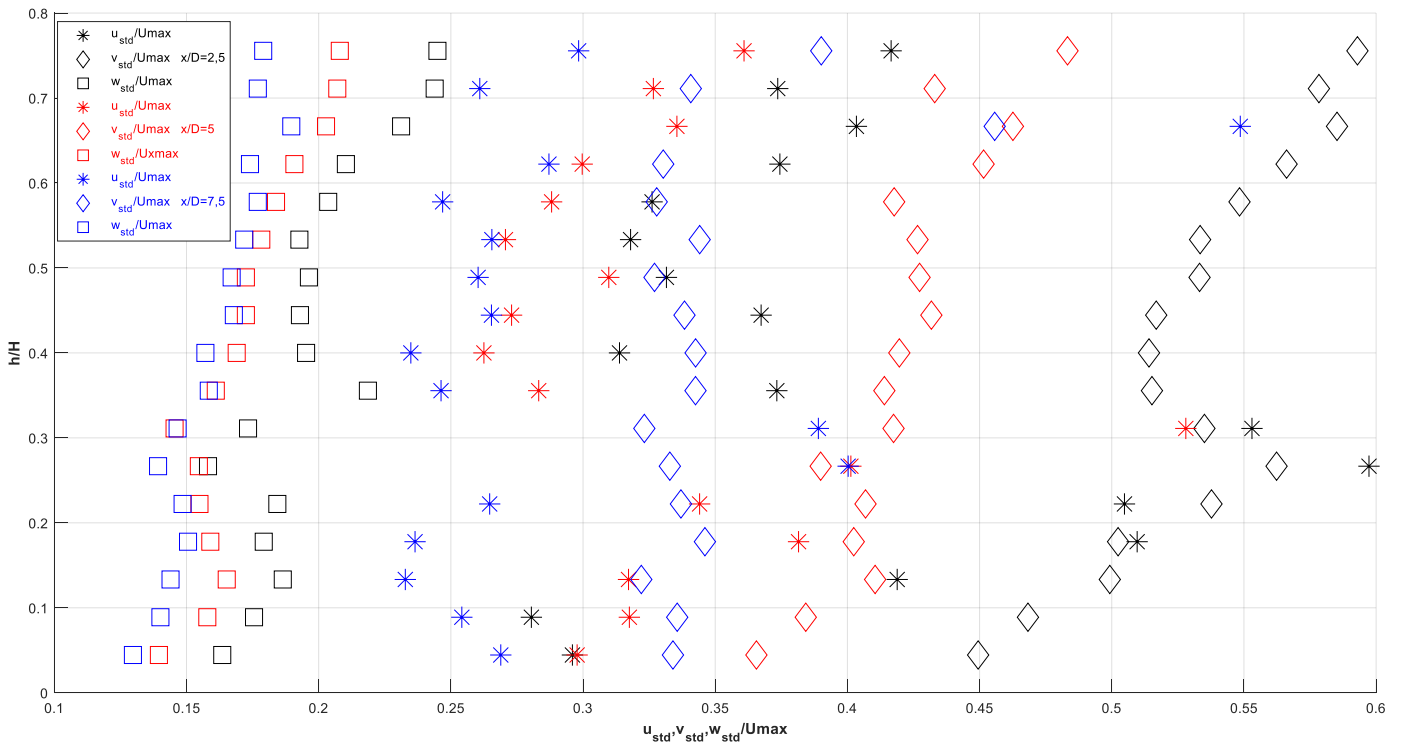


**Σχήμα 4.160** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη κυλινδρικής διατομής σε απόσταση 10( $x/D=2$ ), 20 ( $x/D=4$ ) και 30cm( $x/D=6$ ) σε ύψος 17.1cm

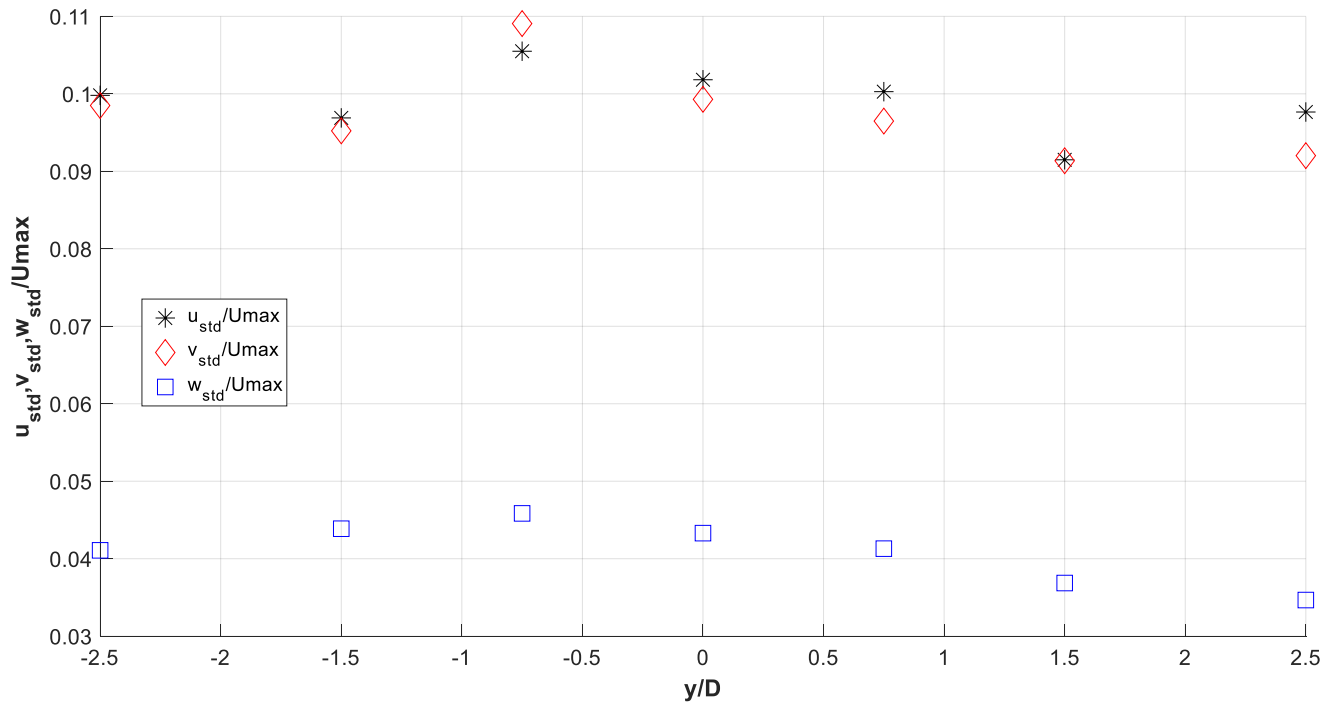
4.3.2 Ορθογώνιο πλάτους  $D=4\text{cm}$  και  $L=10\text{cm}$  ( $L/D=2.5$ )



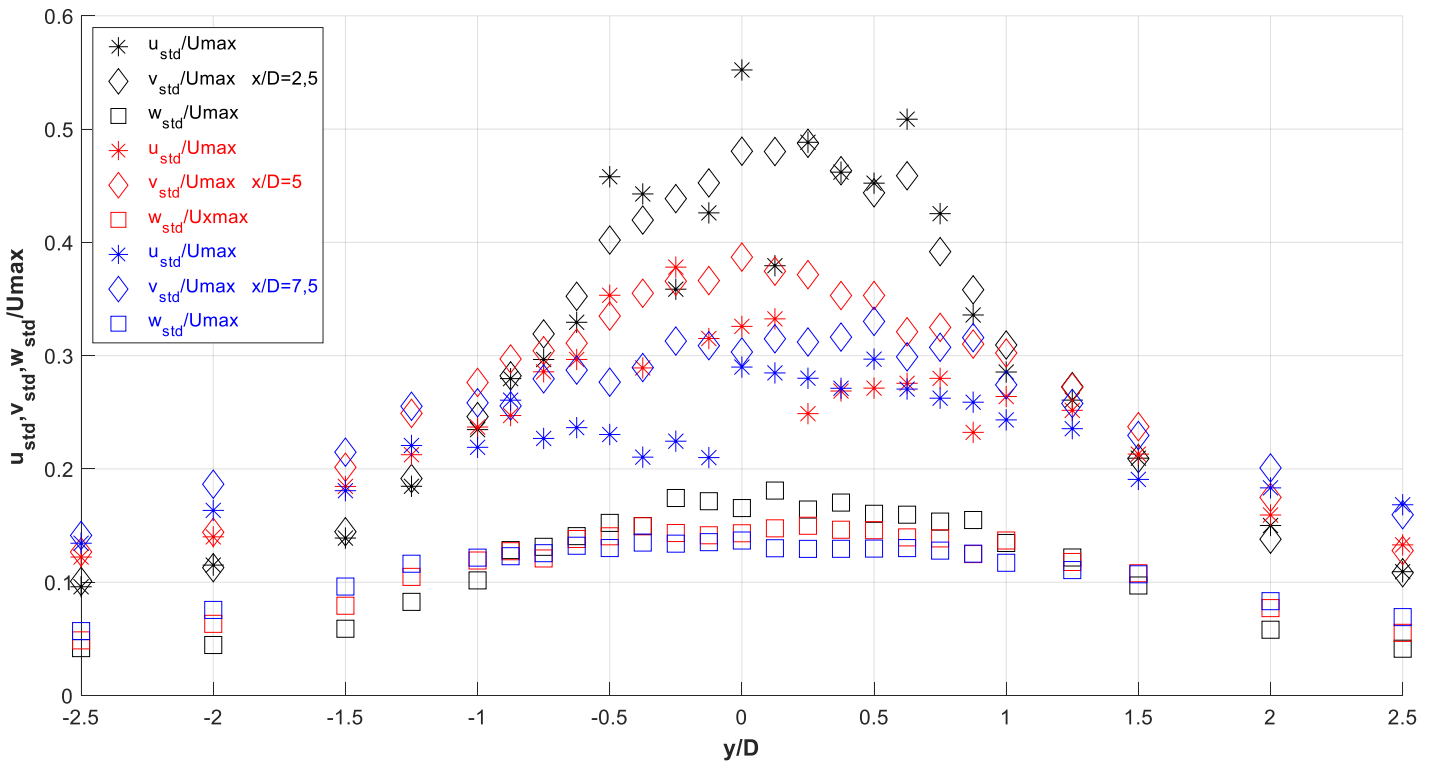
**Σχήμα 4.161** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση -30cm



**Σχήμα 4.162** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης κατόντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 10 ( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm ( $x/D=7.5$ )

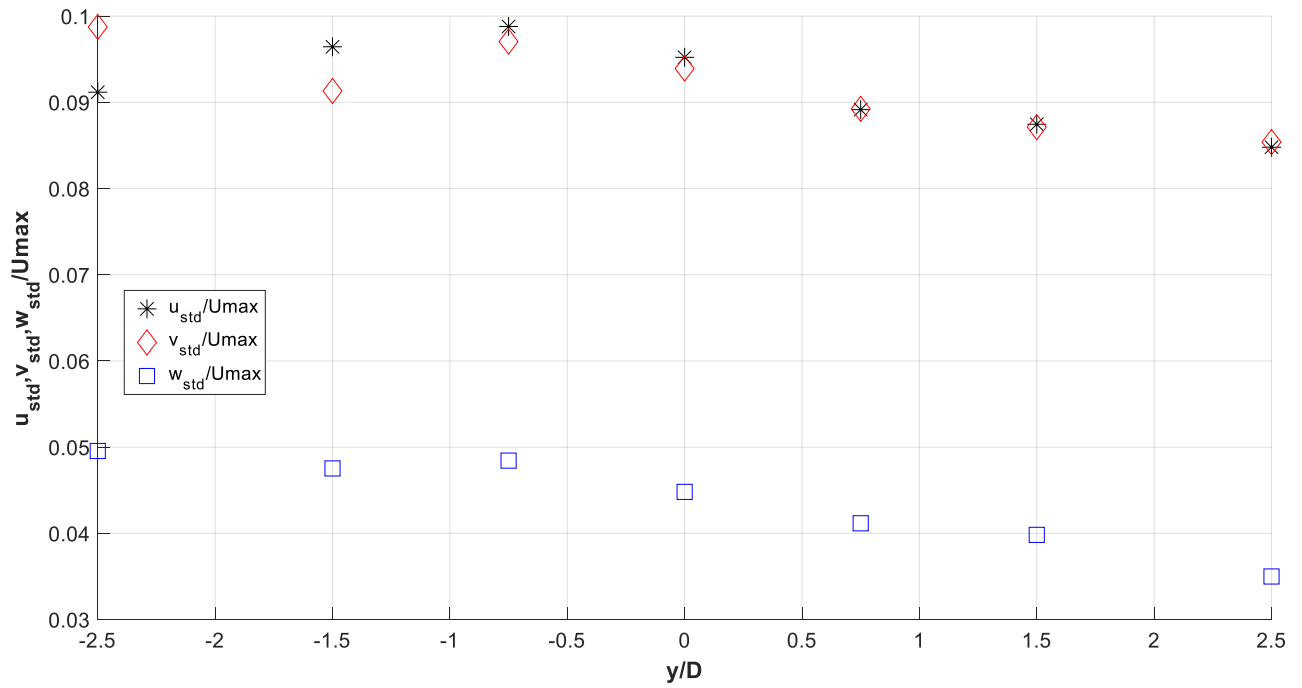


**Σχήμα 4.163** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση -30cm σε ύψος 4,5cm

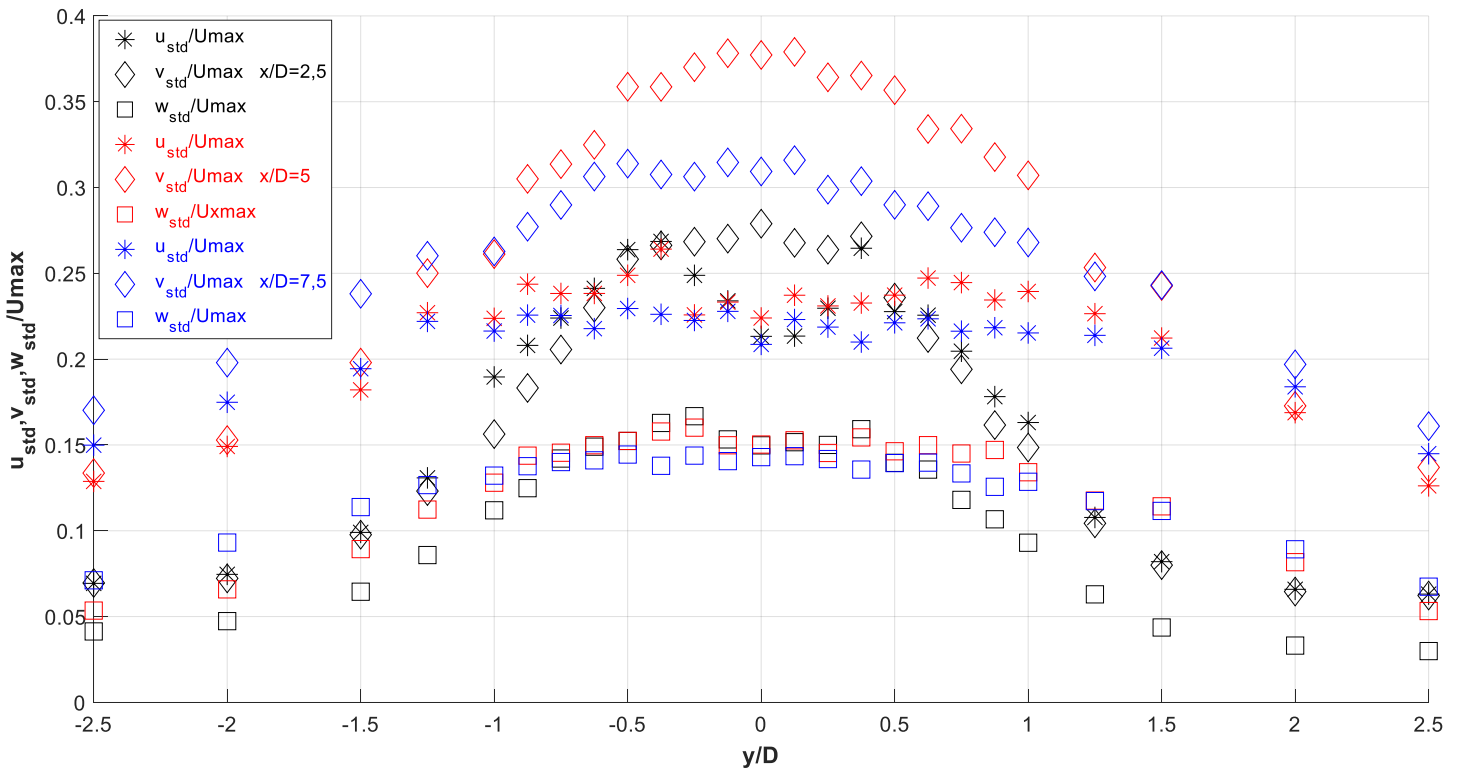


**Σχήμα 4.164** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 4,5cm

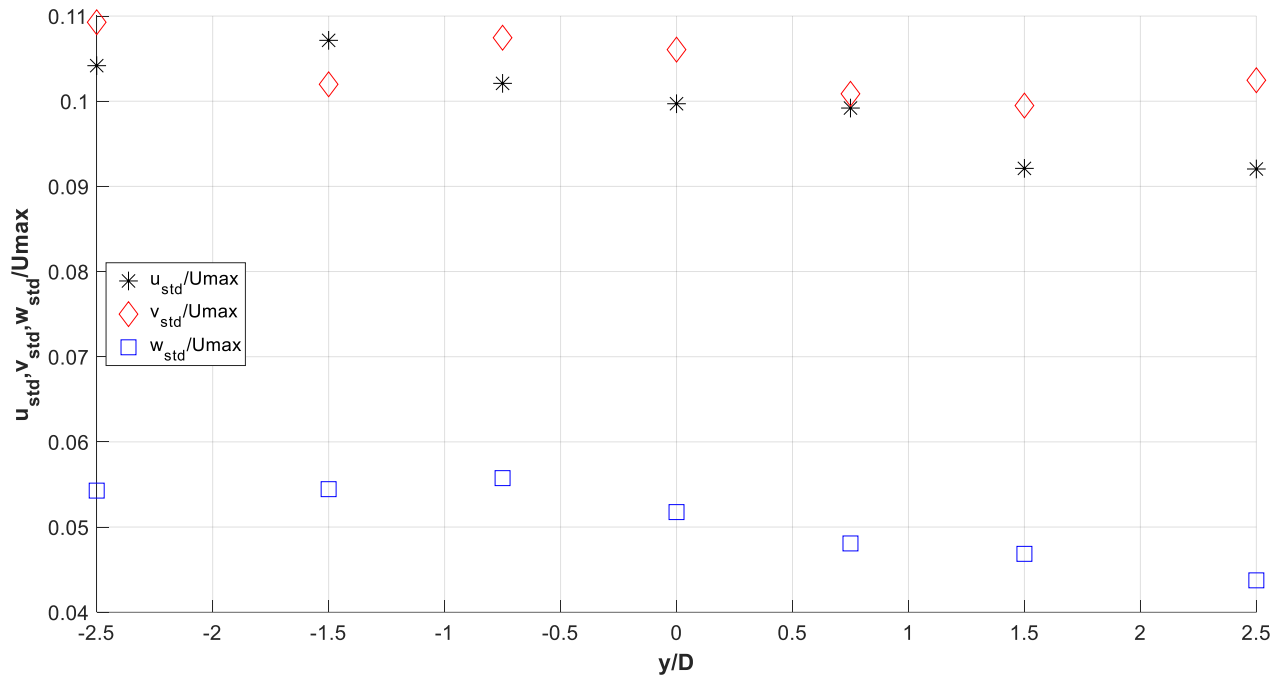




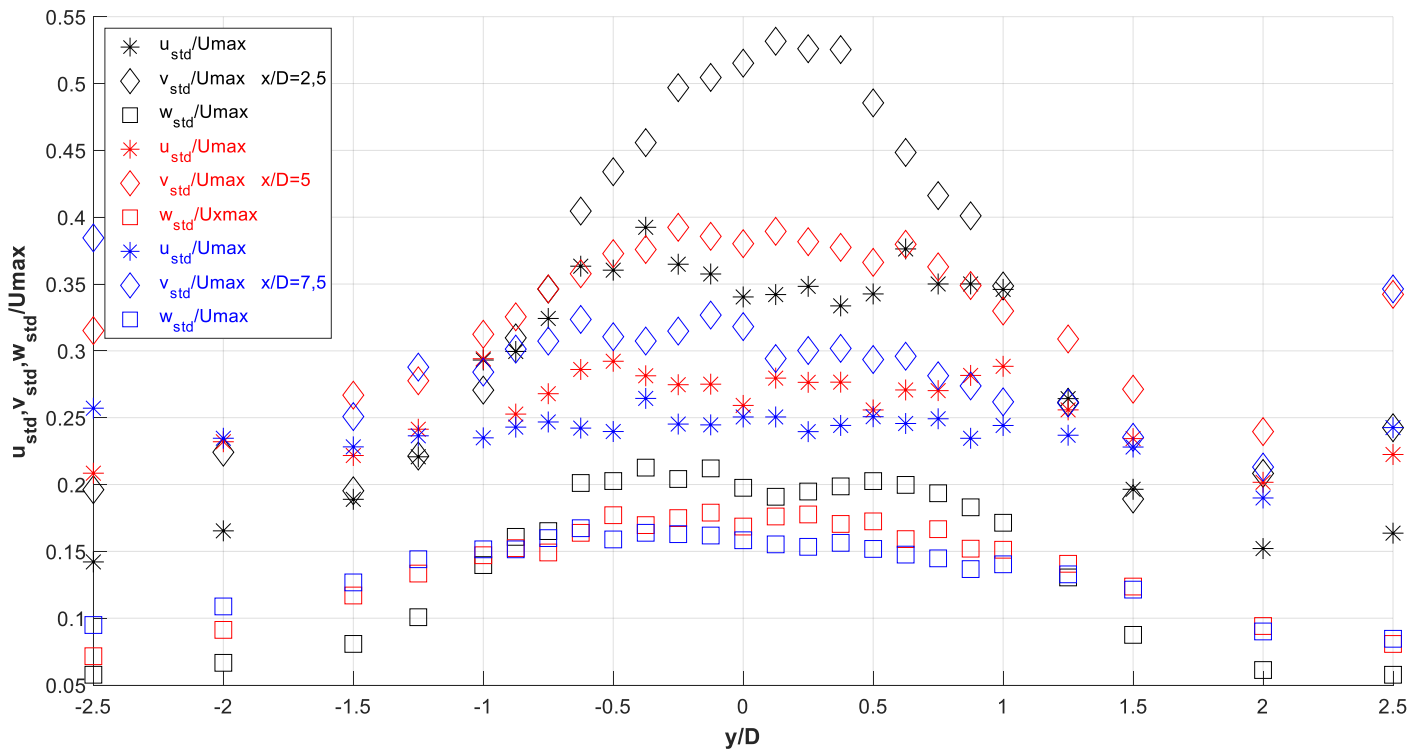
**Σχήμα 4.165** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση -30cm σε ύψος 9cm



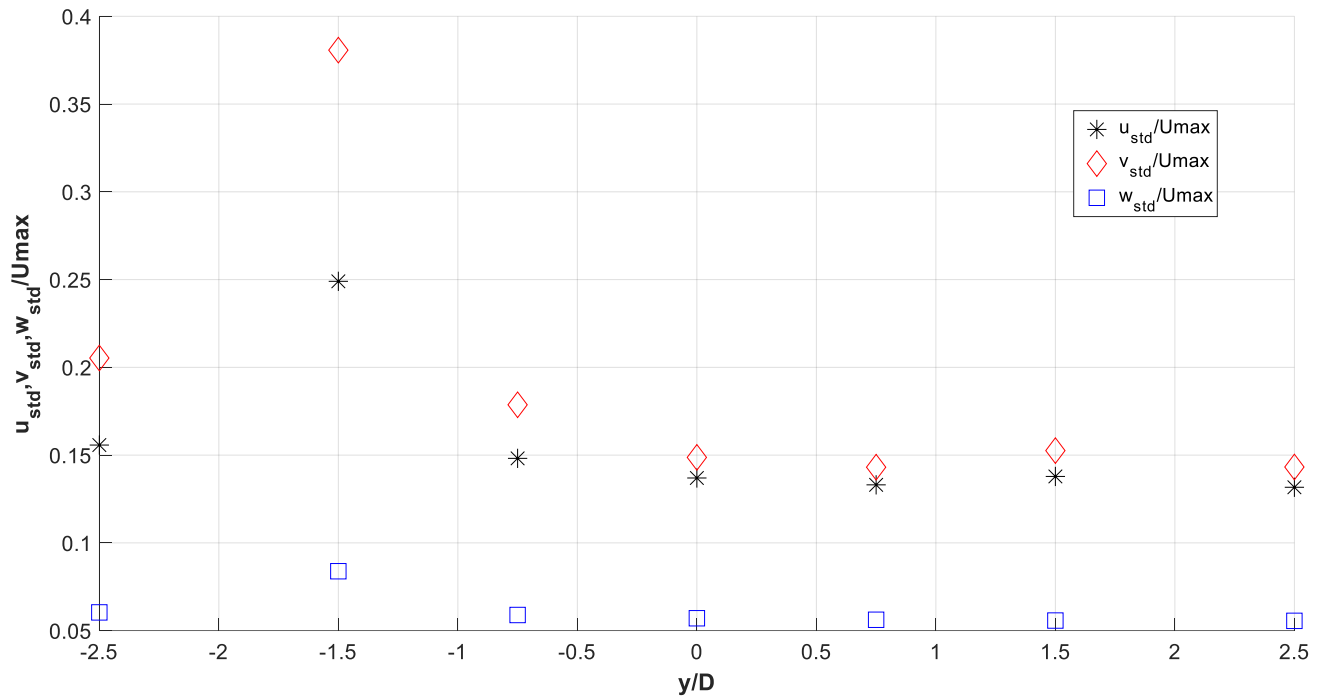
**Σχήμα 4.166** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 9cm



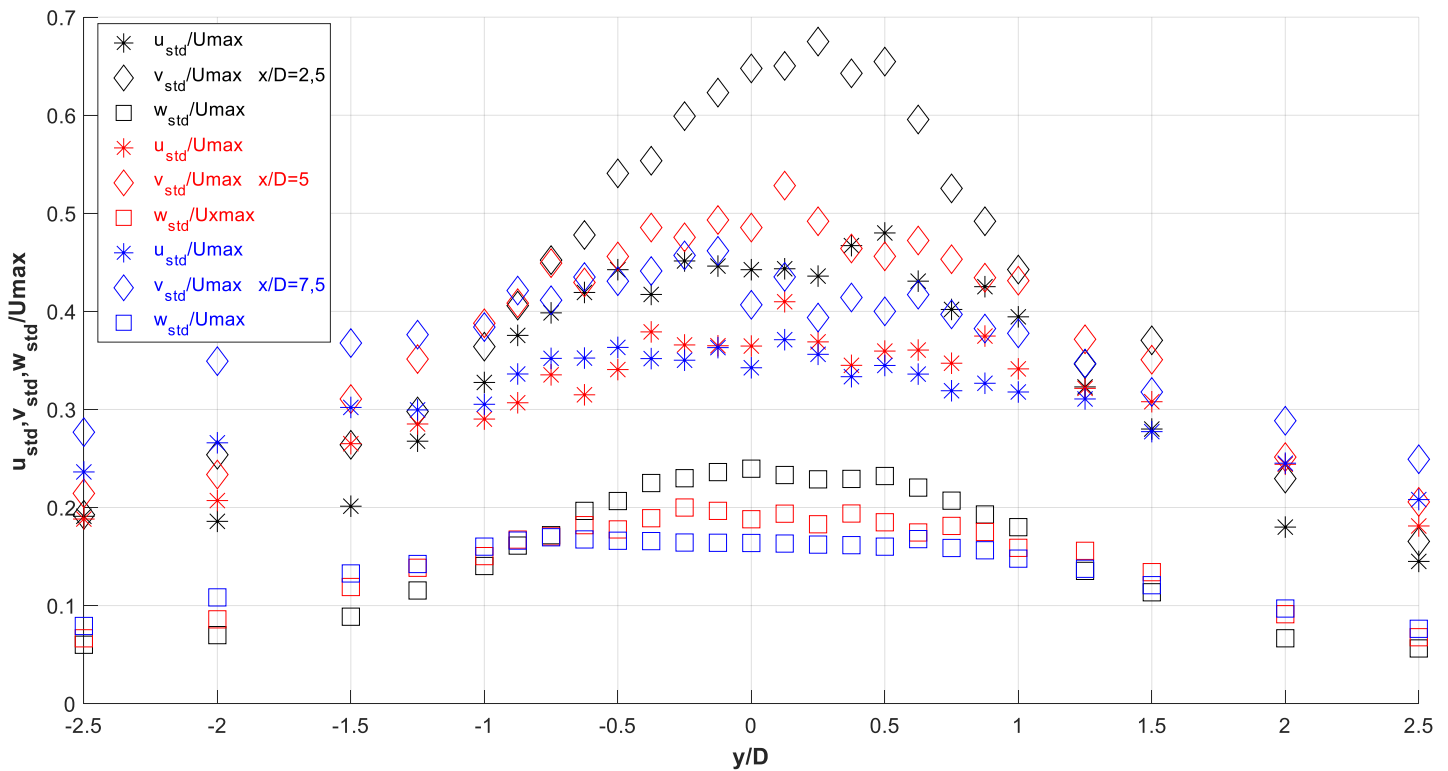
**Σχήμα 4.167** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση -30cm σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.168** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 13.5cm

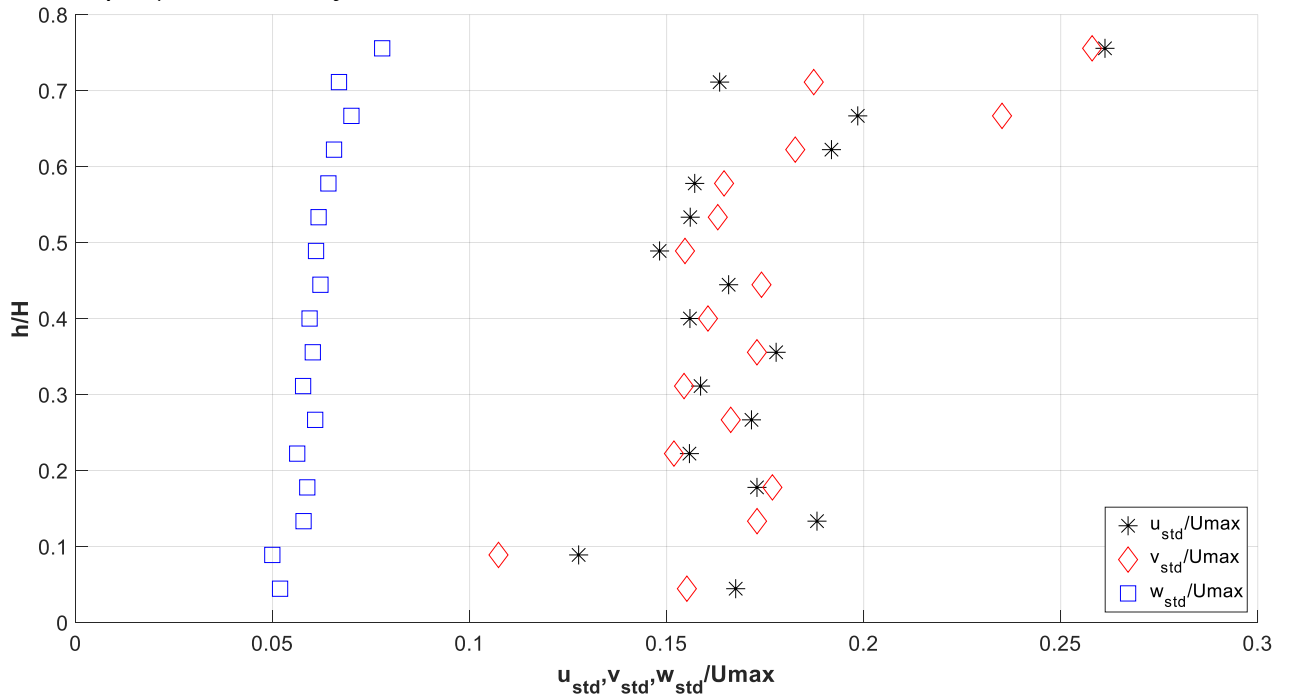


**Σχήμα 4.169** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση -30cm σε ύψος 17.1cm

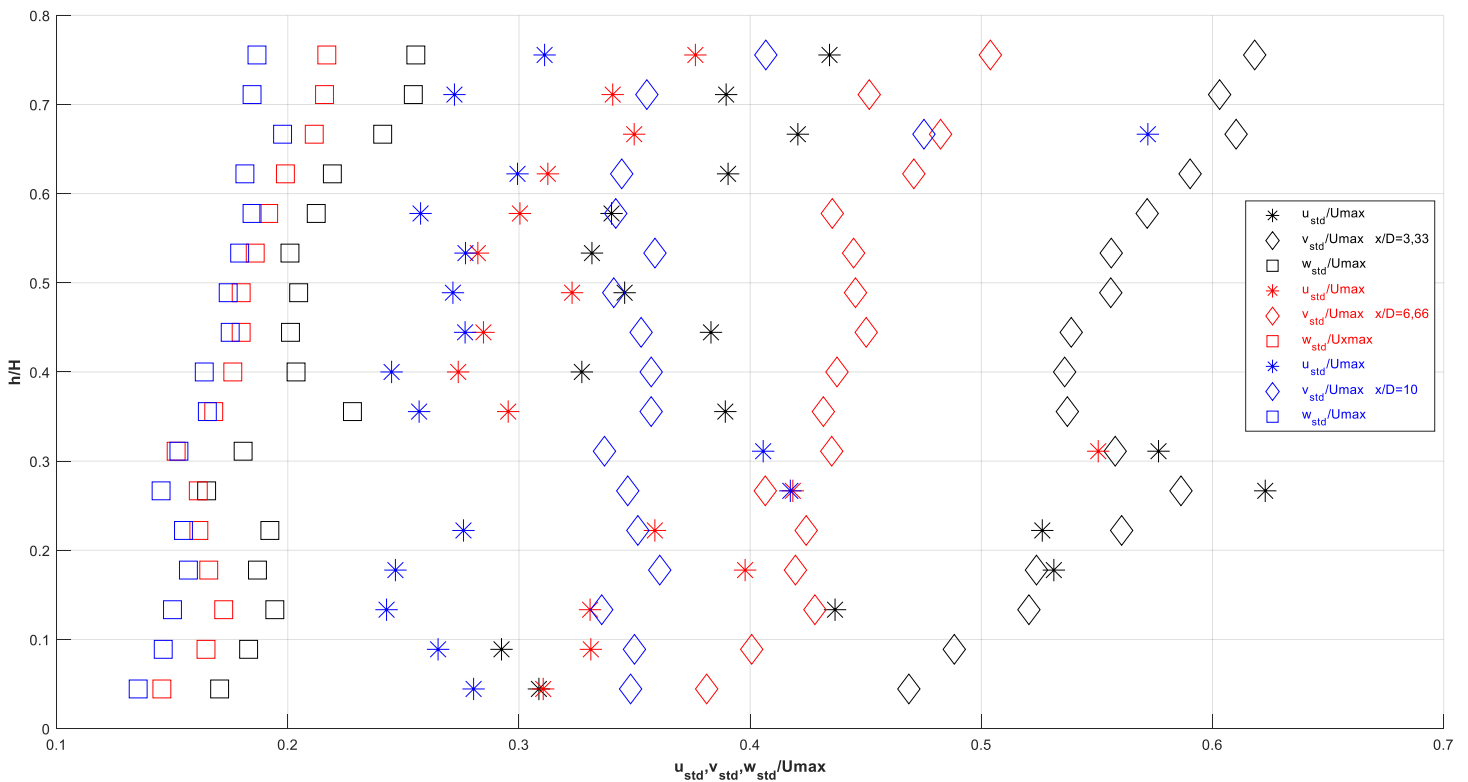


**Σχήμα 4.170** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 4X10 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 17.1cm

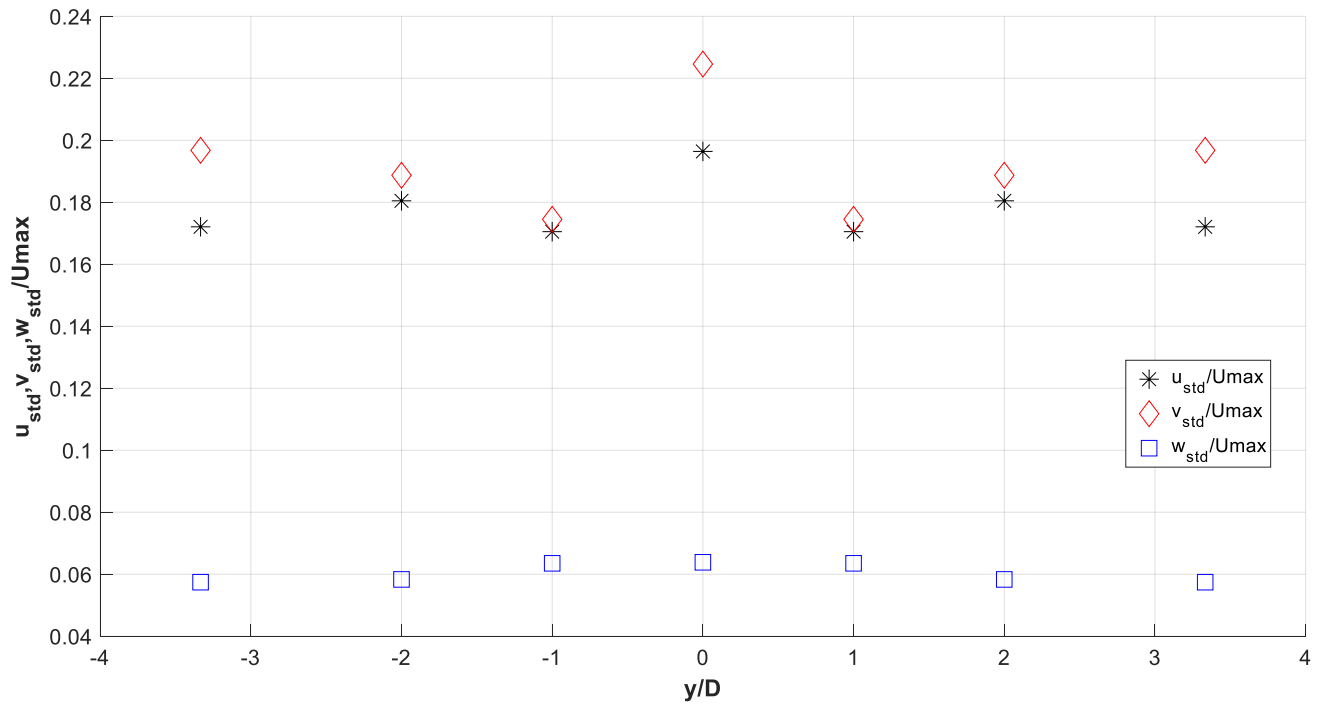
4.3.4 Ορθογώνιο πλάτους  $D=3\text{cm}$  και  $L=6\text{cm}$  ( $L/D=2$ )



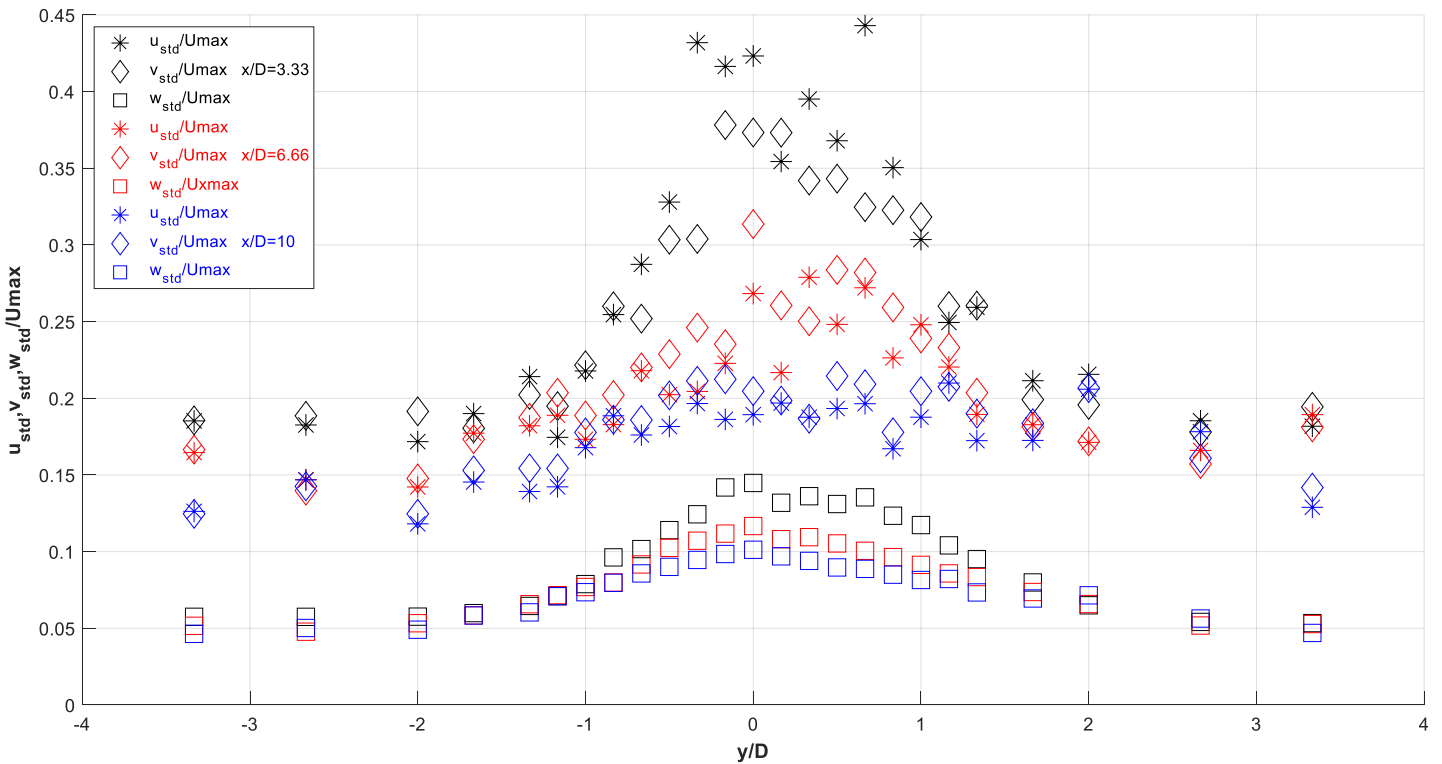
**Σχήμα 4.171** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση -30cm



**Σχήμα 4.172** Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 10( $x/D=2.5$ ), 20 ( $x/D=5$ ) και 30cm( $x/D=7.5$ )

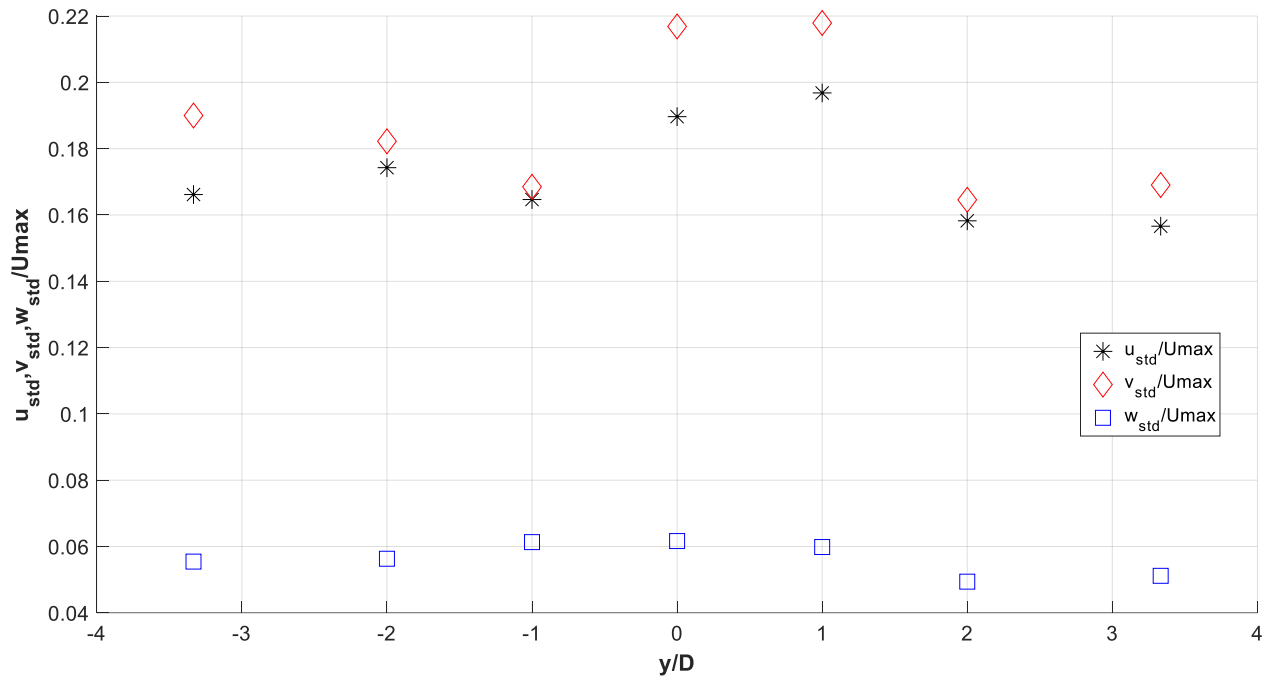


**Σχήμα 4.173** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση -30cm σε ύψος 4.5cm

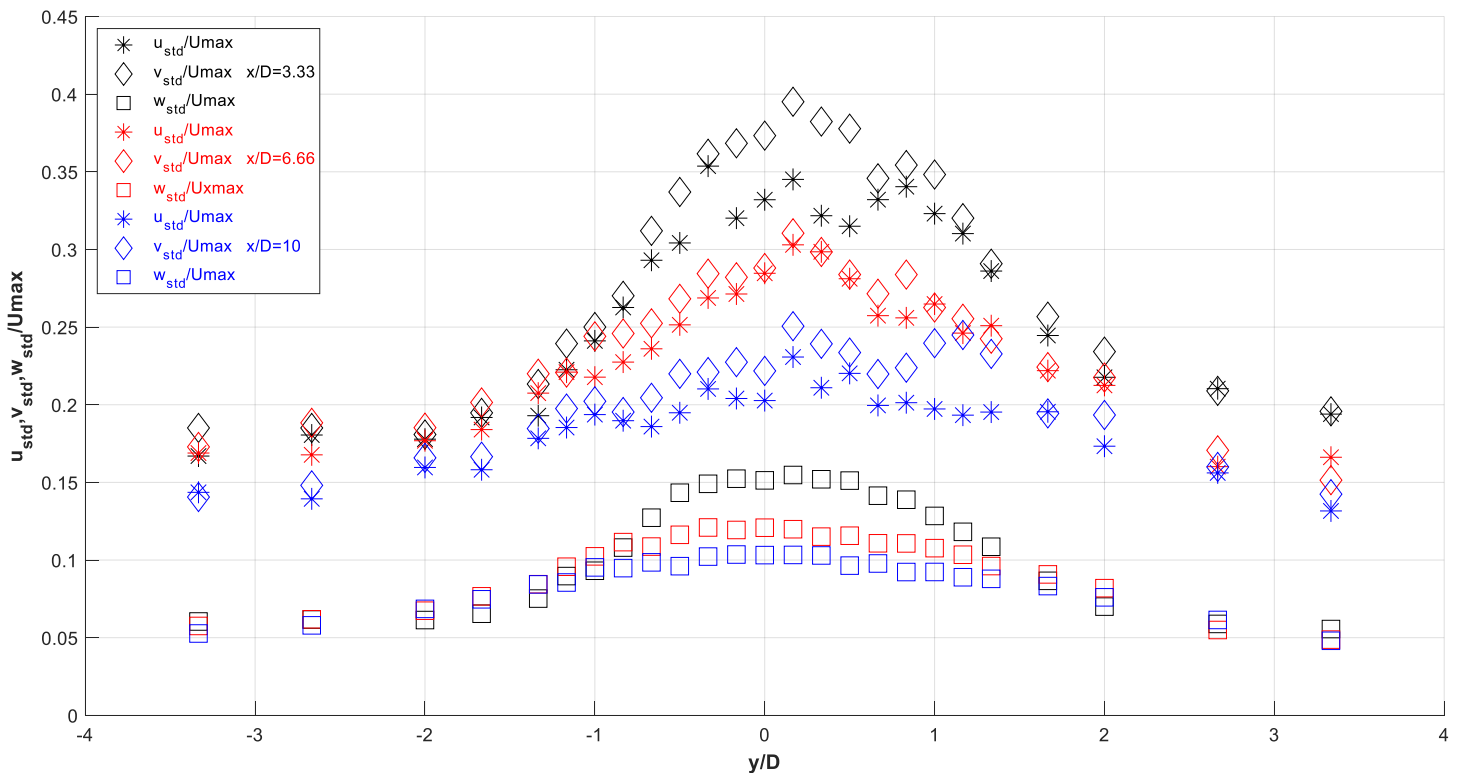


**Σχήμα 4.174** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής σε απόσταση 10( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) σε ύψος 4.5cm

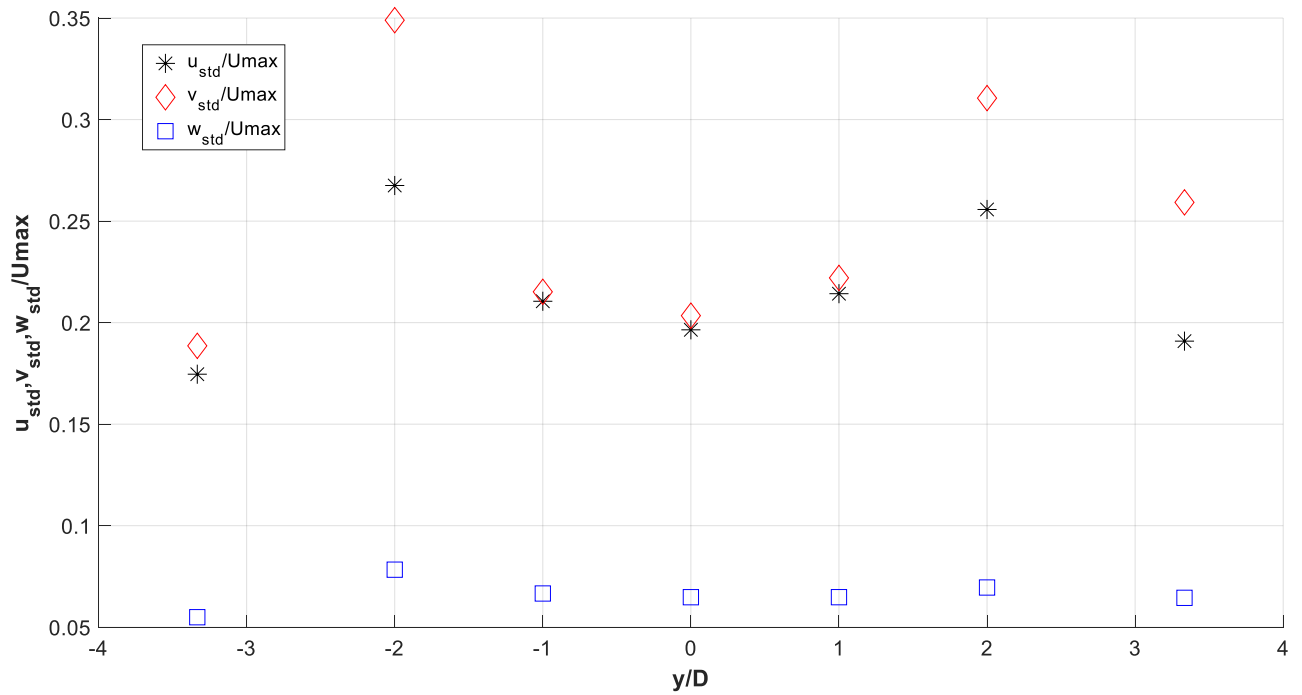
4.Ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων



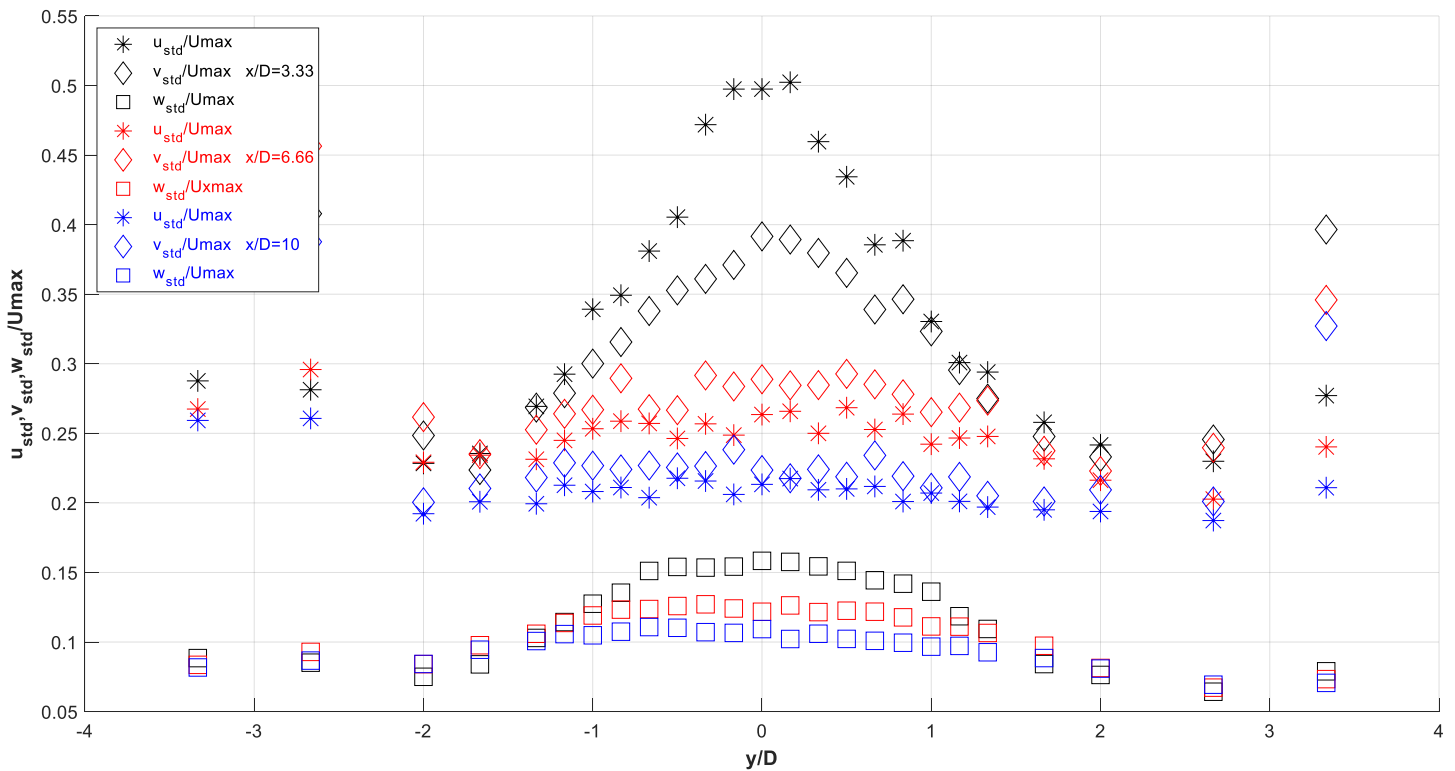
**Σχήμα 4.175** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση -30cm σε ύψος 9cm



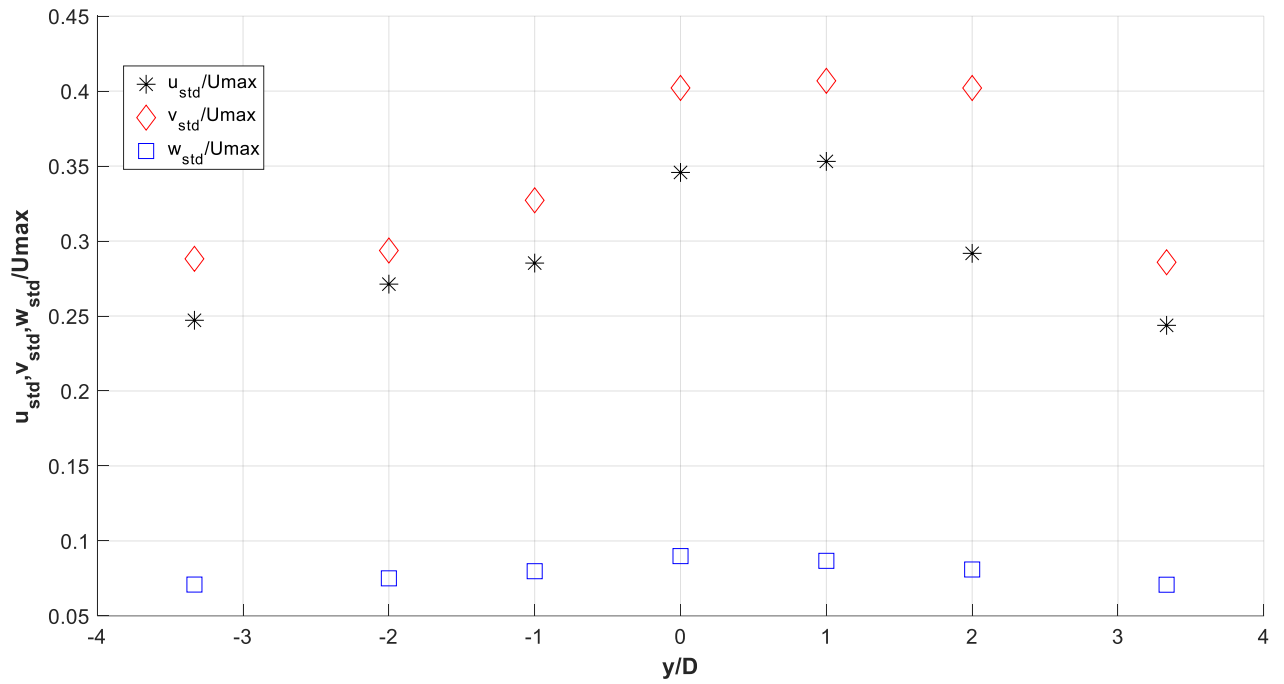
**Σχήμα 4.176** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 10(x/D=3.33), 20 (x/D=6.66) και 30cm(x/D=10) σε ύψος 9cm



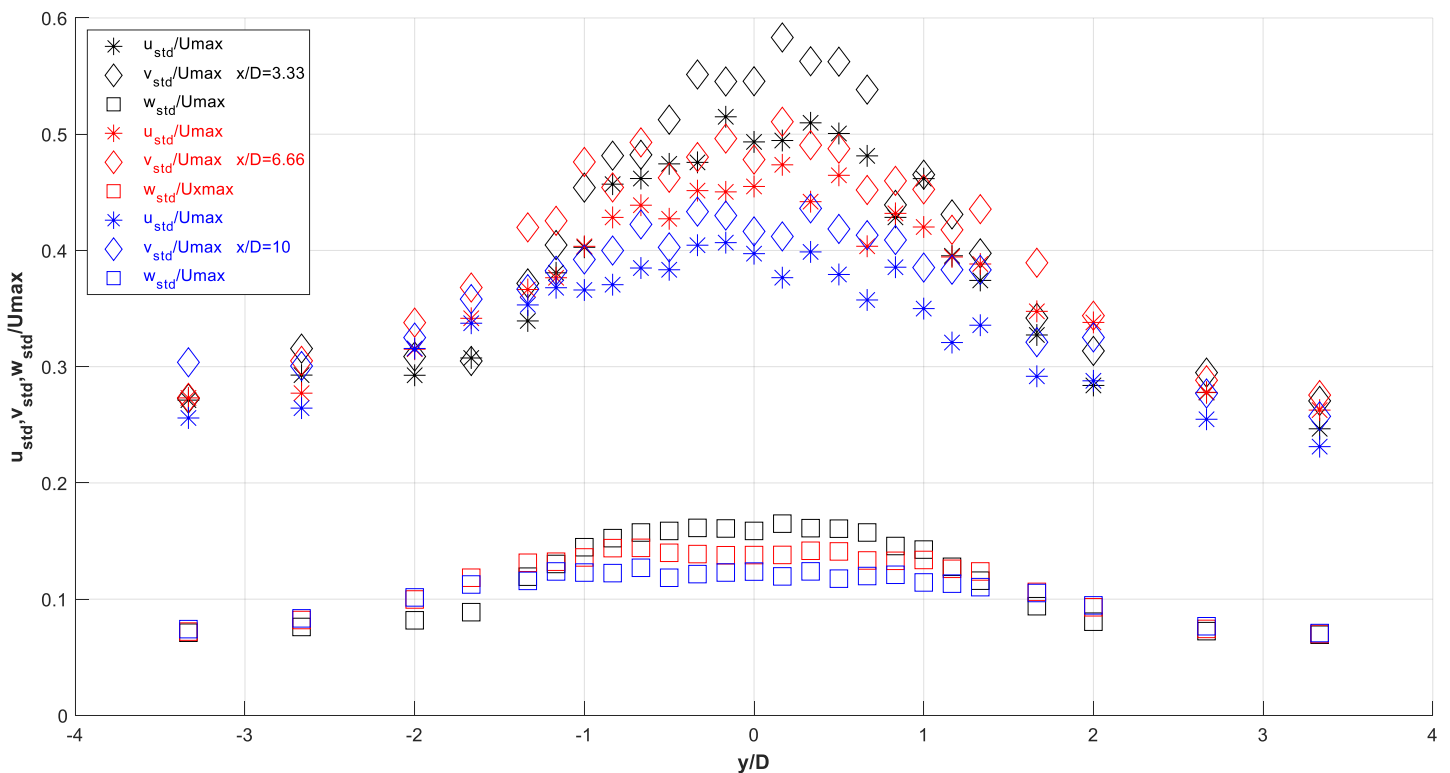
**Σχήμα 4.177** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση -30cm σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.178** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής σε απόσταση 10( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) σε ύψος 13.5cm



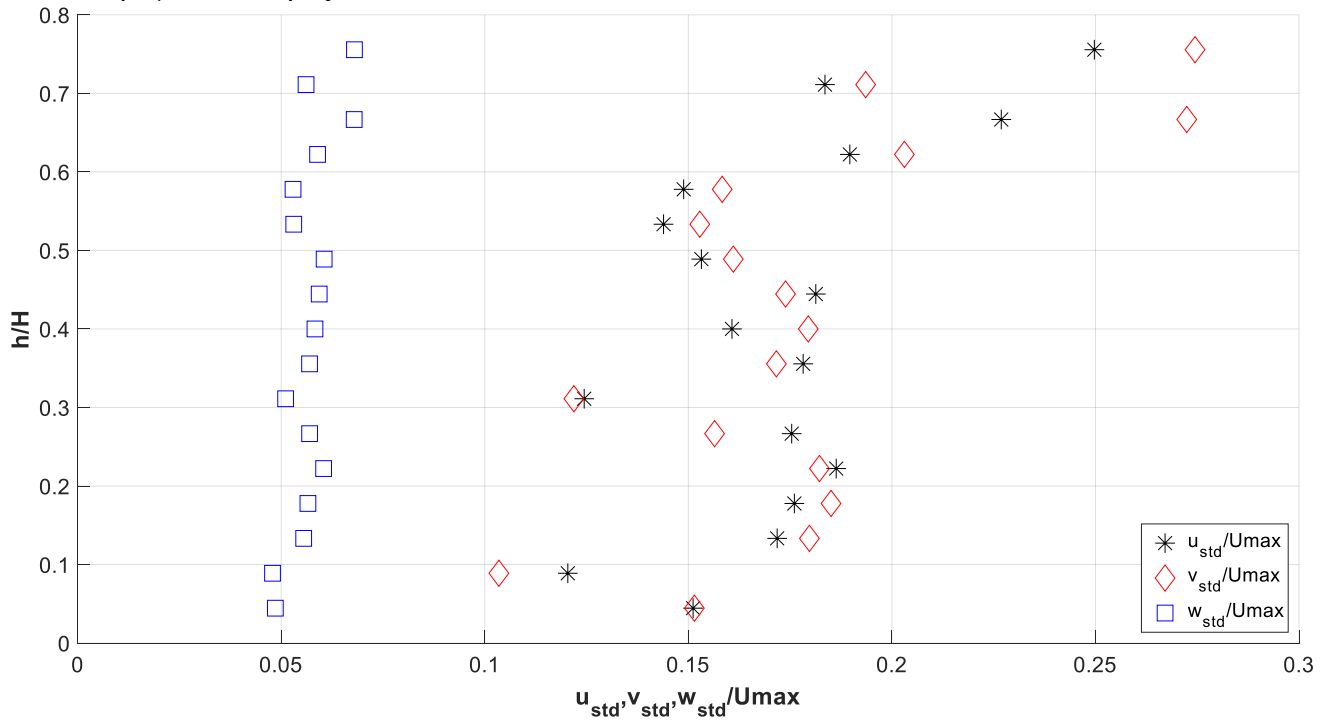
**Σχήμα 4.179** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση -30cm σε ύψος 17.1cm



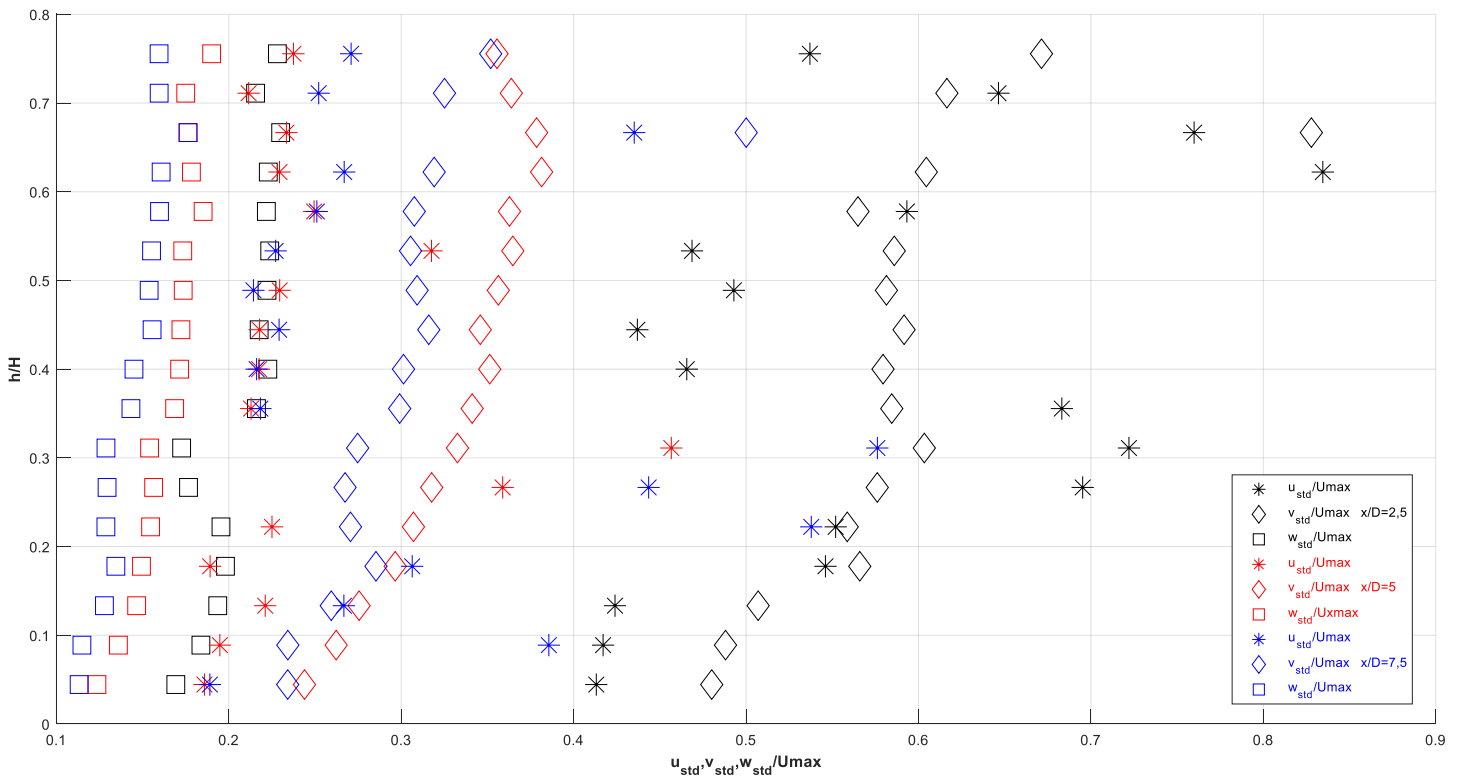
**Σχήμα 4.180** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη ορθογωνικής διατομής 3X6 σε απόσταση 10( $x/D=3.33$ ), 20 ( $x/D=6.66$ ) και 30cm( $x/D=10$ ) σε ύψος 17.1cm



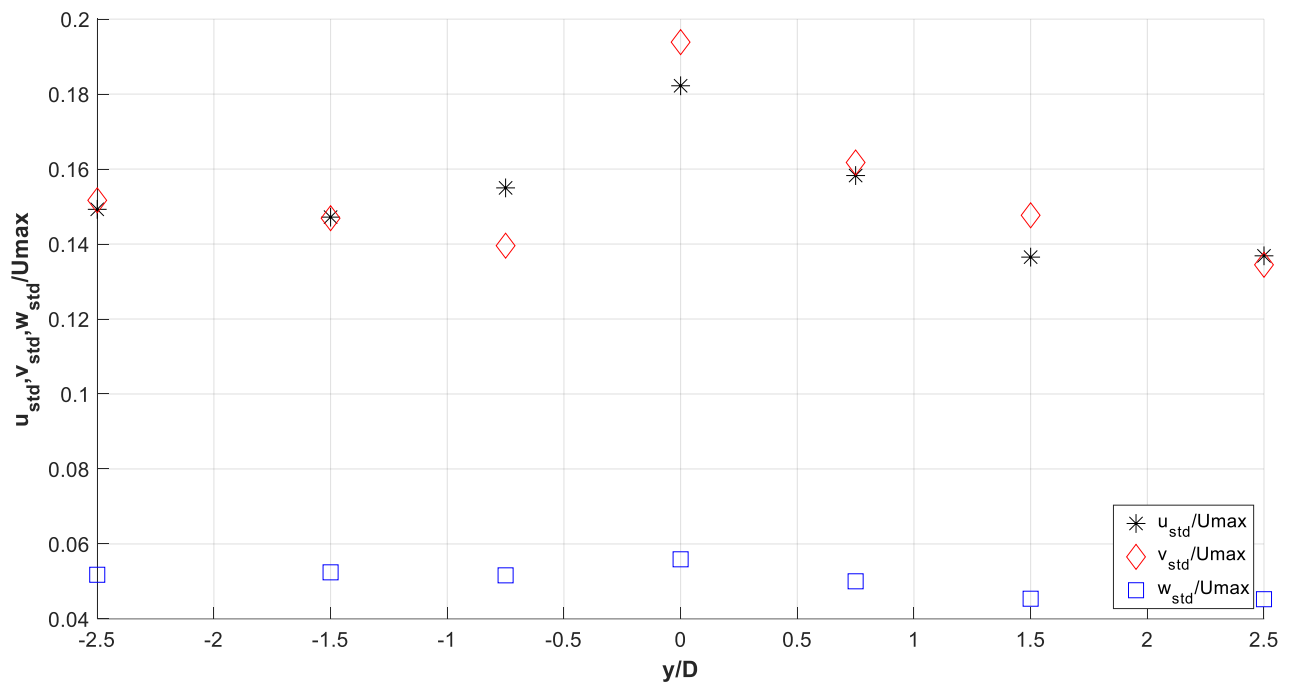
4.3.4 Τετράγωνο πλευράς D=4cm



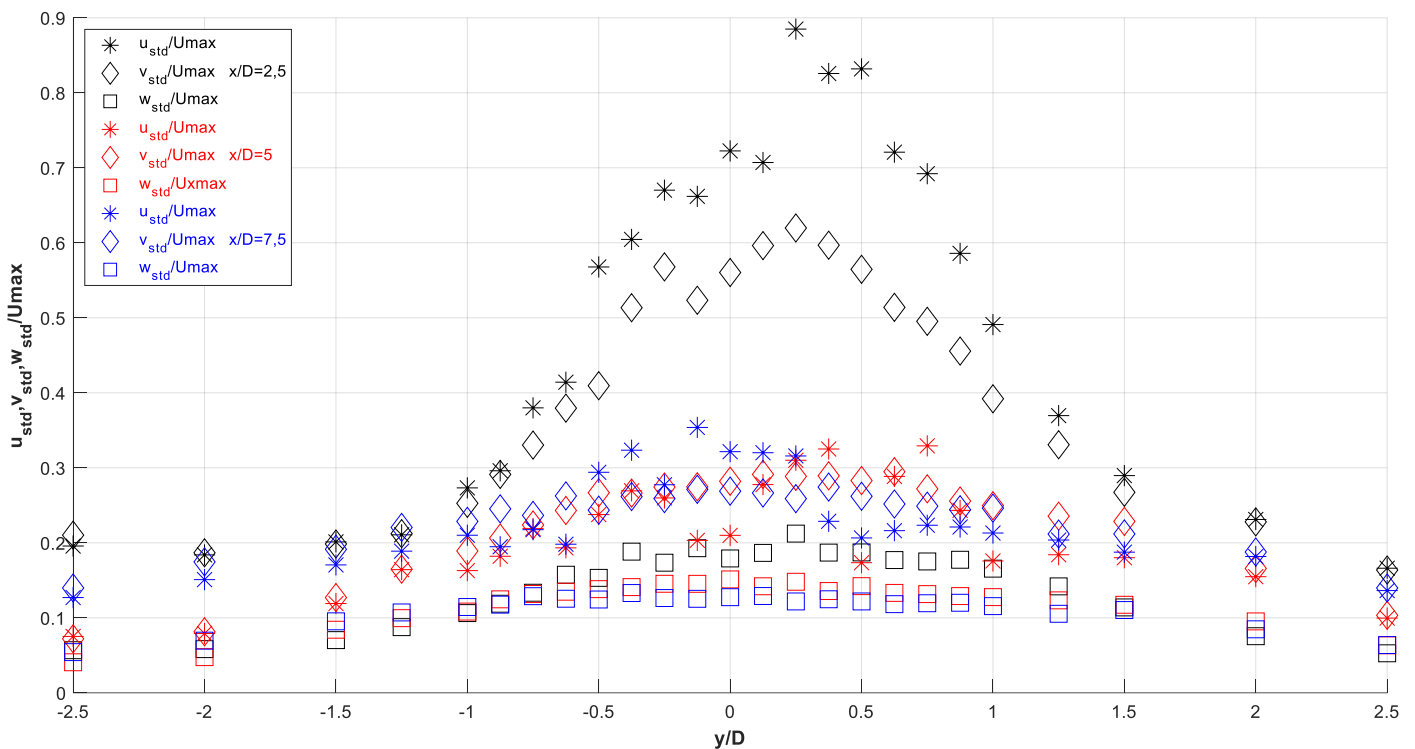
Σχήμα 4.181 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση -30cm



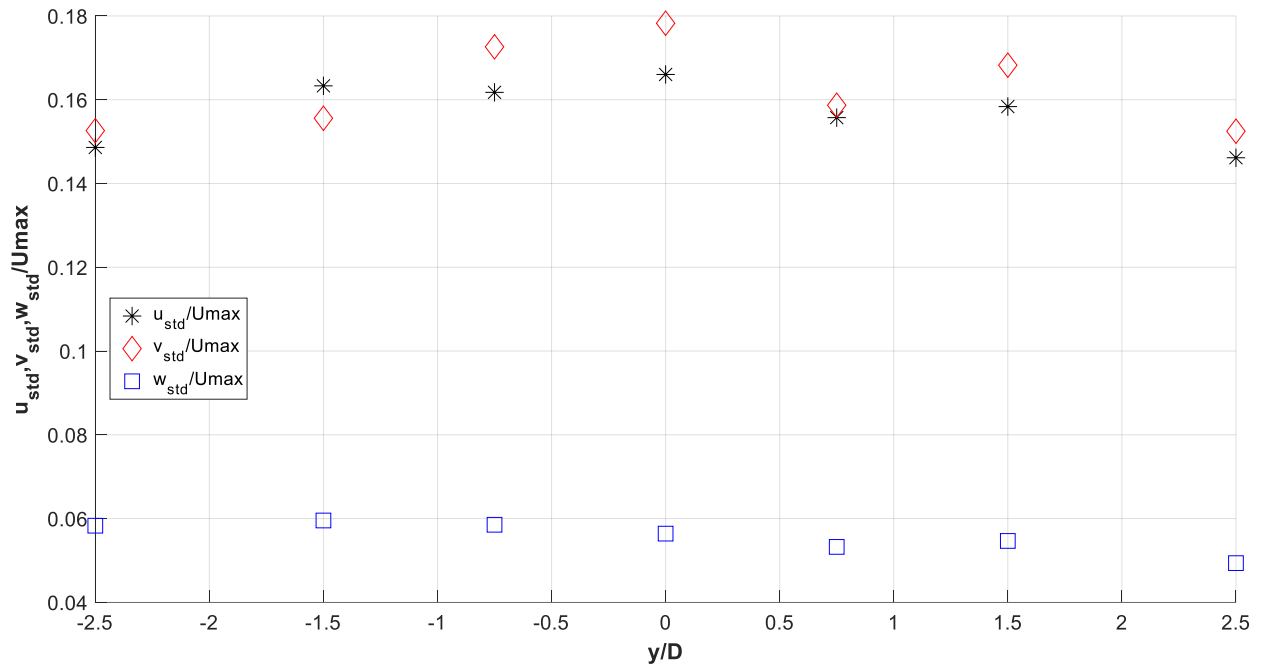
Σχήμα 4.182 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5)



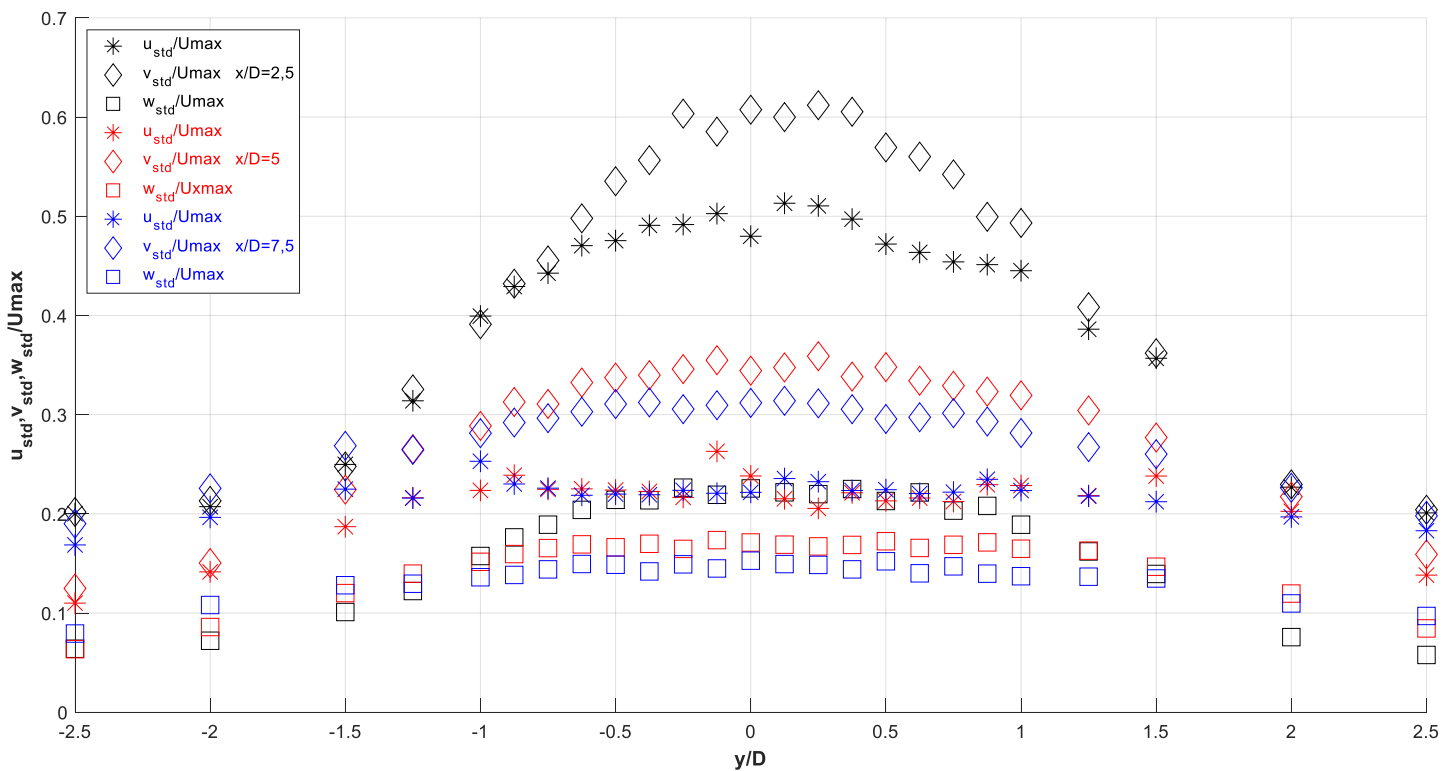
**Σχήμα 4.183** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση -30cm σε ύψος 4.5cm



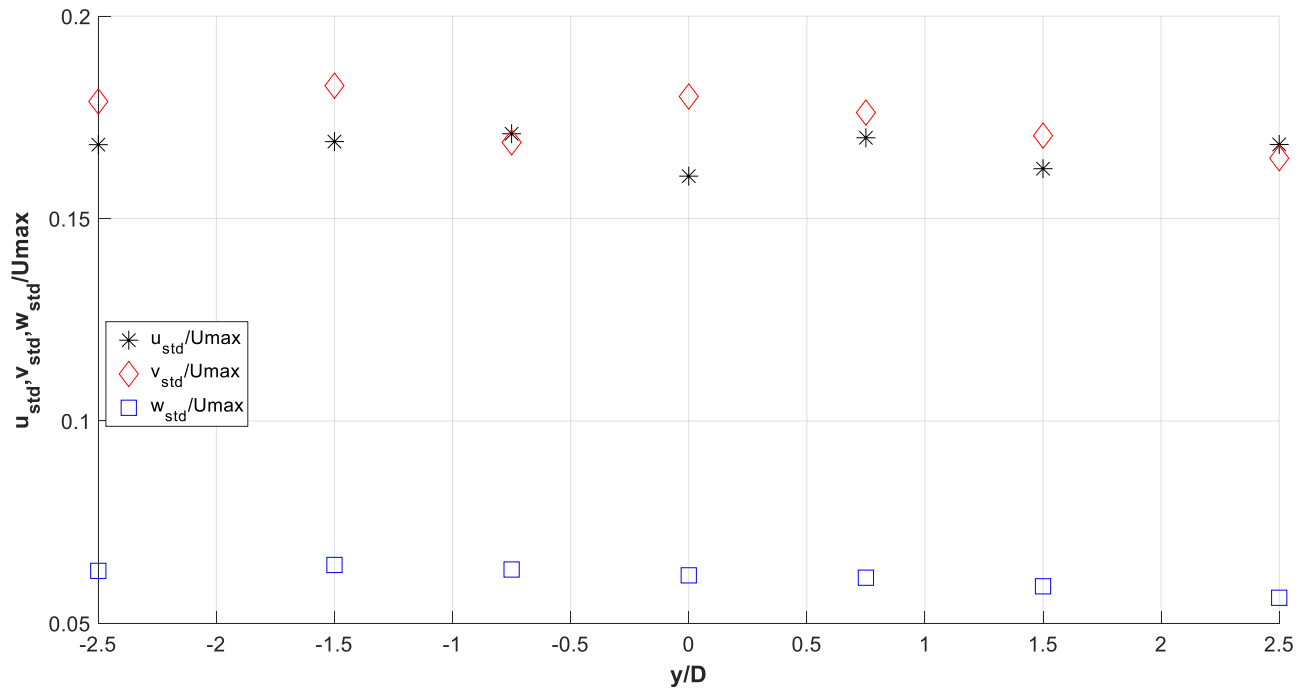
**Σχήμα 4.184** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 4.5cm



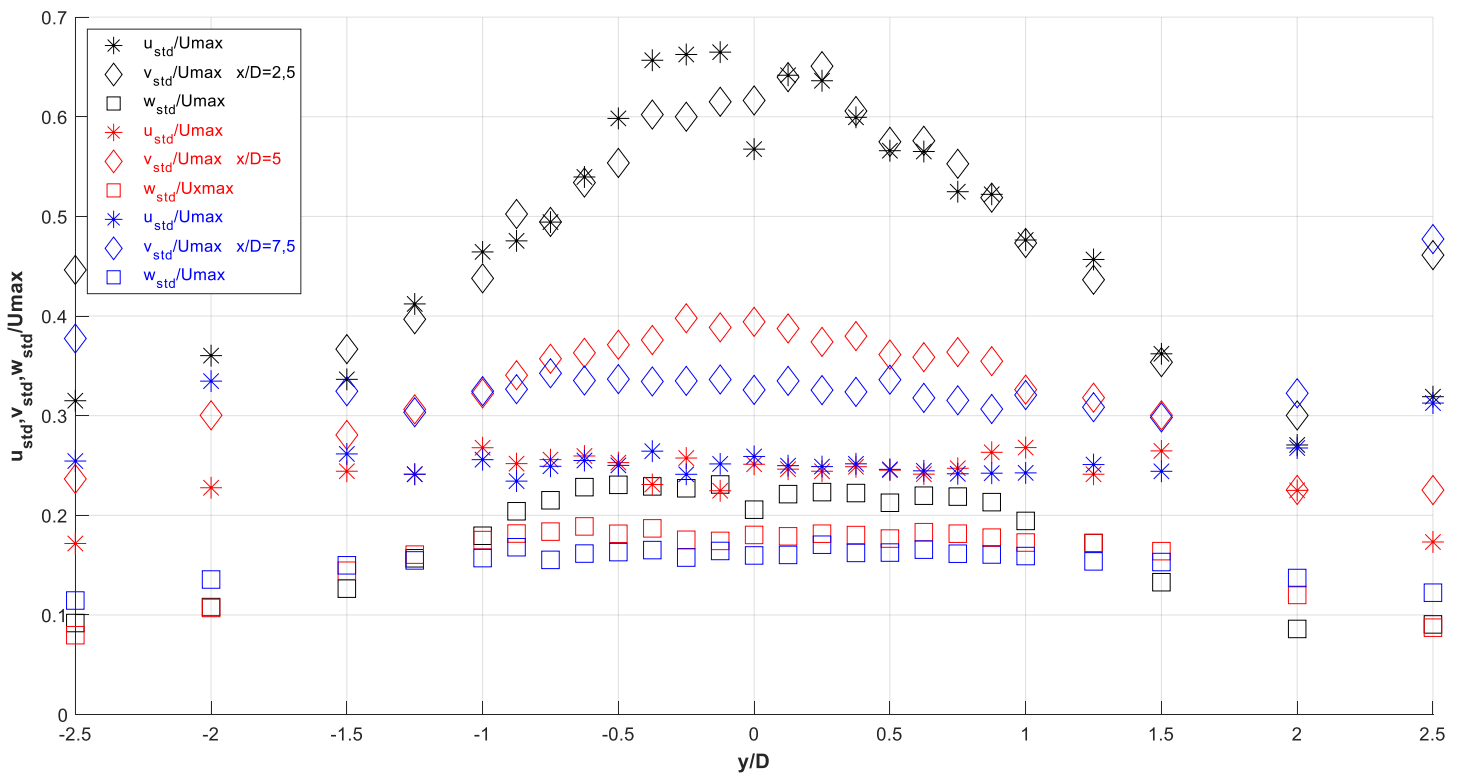
**Σχήμα 4.185** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση -30cm σε ύψος 9cm



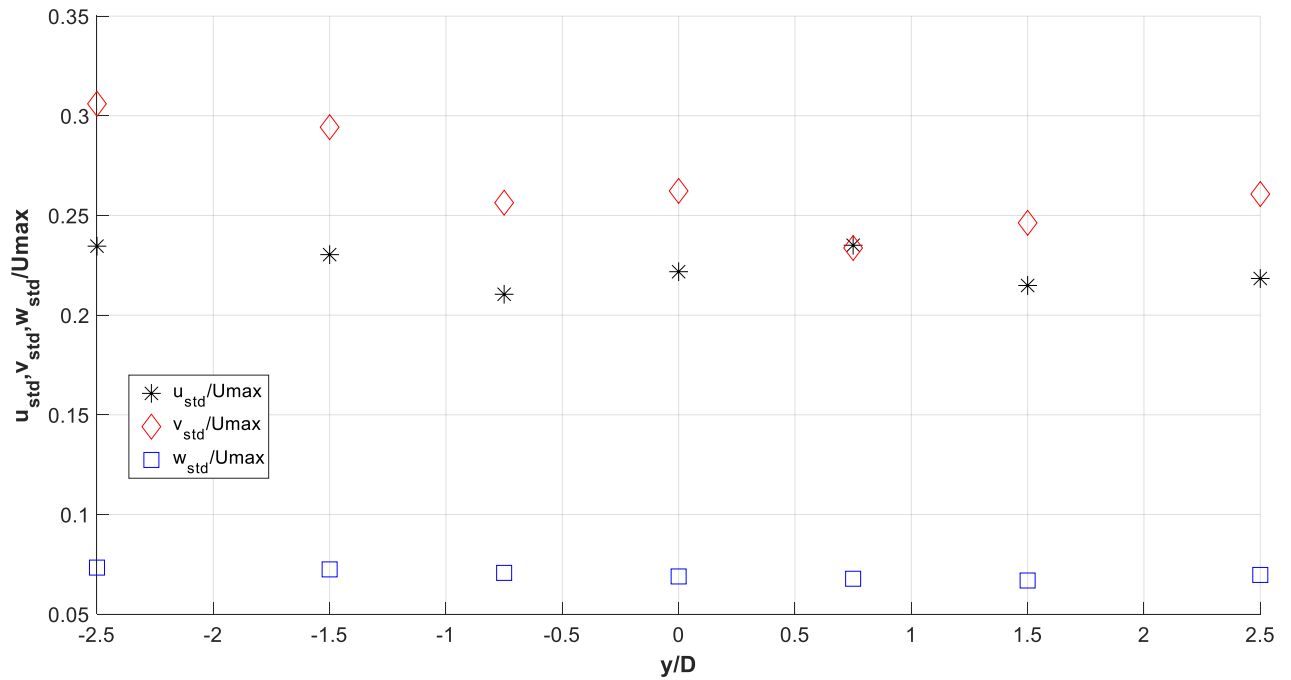
**Σχήμα 4.186** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατόντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 9cm



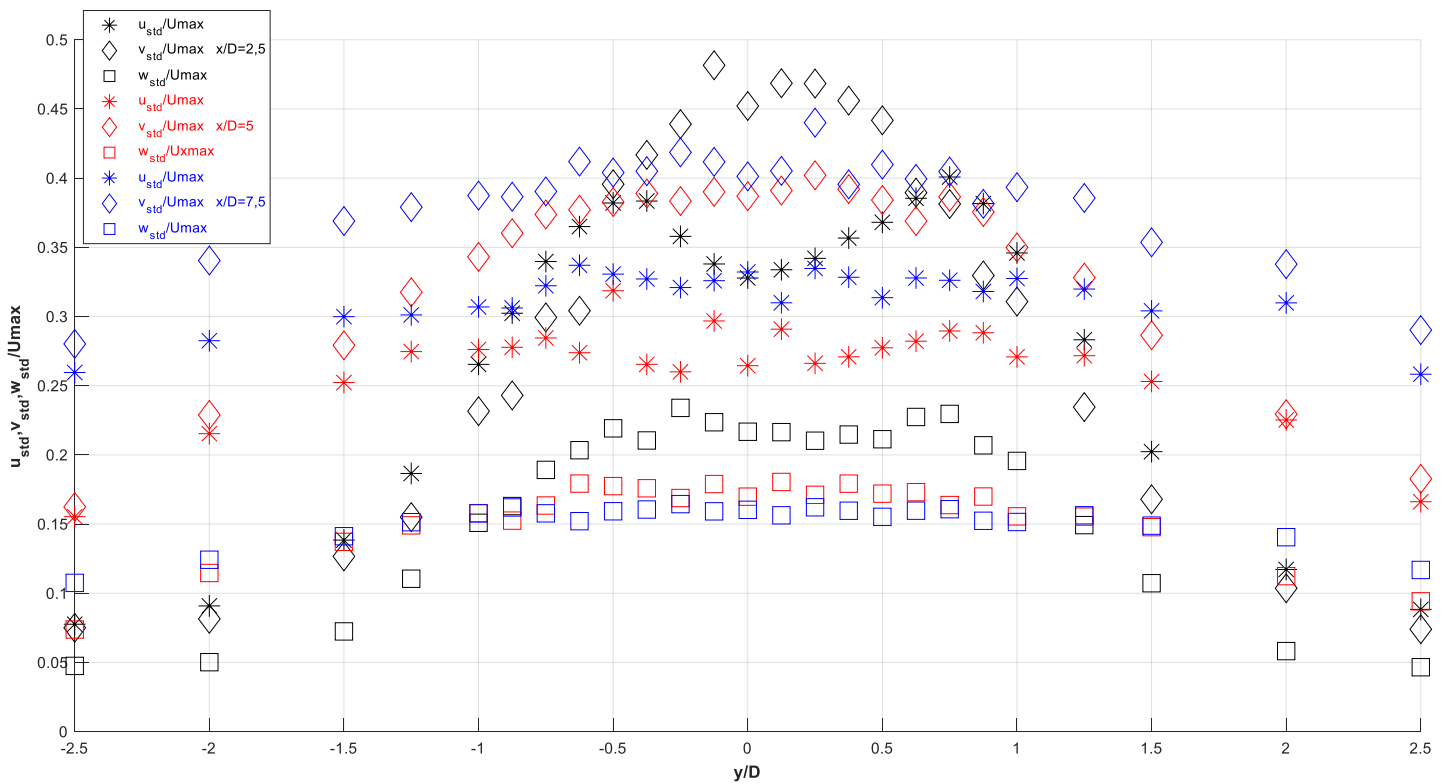
**Σχήμα 4.187** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση -30cm σε ύψος 13.5cm



**Σχήμα 4.188** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 13.5cm

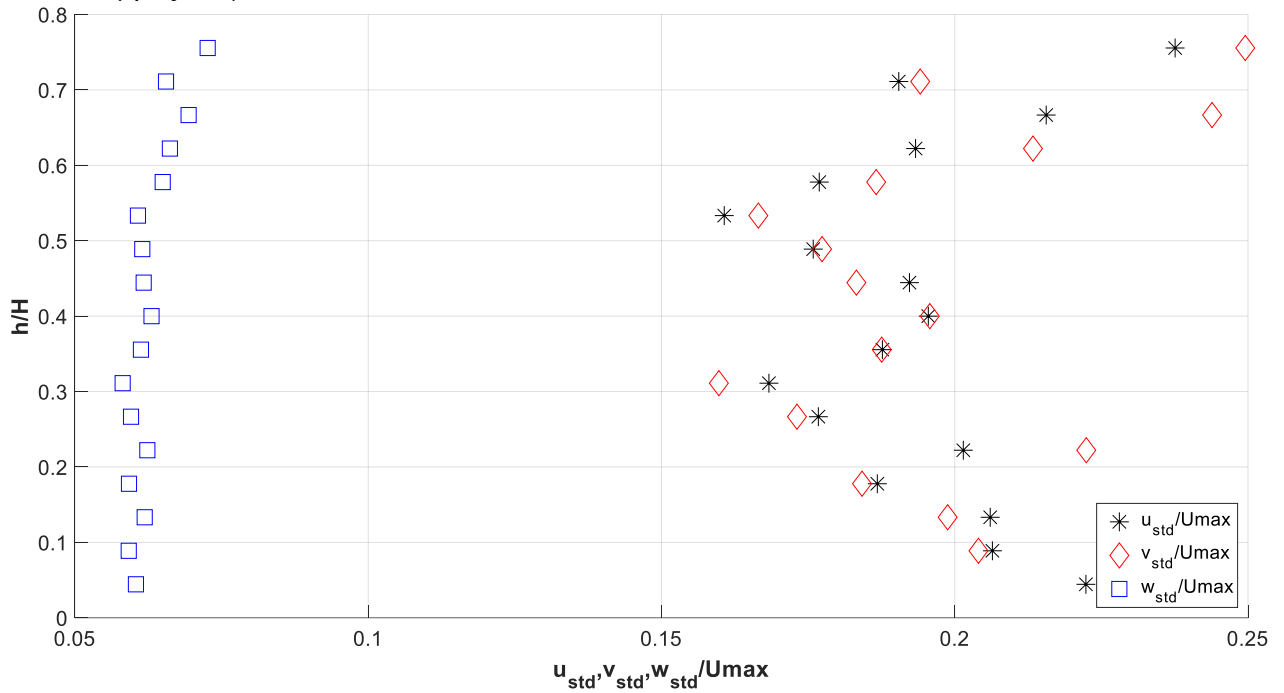


**Σχήμα 4.189** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση -30cm σε ύψος 17.1cm

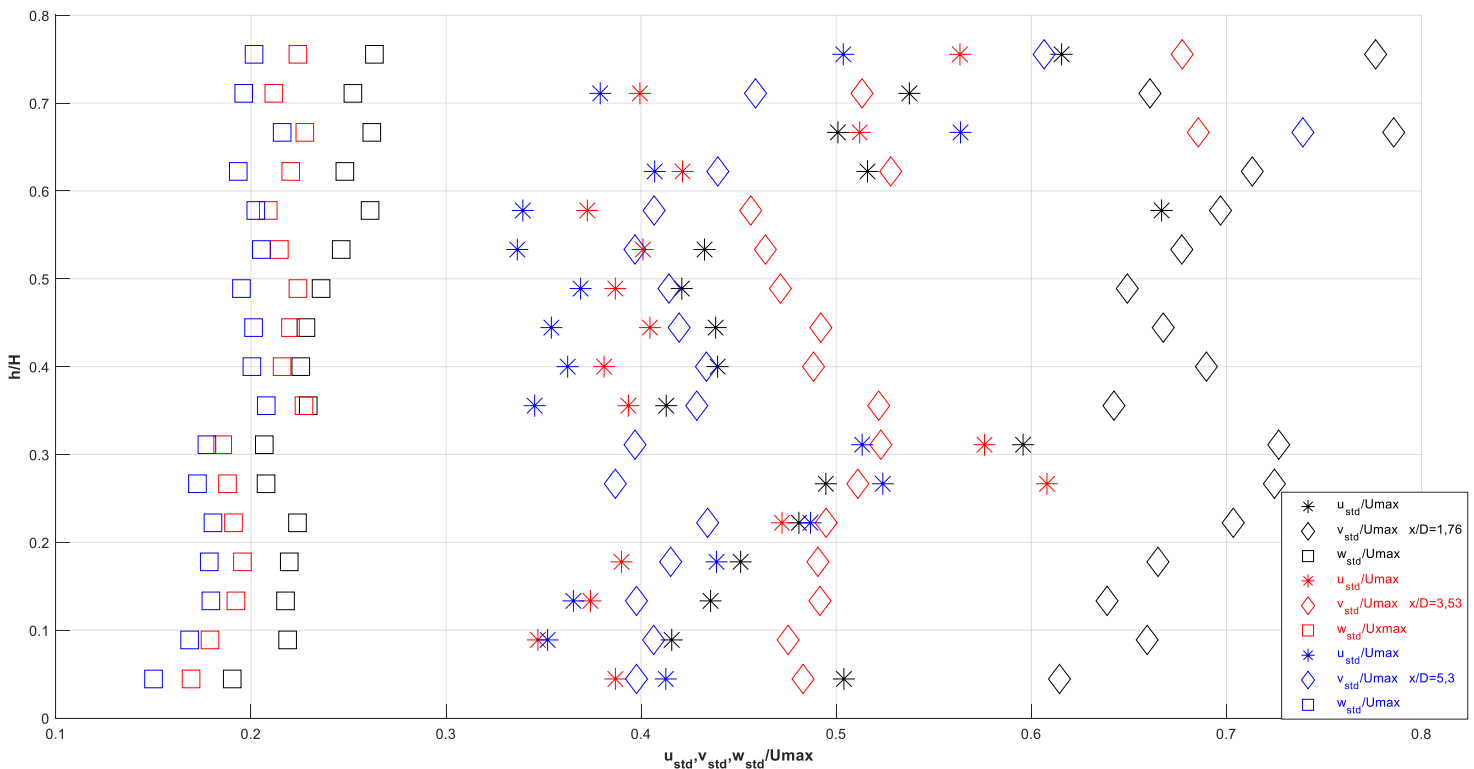


**Σχήμα 4.190** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης κατάντη τετραγωνικής διατομής 4X4 σε απόσταση 10(x/D=2.5), 20 (x/D=5) και 30cm(x/D=7.5) σε ύψος 17.1cm

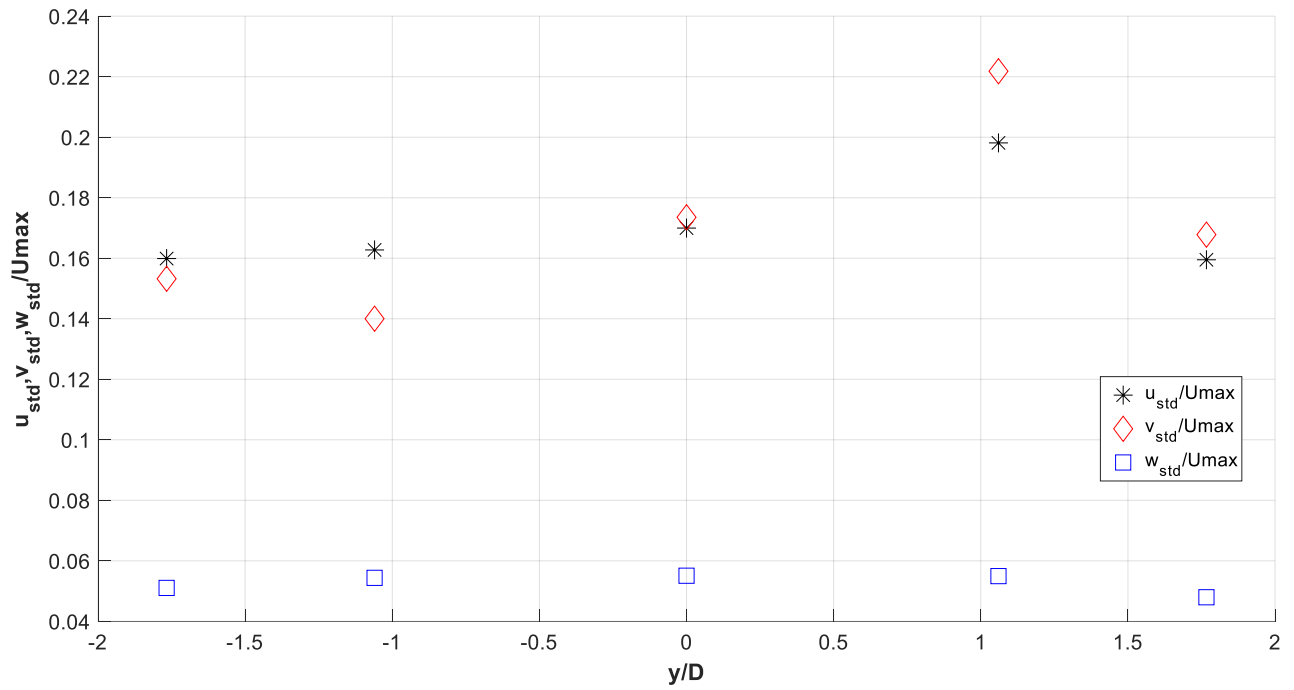
4.3.5 Ρόμβος διαγωνίου D=5.66cm



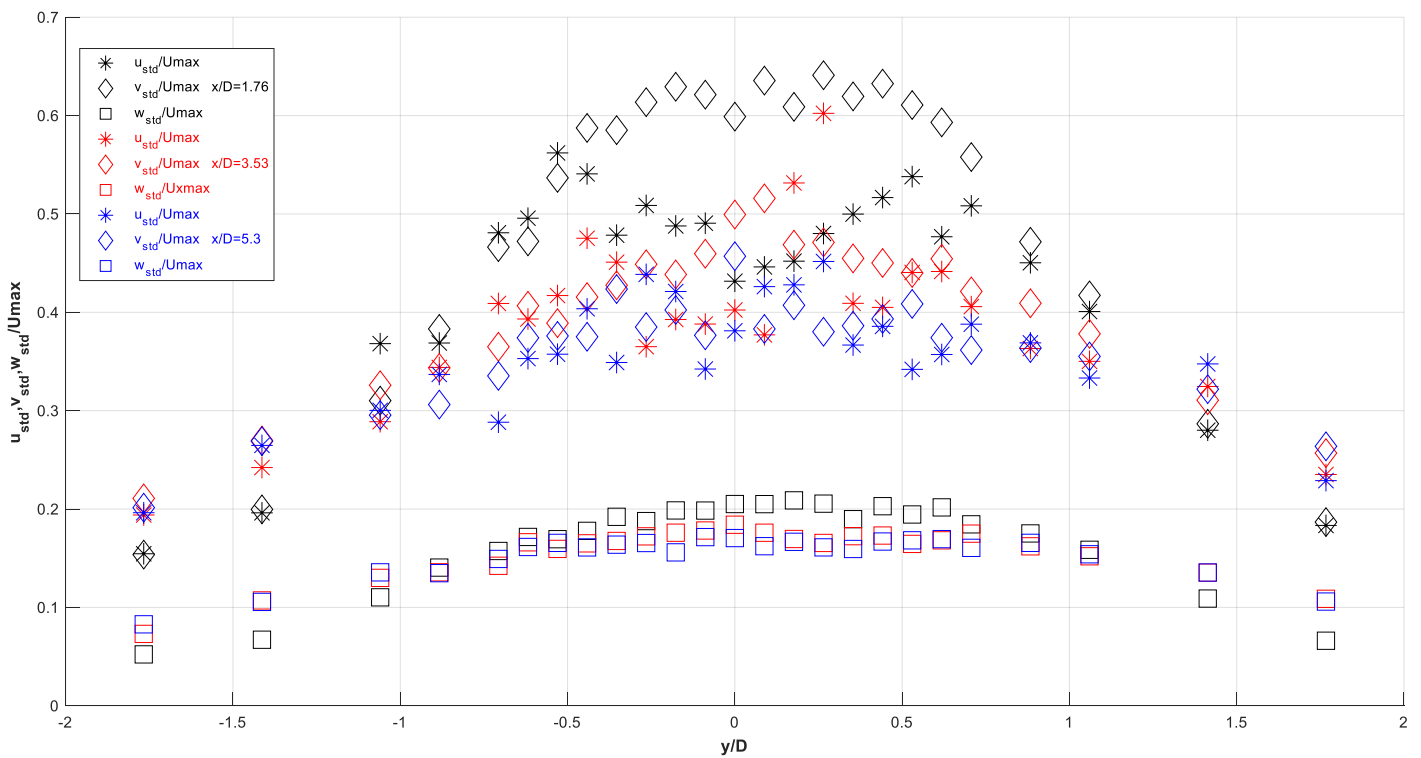
Σχήμα 4.191 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου D=5,66cm σε απόσταση -30cm



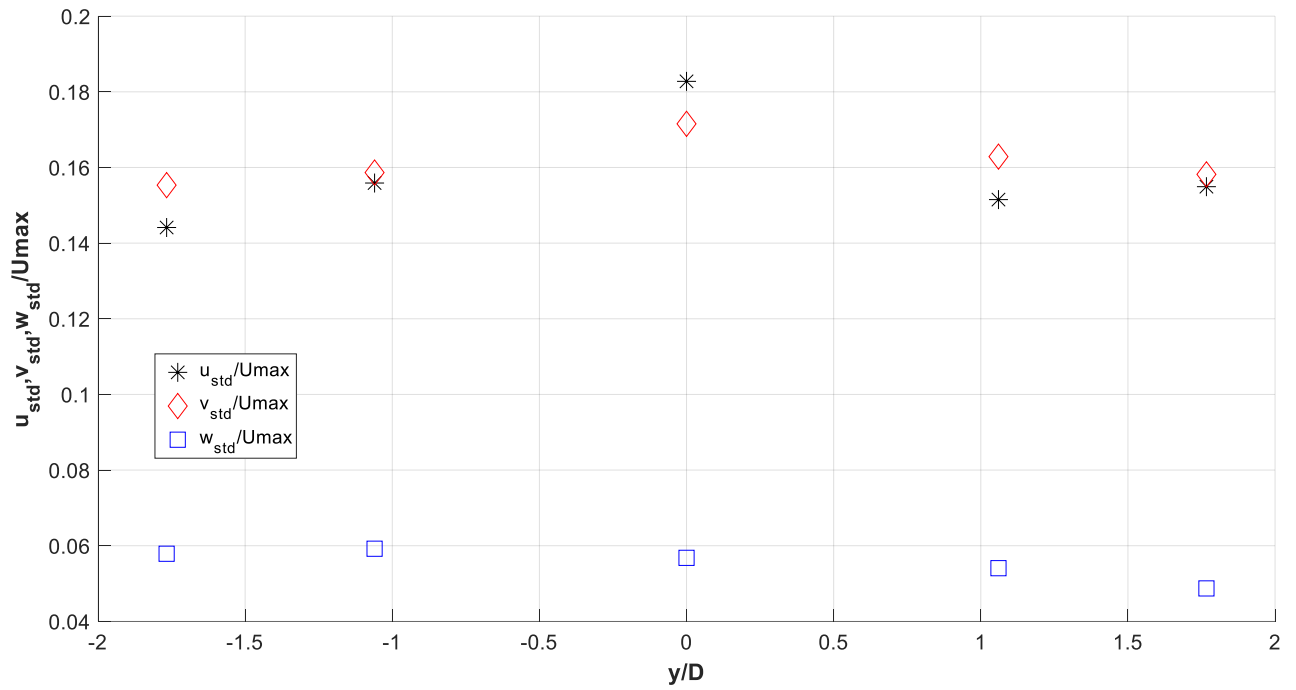
Σχήμα 4.192 Αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου D=5,66cm σε απόσταση 10(x/D=1.76), 20(x/D=3.53) και 30cm (x/D=5.3)



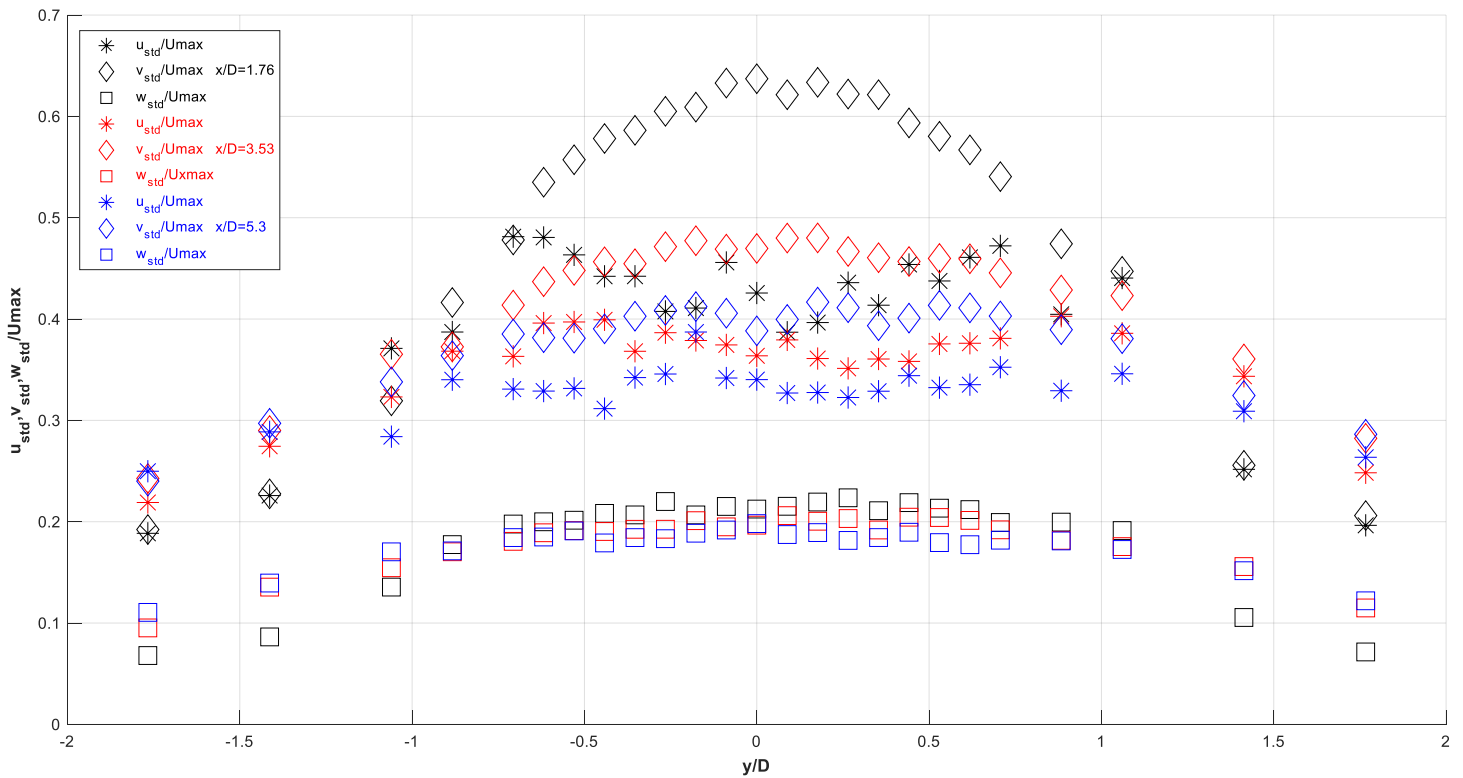
**Σχήμα 4.193** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$



**Σχήμα 4.194** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $4,5\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$

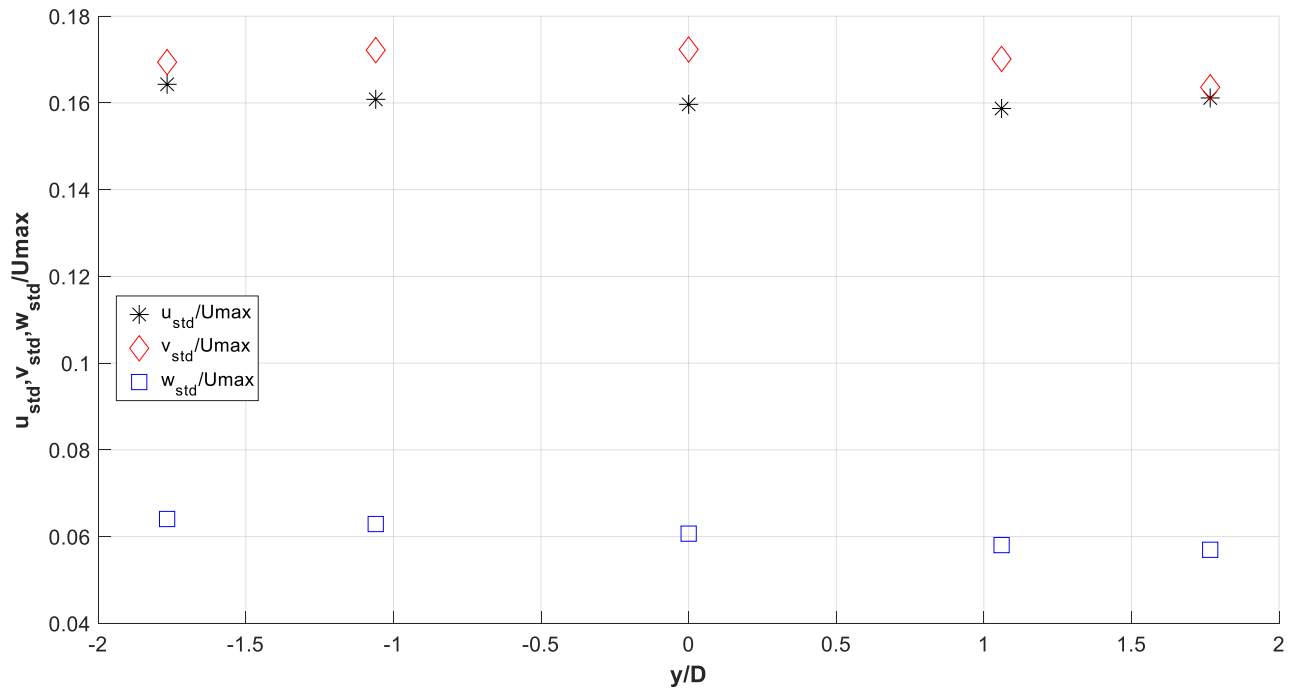


**Σχήμα 4.195** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $9\text{cm}$

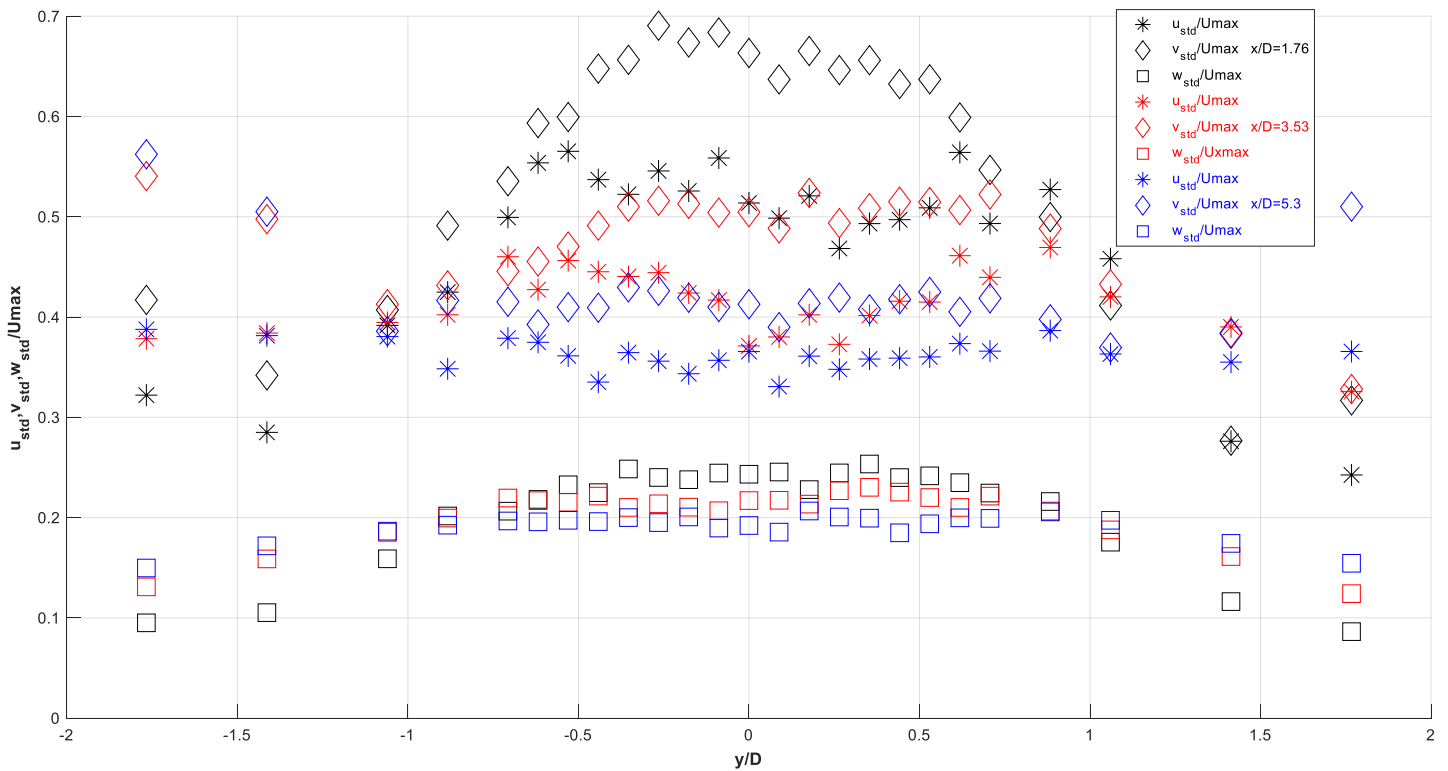


**Σχήμα 4.196** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) σε ύψος  $9\text{cm}$

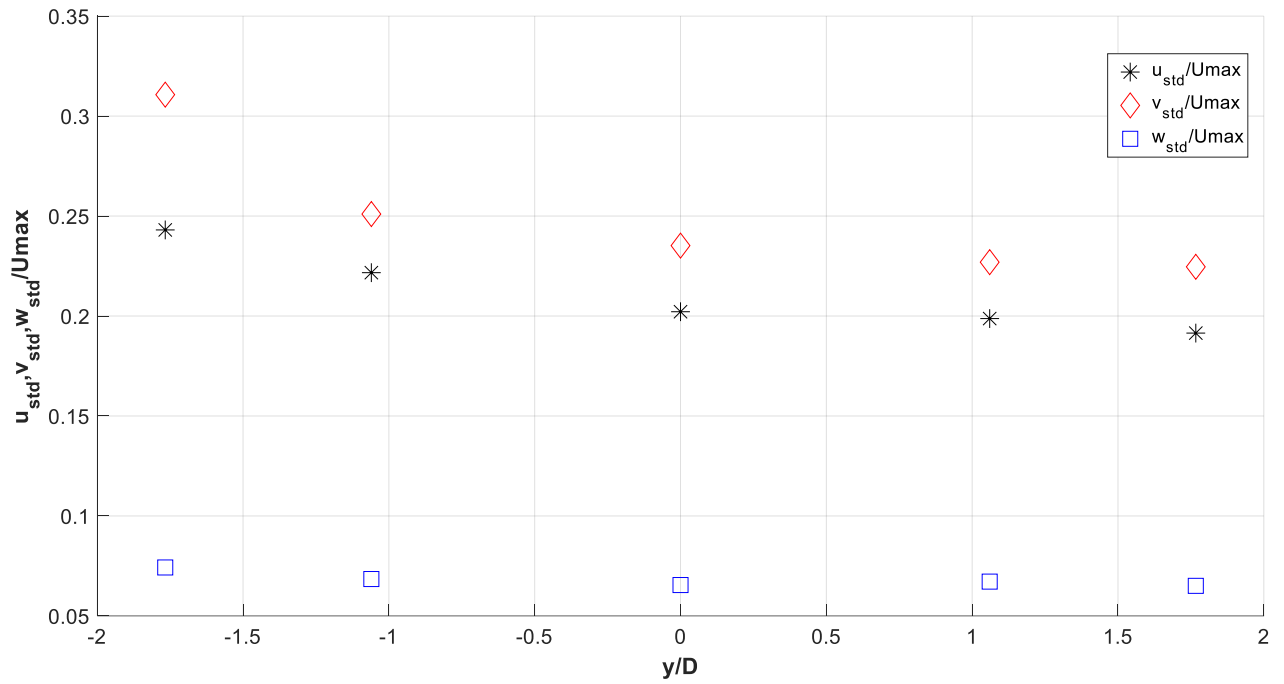




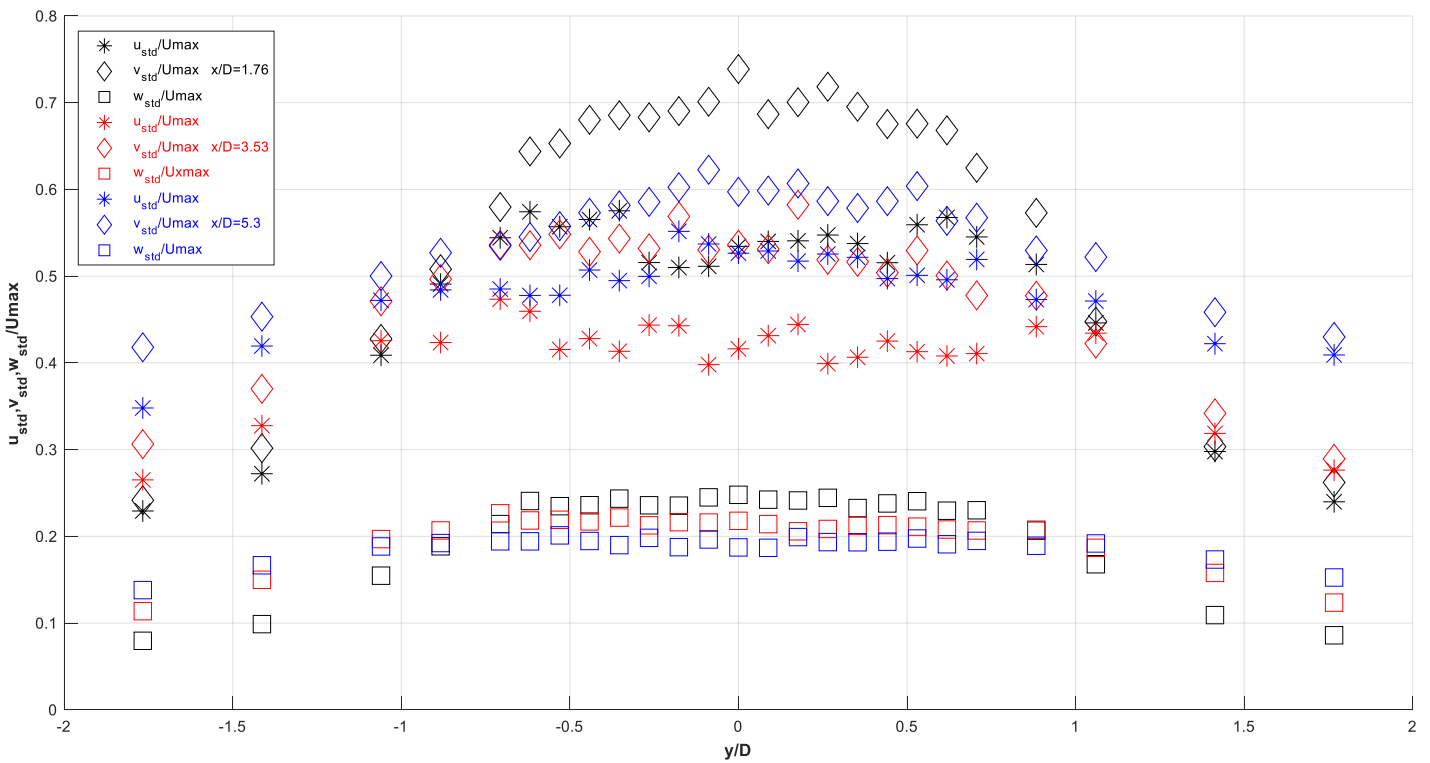
**Σχήμα 4.197** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $13.5\text{cm}$



**Σχήμα 4.198** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}$  ( $x/D=5.3$ ) σε ύψος  $13.5\text{cm}$



**Σχήμα 4.199** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$



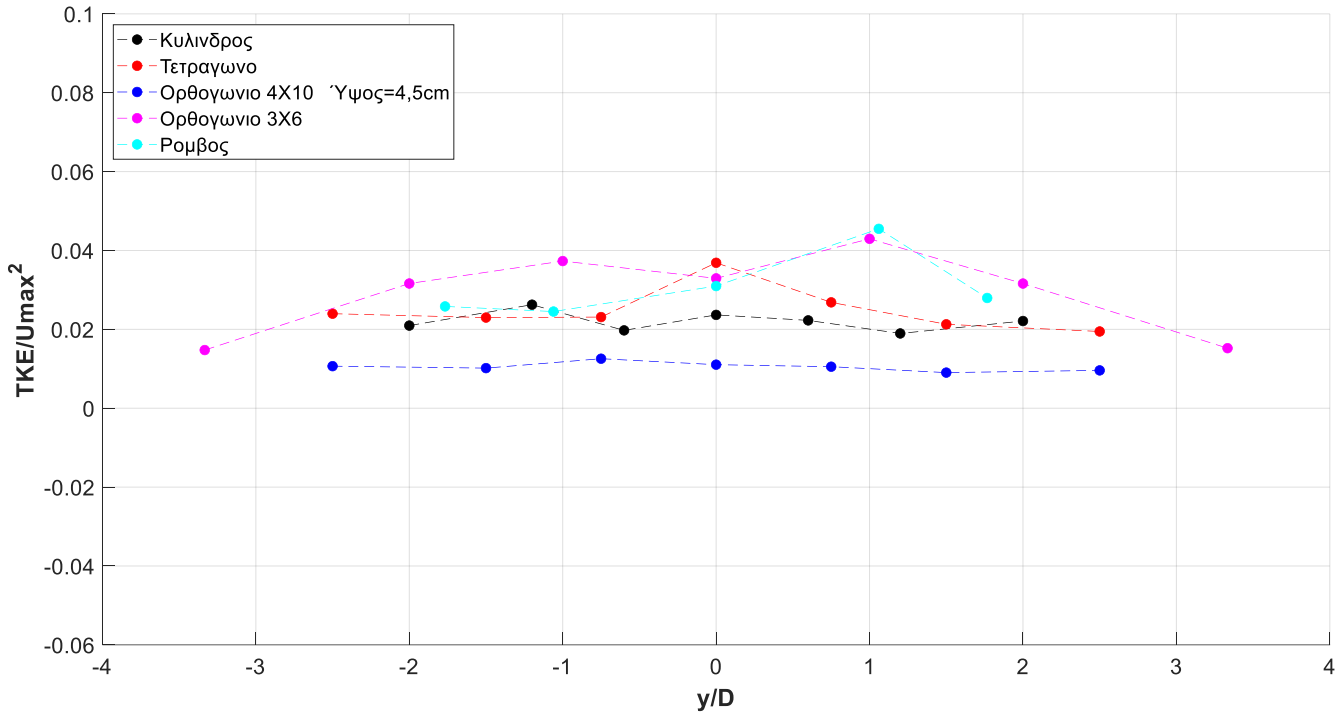
**Σχήμα 4.200** Αδιαστατοποιημένη εγκάρσια ένταση τύρβης ανάντη ρομβοειδής διατομής διαγωνίου  $D=5,66\text{cm}$  σε απόσταση  $10(x/D=1.76)$ ,  $20(x/D=3.53)$  και  $30\text{cm}(x/D=5.3)$  σε ύψος  $17.1\text{cm}$

Οι τυρβώδεις τάσεις  $\overline{-u'v'}$  παρουσιάζουν σε όλα τα σχήματα συμμετρία αριστερά και δεξιά του κεντρικού άξονα. Αυτό υποδηλώνει πως δημιουργούνται στρόβιλοι ίσης έντασης και με περιστροφή αντίθετης φοράς. Τα αποτελέσματα είναι πιο ασαφές για τις τάσεις  $\overline{-u'w'}$ ,  $\overline{-v'w'}$  καθώς οι κινήσεις των σωματιδίων είναι πιο χαοτικές αλλά με τάξεις μεγέθους πολύ μικρότερες από τις τάσεις  $\overline{-u'v'}$  το οποίο μεταφράζεται πως οι μεγαλύτερες ανταλλαγές ποσότητας μάζας συμβαίνουν μεταξύ των διευθύνσεων  $x$  και  $y$ .

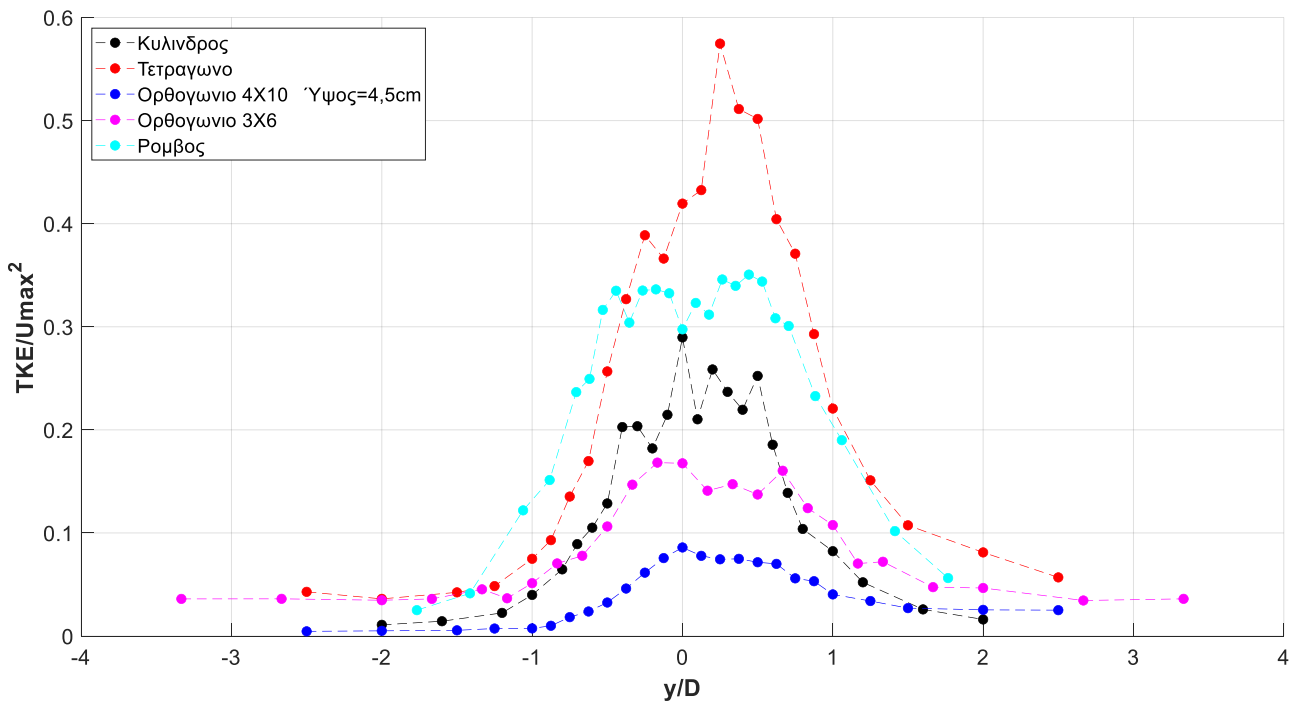
Ωστόσο είναι φανερό πως οι τάσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση στο τετράγωνο και στον ρόμβο από ότι στα υπόλοιπα σχήματα, αυξάνονται καθ' ύψος και μειώνονται καθώς απομακρυνόμαστε από τη διατομή. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τα διαγράμματα της εντάσεως της τύρβης όπου ως επί των πλείστων μεγαλύτερη ένταση τύρβης παρουσιάζει η διεύθυνση  $y$  και αρκετά μικρότερη η διεύθυνση  $z$ .

### 4.4 Τυρβώδη κινητική ενέργεια (ΤΚΕ) - Συγκεντρωτικά ανά ύψος

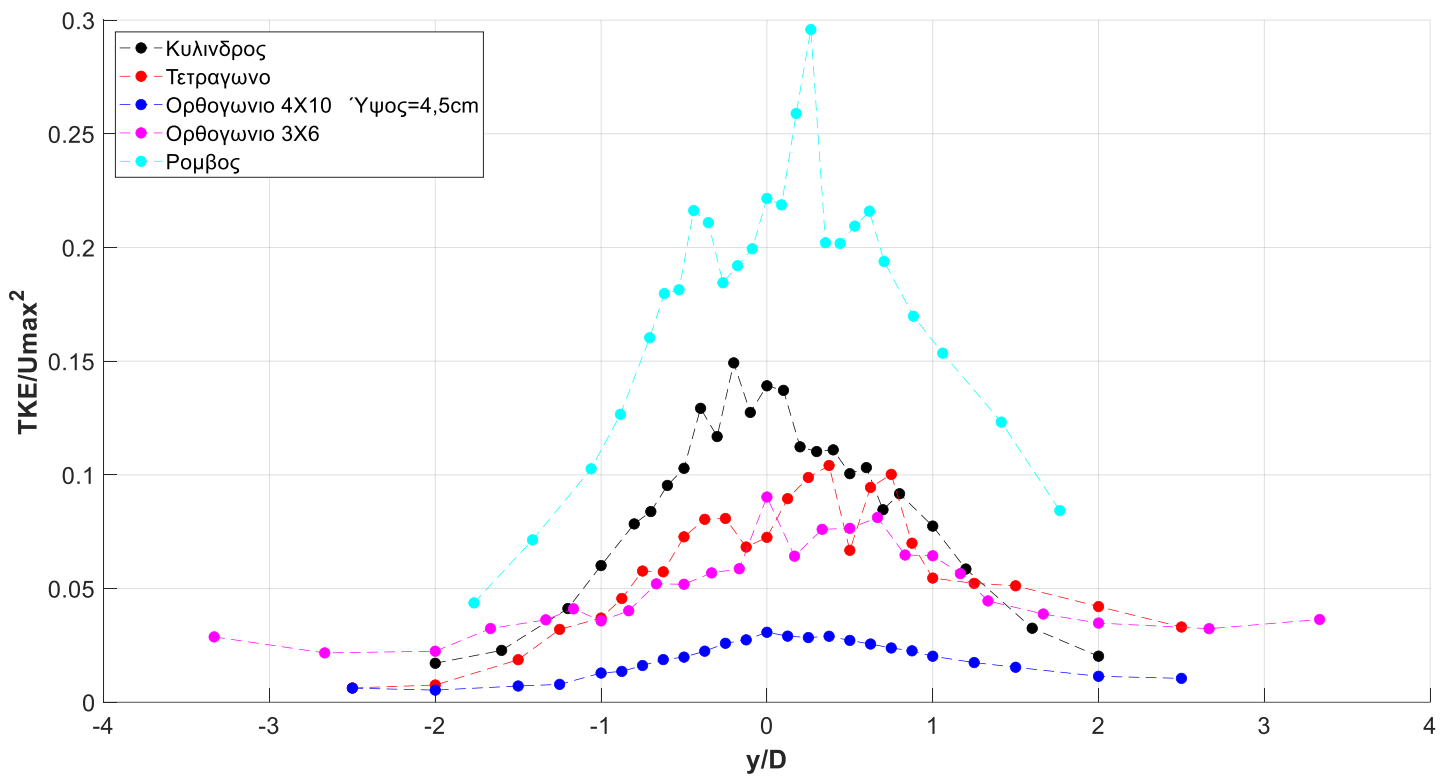
#### 4.4.1 Ύψος 4,5cm



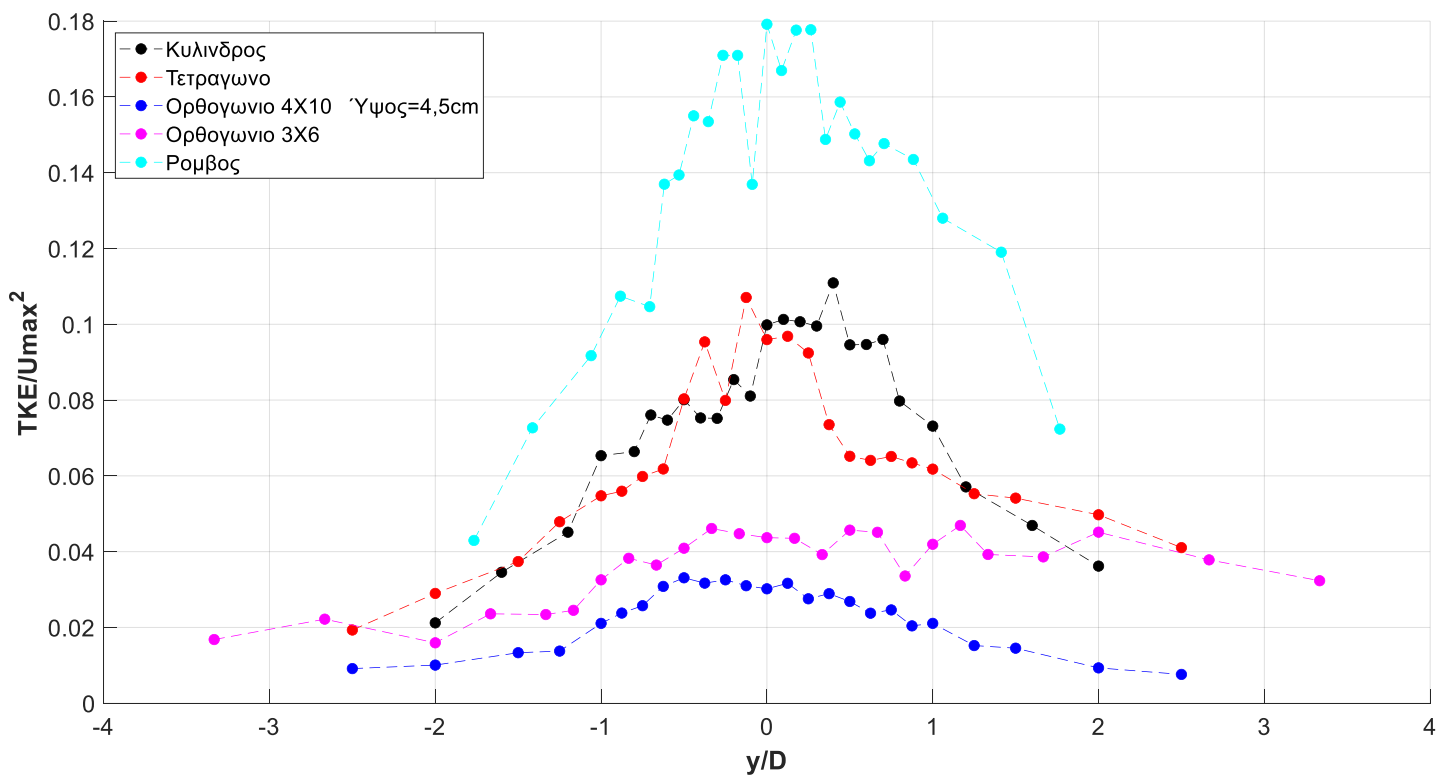
**Σχήμα 4.201** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 30cm ανάντη



**Σχήμα 4.202** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

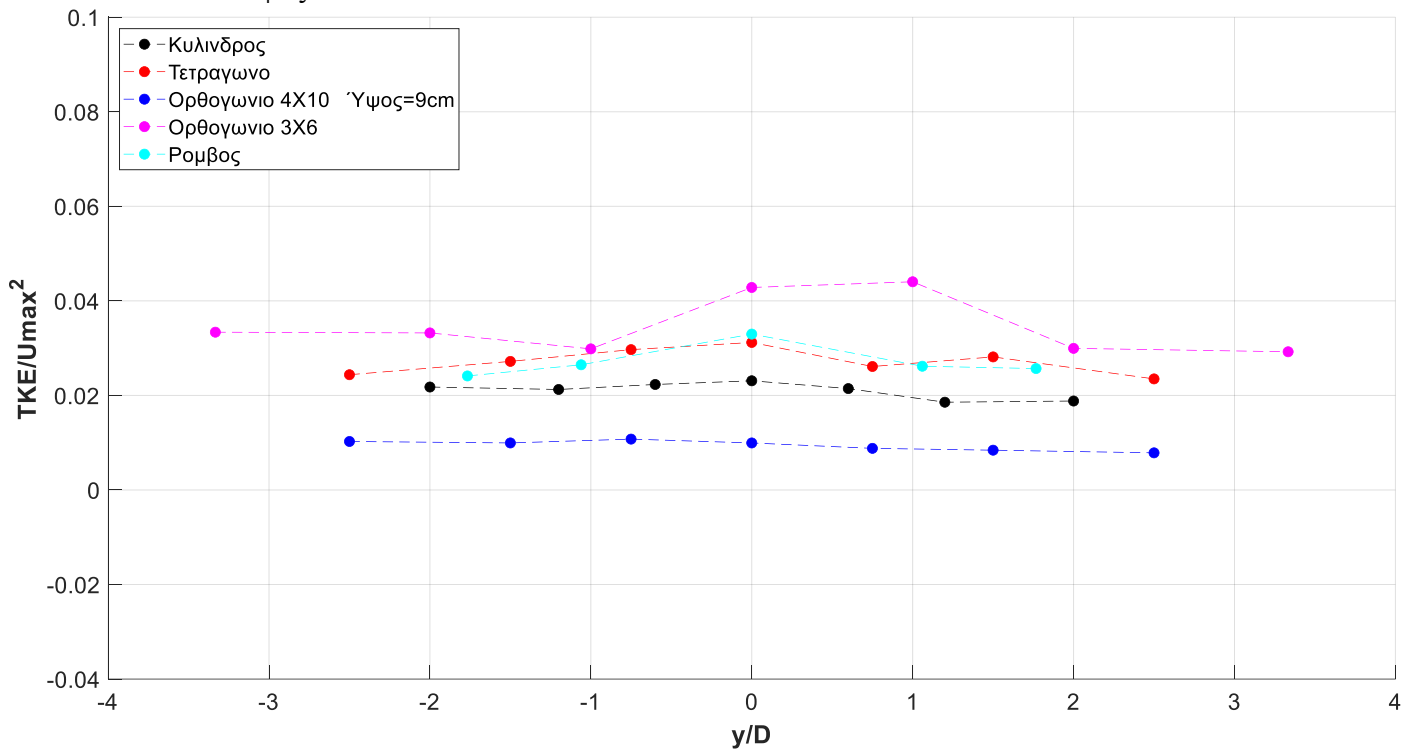


**Σχήμα 4.203** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 20cm κατόντη

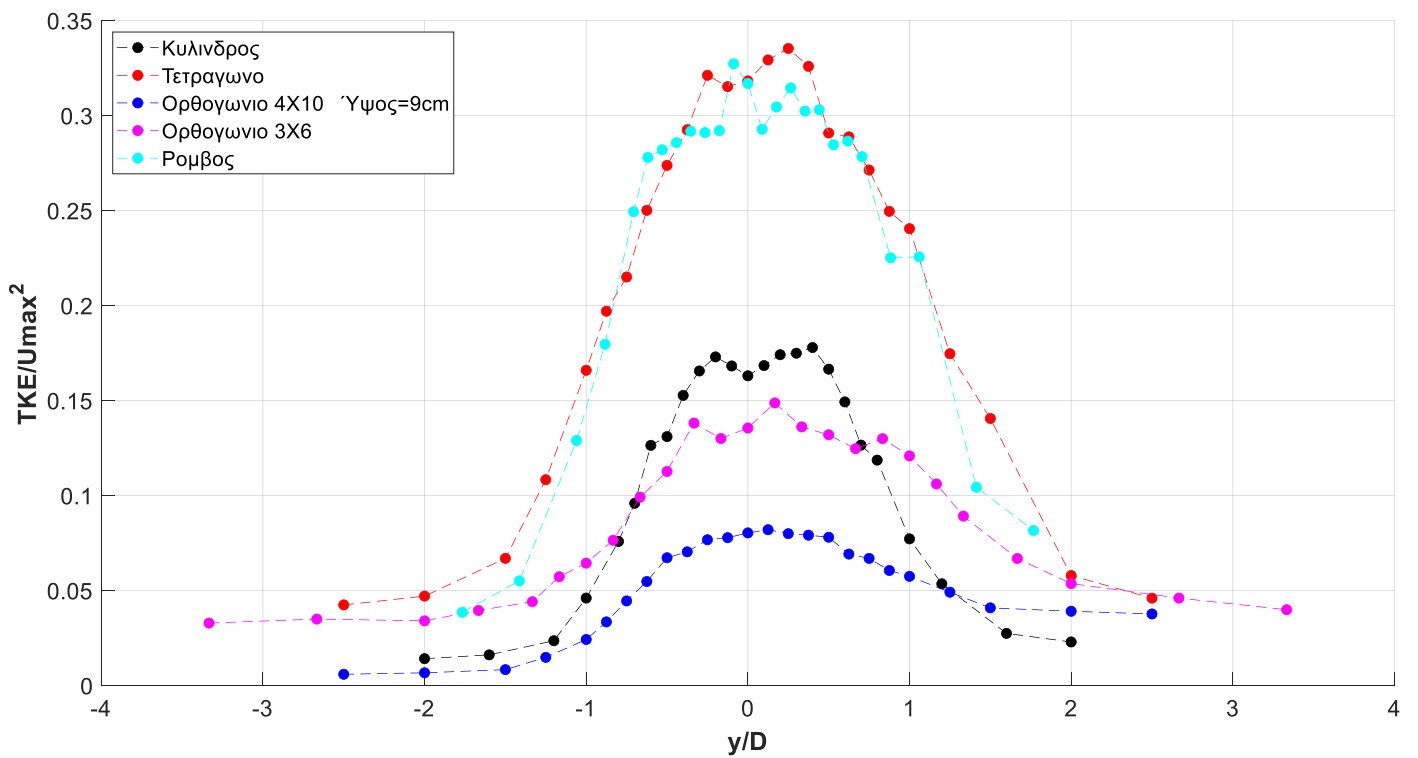


**Σχήμα 4.204** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 4,5cm και σε απόσταση 30cm κατόντη

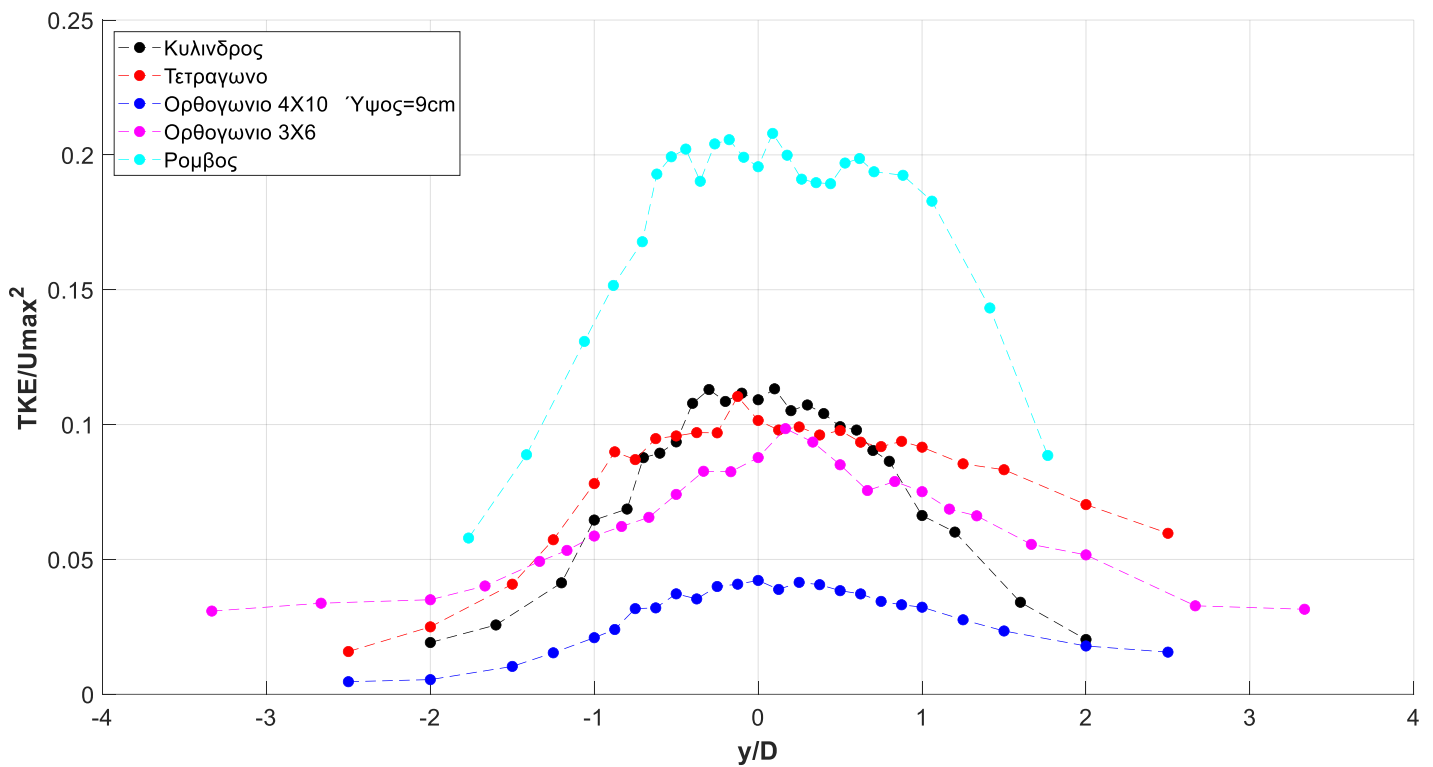
4.4.2 Ύψος 9cm



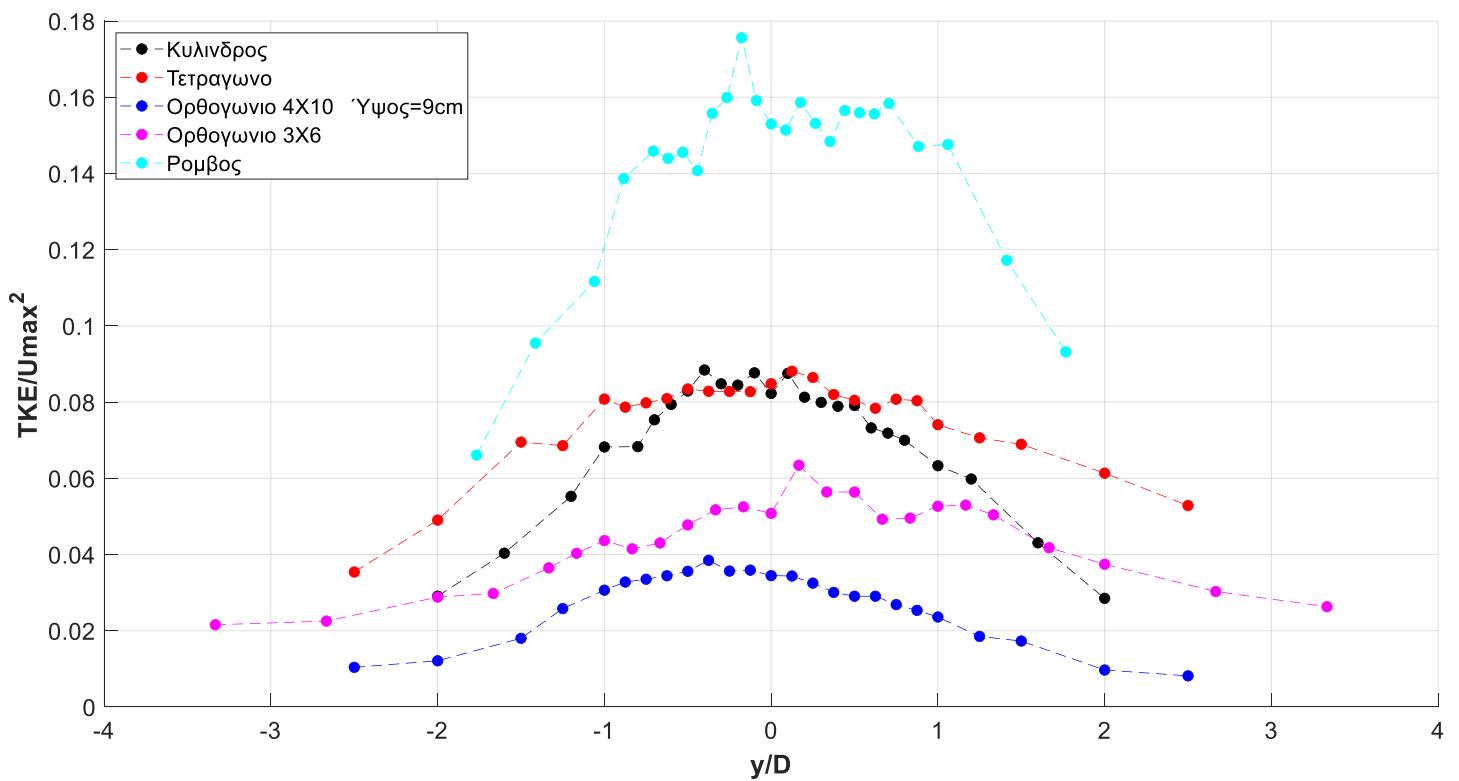
**Σχήμα 4.205** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 30cm ανάντη



**Σχήμα 4.206** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 10cm κατόντη

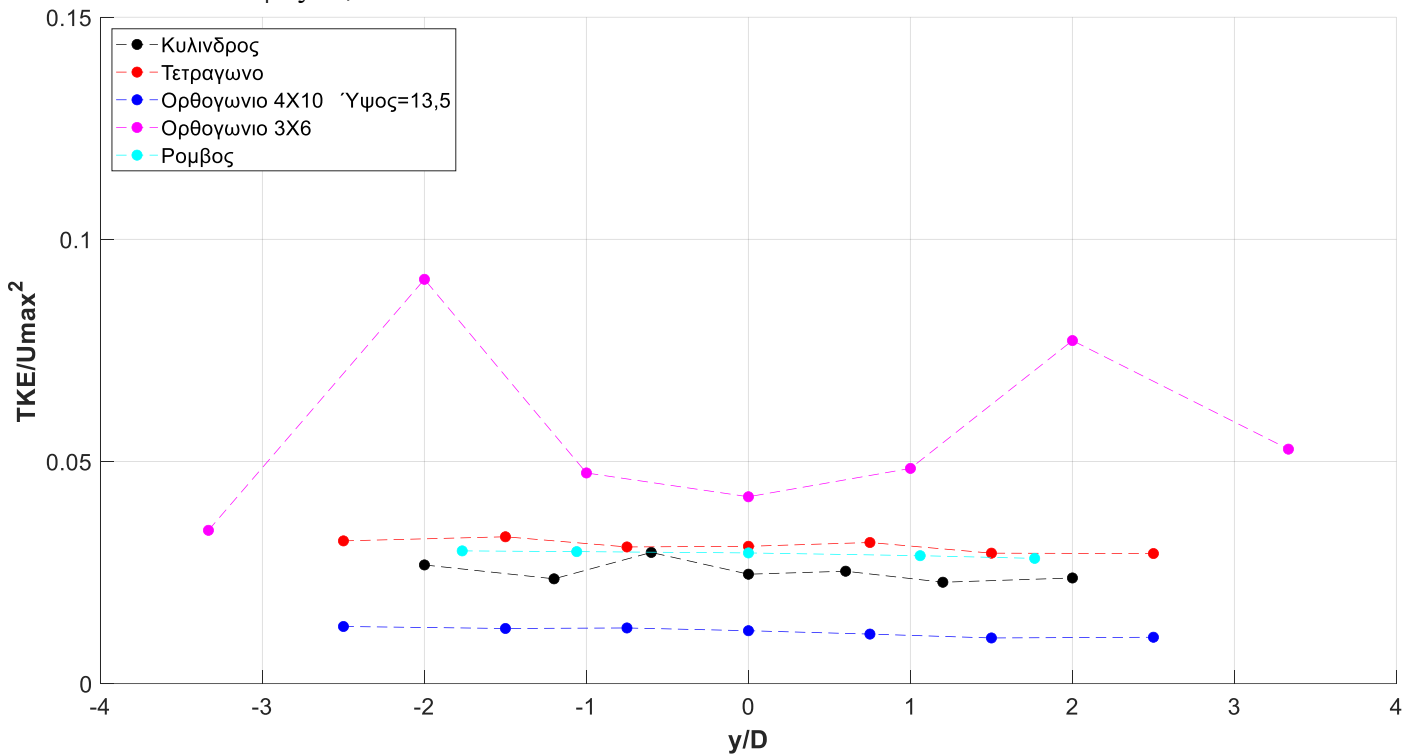


**Σχήμα 4.207** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 20cm καάντη

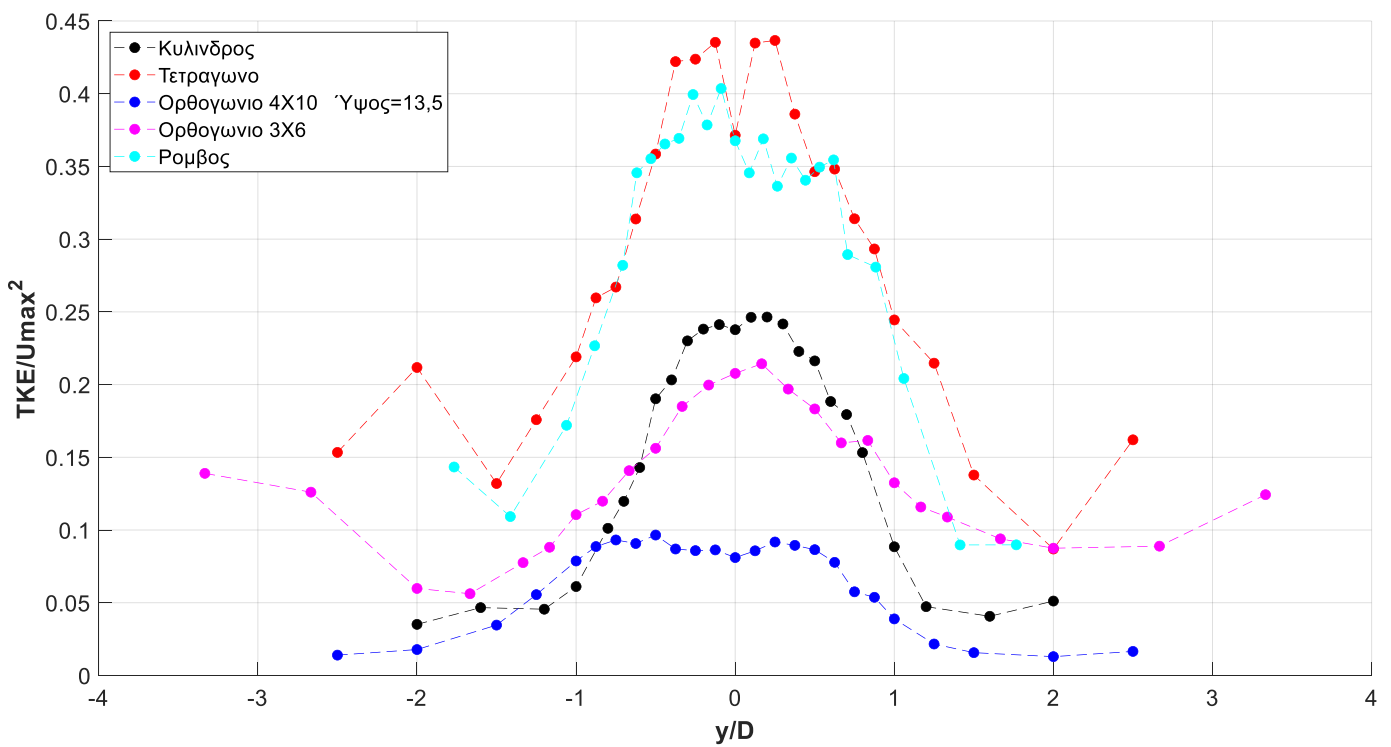


**Σχήμα 4.208** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 9cm και σε απόσταση 30cm καάντη

4.4.3 Ύψος 13,5cm

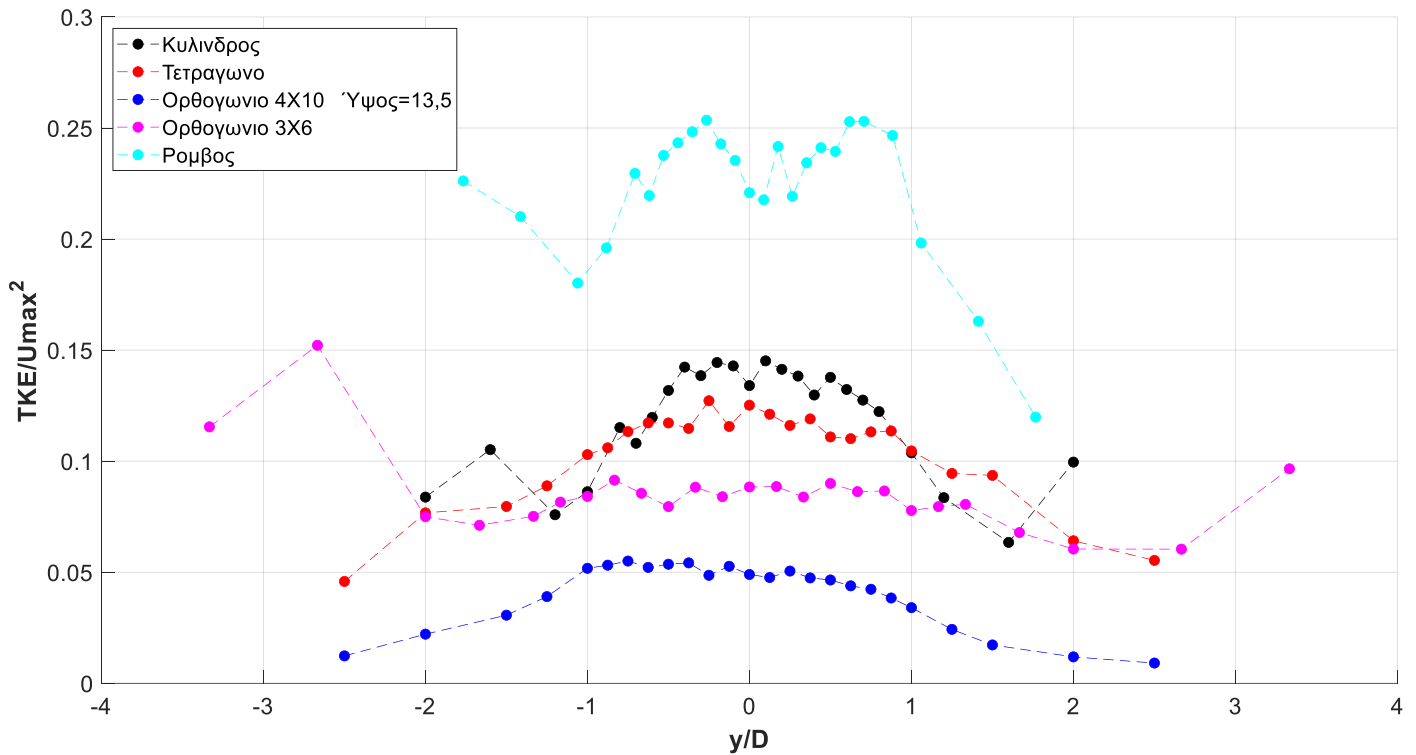


Σχήμα 4.209 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 30cm ανάντη

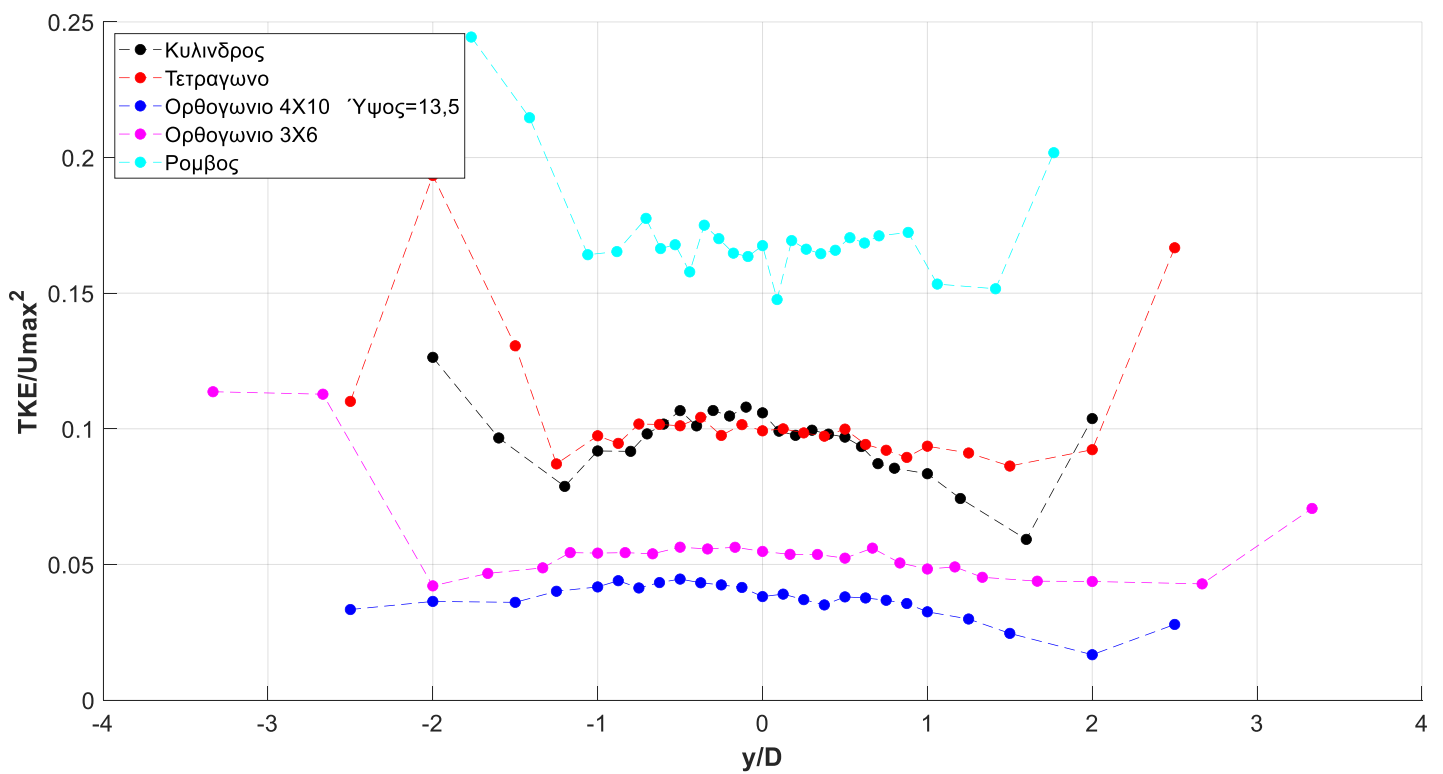


Σχήμα 4.210 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 10cm κατάντη



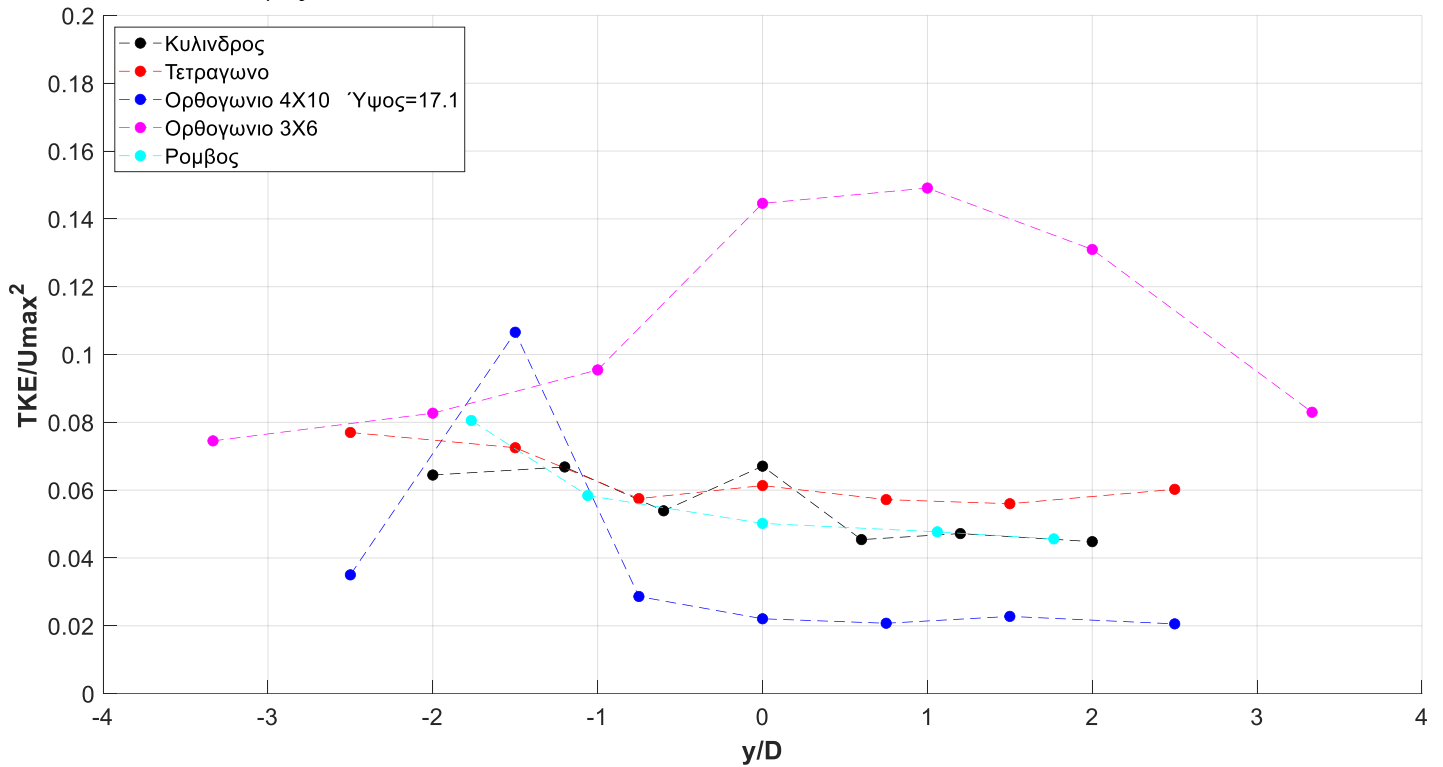


**Σχήμα 4.211** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 20cm καάντη

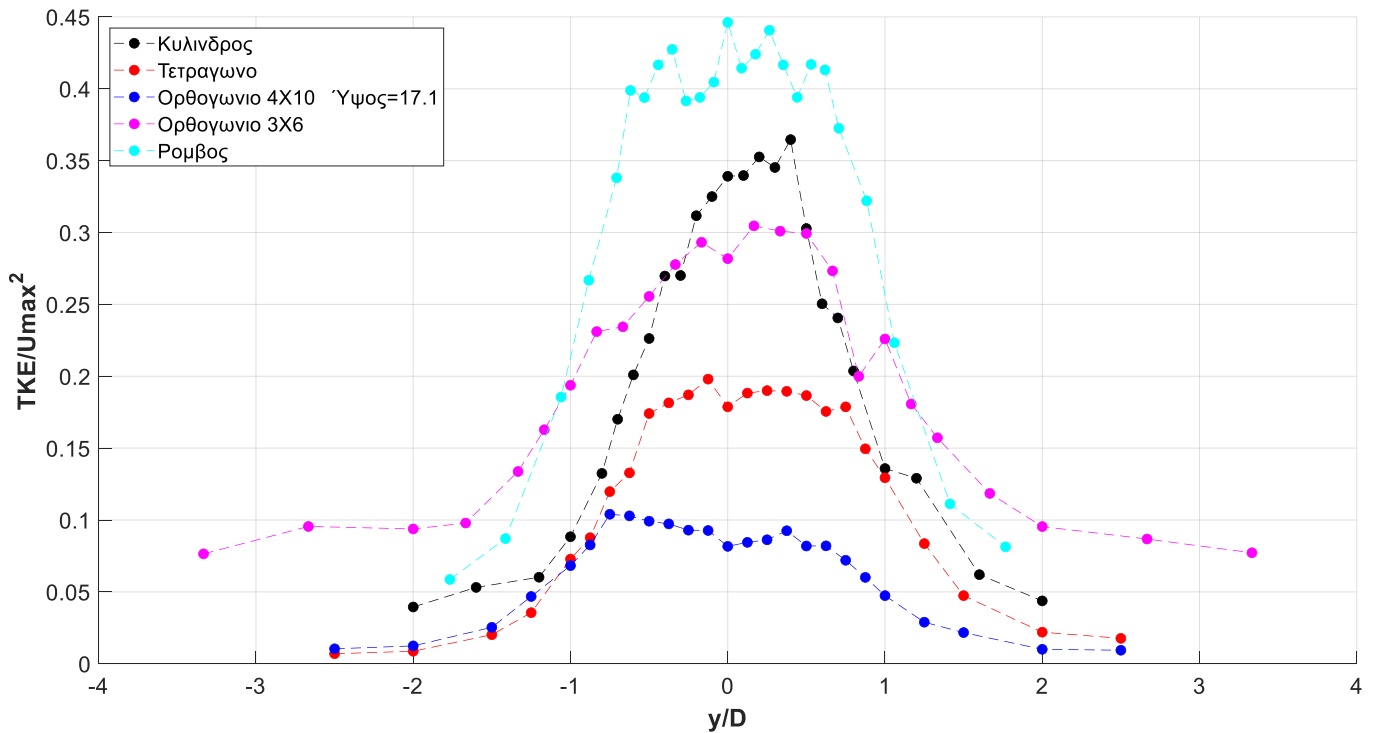


**Σχήμα 4.212** Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 13.5cm και σε απόσταση 30cm καάντη

4.4.4 Ύψος 17.1cm

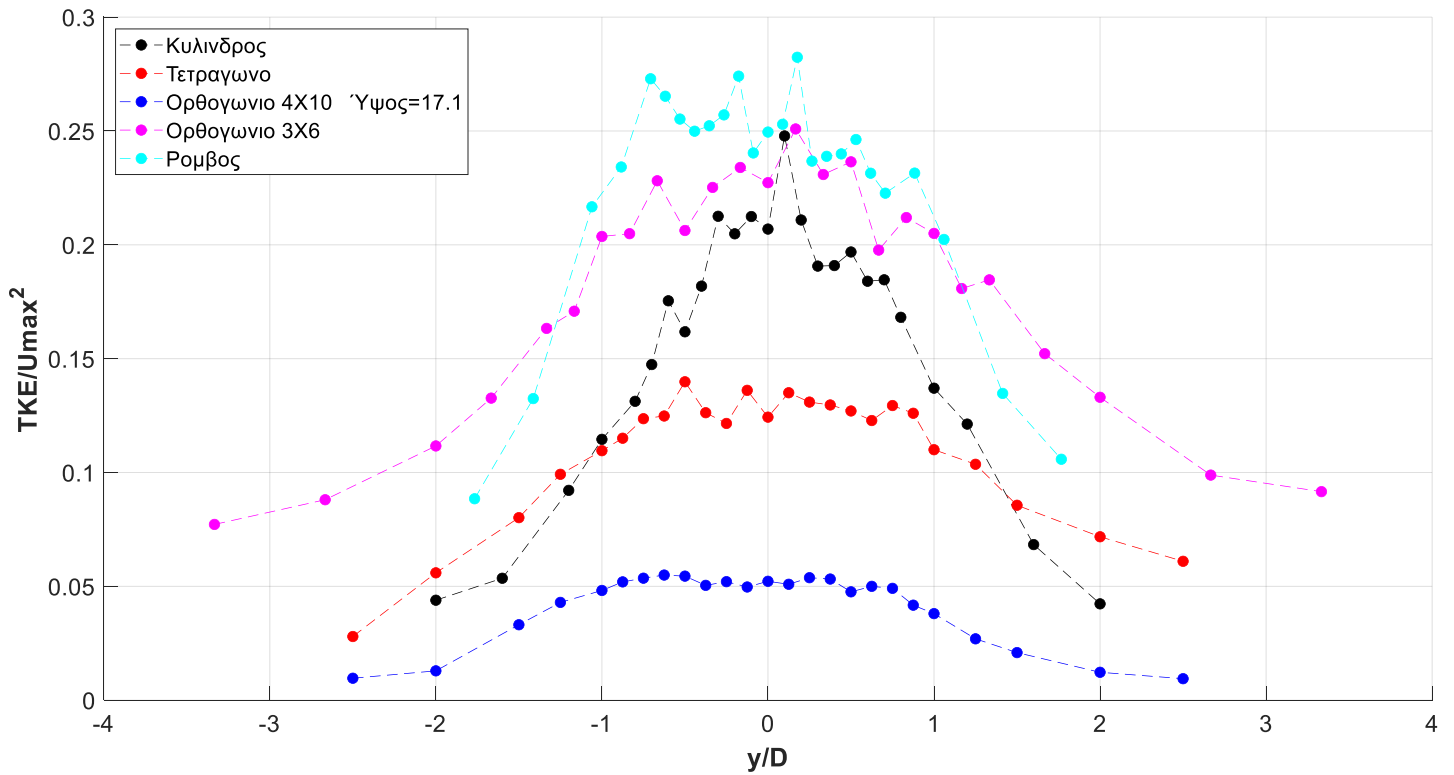


Σχήμα 4.213 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 30cm ανάντη

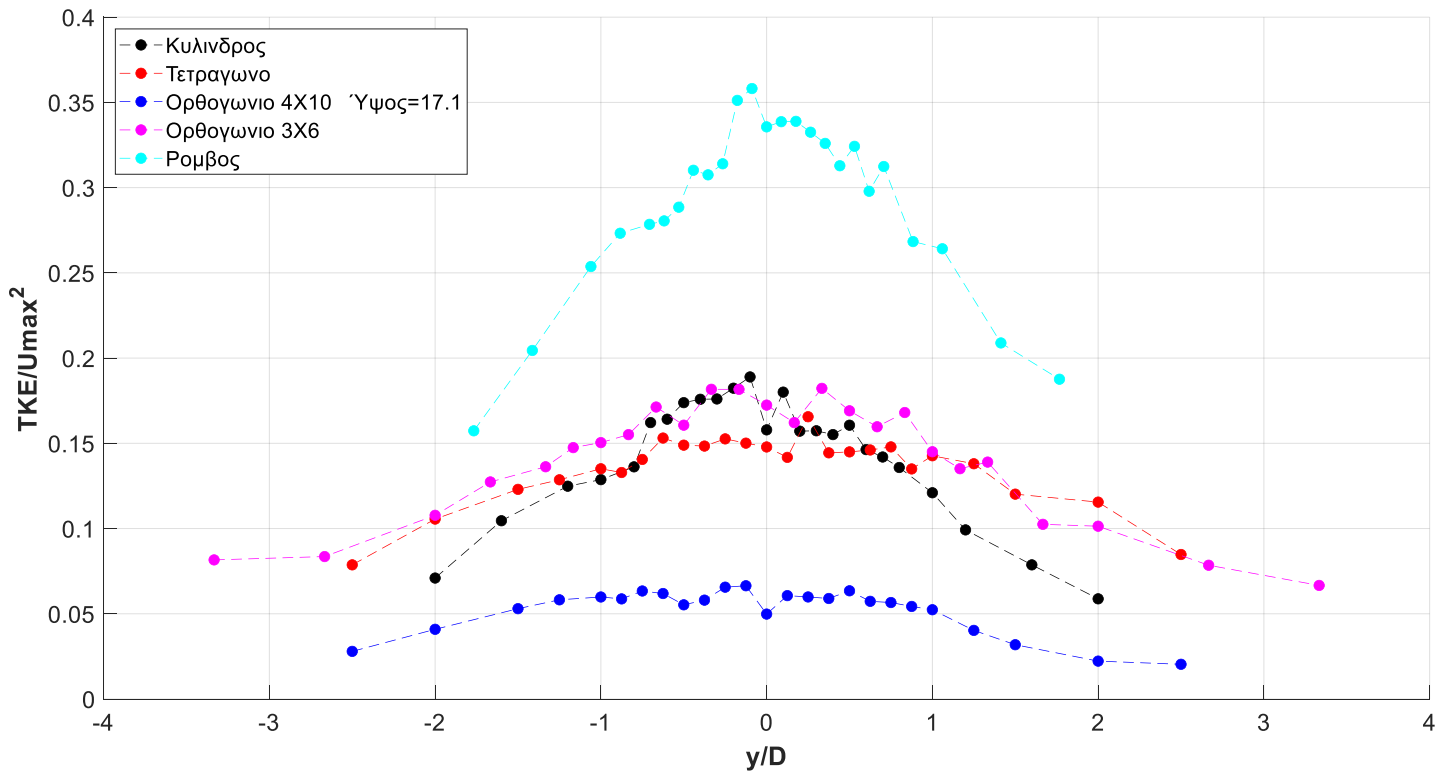


Σχήμα 4.214 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 10cm κατάντη

4.Ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων



Σχήμα 4.215 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 20cm κατόντη



Σχήμα 4.16 Αδιαστατοποιημένη κατανομή τυρβώδους κινητικής ενέργειας όλων των μεσόβαθρων σε ύψος 17.1cm και σε απόσταση 30cm κατόντη

Από την τυρβώδη κινητική ενέργεια γίνεται πλέον φανερό πως το σχήμα με την μεγαλύτερη επιρροή στη ροή είναι ο ρόμβος. Ακολουθούν το τετράγωνο ιδιαίτερα στην απόσταση των +10cm και στα ύψη 4.5 και 9cm και ο κύλινδρος όπου στα ύψη 13,5 και 17,1cm έχει τιμές μεγαλύτερες και από το τετράγωνο, έπειτα το ορθογώνιο με  $D=3\text{cm}$  ( $L/D=2$ ) και τέλος το ορθογώνιο με  $D=4\text{cm}$  ( $L/D=2.5$ ). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ορθογώνιο με  $L/D=2,5$  διότι παρά το γεγονός πως εμποδίζει περισσότερο τη ροή από ότι το μικρότερο ορθογώνιο, λόγω του μεγαλύτερου μήκους του, κάποιοι στρόβιλοι και δίνες που δημιουργούνται από την αποκόλληση της ροής μόλις αυτή συναντήσει το εμπόδιο προλαβαίνουν να χάσουν ένα μέρος της έντασης και της ενέργειας τους έτσι ώστε το φαινόμενο της τύρβης πίσω από το σχήμα να μην είναι τόσο έντονο. Για αυτό το λόγο και το τετράγωνο με λόγω πλευρών  $L/D=1$  και έπειτα το ορθογώνιο  $L/D=2$  παρουσιάζουν μεγαλύτερη τυρβώδη κινητική ενέργεια στα κατάντη της ροής

Ο κύλινδρος παρόλο που είναι το ομαλότερο σχήμα όπου η ροή μπορεί να κάνει την πιο ομαλή μετάβαση παρουσιάζει μεγαλύτερη κινητική ενέργεια από αυτή των ορθογώνιων. Υποθέτουμε πως αυτό συμβαίνει διότι στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε κύλινδρος με διάμετρο  $D=5\text{cm}$ , μεγαλύτερη από το πλάτος και των δύο ορθογώνιων. Αν το μέγεθος της διαμέτρου ταυτιζόταν με το πλάτος ενός από των δύο ορθογώνιων, είναι πολύ πιθανότερο να αποτελέσματα να ερχόντουσαν πιο κοντά σε αυτά των ορθογώνιων και ίσως και πιο κάτω, καθιστώντας τον κύλινδρο το σχήμα με την μικρότερη ένταση του φαινομένου της τύρβης

## 4.5. Δύναμη και συντελεστής αντίστασης

Κύλινδρος διαμέτρου D=5cm			
	Απόσταση		
	x/D=2	x/D=4	x/D=6
Υψος(cm)	Fd(N/m)	Fd(N/m)	Fd(N/m)
4,5	1,91	1,8	2,29
9	1,7	1,16	2,62
13,5	1,1	2,63	3,47
17,1	3,48	7,07	7,02
FD(μέση)	2,05	3,17	3,85
CD	0,72	1,12	1,36

**Πίνακας 2** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης κυλίνδρου διαμέτρου D=5cm ανά απόσταση

Ορθογώνιο πλάτους D=4cm και μήκους L=10cm (L/D=2,5)			
	Απόσταση		
	x/D=2,5	x/D=5	x/D=7,5
Υψος(cm)	Fd(N/m)	Fd(N/m)	Fd(N/m)
4,5	2,36	1,35	0,9
9	4,62	3,36	1,12
13,5	5,52	3,82	4,17
17,1	5,47	5,3	6,97
FD(μέση)	4,5	3,46	3,29
CD	1,99	1,53	1,46

**Πίνακας 3** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ορθογωνίου πλάτους D=4cm και μήκους L=10cm ανά απόσταση

Ορθογώνιο πλάτους D=3cm και μήκους L=6cm (L/D=2)			
	Απόσταση		
	x/D=3,33	x/D=6,66	x/D=10
Υψος(cm)	Fd(N/m)	Fd(N/m)	Fd(N/m)
4,5	2,21	1,28	0,97
9	2,27	1,66	1,24
13,5	4,08	3,57	3,19
17,1	7,19	7,34	7,07
FD(μέση)	3,94	3,46	3,12
CD	2,33	2,04	1,84

**Πίνακας 4** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ορθογωνίου πλάτους D=3cm και μήκους L=6cm ανά απόσταση

Τετράγωνο πλευράς D=4cm			
	Απόσταση		
	x/D=2,5	x/D=5	x/D=7,5
Υψος(cm)	Fd(N/m)	Fd(N/m)	Fd(N/m)
4,5	3,96	1,75	1,33
9	4,88	3,83	2,55
13,5	5,6	5,52	4,82
17,1	6,01	8,51	8,8
FD(μέση)	5,11	4,9	4,38
CD	2,26	2,17	1,94

**Πίνακας 5** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης τετραγώνου πλευράς D=4cm ανά απόσταση

Ρόμβος διαγωνίου D=5,66cm			
	Απόσταση		
	x/D=1,76	x/D=3,53	x/D=5,3
Υψος(cm)	Fd(N/m)	Fd(N/m)	Fd(N/m)
4,5	4,9	3,69	3,57
9	5,13	4,78	4,66
13,5	5,65	6,65	6,36
17,1	7,92	9,42	9,61
FD(μέση)	5,9	6,13	6,05
CD	1,85	1,92	1,89

**Πίνακας 6** Δύναμη και συντελεστής αντίστασης ρόμβου διαγωνίου D=5,66cm ανά απόσταση

Ο υπολογισμός των δυνάμεων και των συντελεστών αντίστασης έγινε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.38) και (2.39). Για κάθε απόσταση όπου έγιναν οι μετρήσεις υπολογίστηκε η δύναμη σε κάθε ύψος από τις αντίστοιχες εγκάρσιες κατανομές των ταχυτήτων ανάντη και κατόντη και στη συνέχεια εξήχθη η μέση τιμή αυτών η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης. Ο ρόμβος δέχεται τη μεγαλύτερη δύναμη ενώ τη μικρότερη τη δέχεται ο κύλινδρος

Στην απόσταση 10cm κατόντη της διατομής η σχέση δεν δίνει εύλογα αποτελέσματα. Αυτό είναι λογικό καθώς κοντά στο μεσόβαθρο η αναταραχή της ροής είναι τόσο μεγάλη που οι κατανομές των ταχυτήτων που μετρήθηκαν δεν επαρκούν για την σωστή ολοκλήρωση που απαιτείται για τον υπολογισμό της δύναμης.

Στις αποστάσεις 20 και 30cm, τα αποτελέσματα είναι πολύ λογικότερα διότι η ροή έχει “ηρεμήσει” περισσότερο και οι κατανομές που έχουμε στη διάθεση μας είναι καταλληλότερες.

Συνολικά οι συντελεστές αντίστασης είναι οι εξής

Κύλινδρος	$CD \approx 1.24$
Ορθογώνιο $L/D=2.5$	$CD \approx 1.49$
Ορθογώνιο $L/D=2$	$CD \approx 1.94$
Τετράγωνο	$CD \approx 2.05$
Ρόμβος	$CD \approx 1.9$

Όλα τα σχήματα έχουν συντελεστή αντίστασης τάξης μεγέθους πολύ κοντά σε αυτούς που προτείνει ο Fr.H.White (Πίνακα 1) πλην του ρόμβου.

## 5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε η προσπάθεια κατανόησης του φαινομένου της τύρβης πειραματικά πίσω από πέντε διαφορετικά σχήματα μεσόβαθρων σε τέσσερα διαφορετικά ύψη και σε τρεις αποστάσεις κατάντη της ροής. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των κατανομών των ταχυτήτων στα κατάντη, των τυρβώδων τάσεων Reynolds, της έντασης της τύρβης, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης. Οι συνθήκες ροής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σταθερές για όλα τα σχήματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων με ίδιο αριθμό Reynolds και Froude. Όλα τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν αδιαστατοποιημένα με την μέγιστη ταχύτητα που επικρατούσε στα ανάντη της ροής σε κάθε εξεταζόμενο ύψος.

Εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

(α) Σε ότι αφορά τις κατανομές των ταχυτήτων στη διεύθυνση  $x$

- i) Ο ρόμβος παρουσιάζει με διαφορά τις μικρότερες τιμές στις κατανομές ταχυτήτων στα κατάντη, ακολουθούν το τετράγωνο, το ορθογώνιο με  $L/D=2,5$  και τέλος το ορθογώνιο με  $L/D=2$  και τέλος ο κύλινδρος, Γίνεται φανερό η επιρροή του πλάτους του εκάστοτε σχήματος στην παρεμπόδιση της ροής. Ο κύλινδρος παρόλο που έχει μεγαλύτερη διάμετρο από τα υπόλοιπα μεσόβαθρα, έχοντας το ομαλότερο σχήμα (δεν έχει γωνίες) επηρεάζει λιγότερο τις κατανομές ταχυτήτων στα κατάντη
- ii) Ο κύλινδρος παρουσιάζει μικρότερη απόσβεση ταχυτήτων καθώς παρατηρήθηκε πως στην απόσταση των 30 εκατοστών κατάντη παρουσιάζει κατανομές ταχυτήτων με μεγέθη μεγαλύτερα των υπόλοιπων σχημάτων, κυρίως στα ύψη 4,5 και 9cm και στην περιοχή κοντά στον κεντρικό άξονα πλην του ρόμβου
- iii) Όλες οι ταχύτητες μειώνονται όσο πλησιάζουμε στο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας και όταν απομακρυνόμαστε από τα σχήματα. Η μείωση των τιμών της ταχύτητας καθ' ύψος εξηγείται από το νόμο διατήρησης της ορμής από τα ανάντη στα κατάντη διότι στα ανάντη οι ταχύτητες αυξάνονται με την αύξηση του ύψους.
- iv) Οι ταχύτητες στα κατάντη παρουσιάζουν δύο κορυφές στα αριστερά και στα δεξιά και έπειτα καθώς απομακρυνόμαστε από την περιοχή πίσω από τα εμπόδια τείνουν να ομαλοποιηθούν



(β) Σε ότι αφορά τις τυρβώδεις τάσεις και την ένταση της τύρβης

- i) Η ποσότητα  $\overline{-u'v'}$  παρουσιάζει πολύ καλή συμμετρία αριστερά και δεξιά έχοντας αντίθετα πρόσημα. Δημιουργούνται στρόβιλοι ίδιας έντασης και αντίθετης φόρας η οποία ένταση αυξάνεται λίγο με το ύψος και μειώνεται αρκετά καθώς απομακρυνόμαστε από τη διατομή
- ii) Η ποσότητα  $\overline{-u'v'}$  παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση στο ρόμβο και ακολουθεί το τετράγωνο, ο κύλινδρος, το ορθογώνιο  $L/D=2$  και τέλος το ορθογώνιο  $L/D=2.5$  με τα τελευταία δύο σχήματα να έχουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους
- iii) Οι ποσότητες  $\overline{-u'w'}$  και  $\overline{-v'w'}$  δεν εμφανίζουν ένα συγκεκριμένο μοτίβο για όλα τα σχήματα και για όλα τα σημεία που μετρήθηκαν. Οι κινήσεις των σωματιδίων του νερού είναι πιο χαοτικές. Όμως στη γενική εικόνα οι τάξεις μεγέθους είναι μικρότερες από την ποσότητα  $\overline{-u'v'}$  πράγμα που σημαίνει πως οι μεγαλύτερες μίξξης στρώσεων συμβαίνουν μεταξύ των διευθύνσεων  $x$  και  $y$ . Επίσης τις μεγαλύτερες “κορυφές” τις παρουσιάζει ως επί τον πλείστον ο ρόμβος.
- iv) Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στην ένταση της τύρβης. Στη διεύθυνση  $x$  το τετράγωνο σε όλες στις αποστάσεις ενώ εμφανίζει μεγαλύτερη ένταση από όλα τα σχήματα πλην του ρόμβου σε όλα τα ύψη, στο ύψος 17,1cm ή ένταση μειώνεται αισθητά με τον κύλινδρο και το ορθογώνιο  $L/D=2$  να έρχονται πάνω από το τετράγωνο. Παρόμοια αποτελέσματα ισχύουν και για την διεύθυνση  $y$  εκτός από την απόσταση των 30cm κατάντη όπου τα τρία σχήματα που αναφέρθηκαν ακολουθούν περίπου την ίδια πορεία. Το ορθογώνιο  $L/D=2,5$  έχει με διαφορά τη μικρότερη ένταση τύρβης σε όλα τα σημεία στους άξονες  $x$  και  $y$ .

Στη διεύθυνση  $z$  κύλινδρος εμφανίζει τη μεγαλύτερη αύξηση της έντασης καθ' ύψος κυρίως στην απόσταση 10cm κατάντη με τάξεις μεγέθους παρόμοιες με αυτές του τετραγώνου ενώ το ορθογώνιο  $L/D=2.5$  παρουσιάζει για πρώτη φορά τιμές περίπου ίδιες με ένα άλλο σχήμα, συγκεκριμένα με το ορθογώνιο  $L/D=2$  παραμένοντας όμως τα σχήματα με τη μικρότερη ένταση

Ο ρόμβος σε όλα τα σημεία και στις τρεις διευθύνσεις έχει τη μεγαλύτερη ένταση από όλα τα υπόλοιπα μεσόβαθρα. Η ένταση μειώνεται σε όλα τα σχήματα καθώς απομακρυνόμαστε από τη διατομή

γ) Σε ότι αφορά την τυρβώδη κινητική ενέργεια (TKE)

- i) Από την τυρβώδη κινητική ενέργεια αλλά και από την ένταση της τύρβης αντιλαμβανόμαστε καλύτερα την επιρροή των διαφορετικών σχημάτων ενός μεσόβαθρου στο φαινόμενο της τύρβης. Στα σχήματα με γωνίες είναι

φανερός ο ρόλος που διαδραματίζει ο λόγος  $L/D$ . Όσο μικρότερος, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η έκταση που λαμβάνει η τυρβώδη ροή κατάντη του μεσόβαθρου. Αυτό συμβαίνει γιατί στα σχήματα με μεγάλο μήκος, οι στρόβιλοι και οι δίνες που δημιουργούνται μόλις η ροή αποκολληθεί χάνουν ένα μέρος της ενέργειας τους όταν κινούνται στα πλάγια των τοιχωμάτων του μεσόβαθρου όποτε όταν εισέρχονται πίσω από το μεσόβαθρο, η αναταραχή της ροής είναι μικρότερη.

- ii) Ο κύλινδρος, που είναι το σχήμα χωρίς γωνίες όποτε θεωρείται ως το καταλληλότερο για την μείωση του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής, στο συγκεκριμένο πείραμα εμφανίζει τιμές στα μεγέθη της τύρβης σχεδόν ίδια με τα ορθογώνια και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις τα υπερβαίνει όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Υποθέτουμε πως συμβαίνει διότι ο κύλινδρος μας έχει μεγαλύτερο πλάτος που συναντά η ροή σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα πλην του ρόμβου, οπότε και τα μεγέθη είναι αναλογικά μεγαλύτερα σε σχέση με τον αν χρησιμοποιούσαμε κύλινδρο διαμέτρου  $D=4\text{cm}$
- iii) Ο ρόμβος παραμένει το σχήμα με την περισσότερη επιρροή στη τυρβώδη ροή. Η ΤΚΕ σε όλα τα σχήματα μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τη διατομή

Σε ότι αφορά τη δύναμη και το συντελεστή αντίστασης

- i) Ο ρόμβος δέχεται τη μεγαλύτερη δύναμη ενώ ο κύλινδρος τη μικρότερη Το τετράγωνο έρχεται δεύτερο και ακολουθούν το ορθογώνιο  $L/D=2$  και το ορθογώνιο  $L/D=2.5$
- ii) Τον μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης τον έχει το τετράγωνο ενώ το μικρότερο ο κύλινδρος. Ο λόγος  $L/D$  επηρεάζει και τον συντελεστή αντίστασης.
- iii) Ασαφής είναι τα αποτελέσματα του συντελεστή αντίστασης για τον ρόμβο. Ενώ τα υπόλοιπα σχήματα συμφωνούν με την βιβλιογραφία, ο ρόμβος στο πείραμα μας εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης. Ίσως επειδή ο ρόμβος διαταράσσει τόσο πολύ τη ροή που χρειάζονται επιπλέον μελέτη με περισσότερα δεδομένα για τον καλύτερο προσδιορισμό του συντελεστή αντίστασης

## 5.2 Παρατηρήσεις σχετικά με τα πειράματα

Στα αριστερά του κεντρικού άξονα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ταχύτητας από ότι στα δεξιά. Επίσης στις κατανομές των μεγεθών ανάντη των μεσόβαθρων παρατηρήθηκαν σημαντικές ασυνέχειες σε κάποια σημεία κυρίως στα ύψη  $4,5\text{cm}$  και  $9\text{cm}$ . Αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματα ιδιαίτερα στον υπολογισμό της δύναμης και

του συντελεστή αντίστασης. Η παλαιότητα του καναλιού του πειράματος, η διάβρωση και η φθορά με το χρόνο και μια ελαφριά κλίση που μπορεί να έχει ο πυθμένας, δημιουργούν ατέλειες και αλλοιώσεις που έχουν αντίκτυπο στην ποιότητα των μετρήσεων

### 5.3 Προτάσεις για το μέλλον

Η τεχνολογία του οργάνου μέτρησης των ταχυτήτων ADV δεν επιτρέπει την καταγραφή των ταχυτήτων στα βάθη ροής που είναι κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και μετρήσεις σε σημεία εξαιρετικά κοντά στο εμπόδιο. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν πολύ ενδιαφέρον επειδή όσο πιο κοντά στην επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες. Συνεπώς στα κατάντη του εμποδίου οι αναταραχές της ροής είναι μεγαλύτερες όποτε το φαινόμενο της τύρβης είναι και εντονότερο. Ομοίως για τα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά στο μεσόβαθρο. Προτείνεται η τεχνολογία του οργάνου μέτρησης LDV (Laser Doppler Velocimeter) που επιτρέπει την καταγραφή των ταχυτήτων σε δυσκόλως προσβάσιμα σημεία

Επίσης περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να γίνει με διαφορετικές παροχές και συνθήκες όπως συνθήκες υπερκρίσιμης ροής.

Σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής κυρίως στα κατάντη του εμποδίου παίζει το εύρος παρεμπόδισης της, δηλαδή το πλάτος του εμποδίου που συναντά η ροή. Συνεπώς είναι εξαιρετικά θεμιτό να πραγματοποιηθούν πειράματα με σχήματα που να έχουν ίδιο πλάτος προβολής στη ροή ούτως ώστε να μην λαμβάνουμε υπόψιν αυτό τον παράγοντα και να γίνει καλύτερη σύγκριση των διάφορων σχημάτων

Η μεγαλύτερη πρακτική επίδραση της τυρβώδους ροής σε μία γέφυρα είναι η υποσκαφή που δημιουργείται στο θεμέλιο του μεσόβαθρου από τους στροβιλισμούς και τις δίνες. Προτείνεται η προσθήκη μιας αντλίας φερτών ούτως ώστε να μελετηθεί το μέγεθος της υποσκαφής που προκαλεί το κάθε σχήμα

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### Ελληνικές βιβλιογραφικές αναφορές

- Λιακόπουλος Α, 2011, *Μηχανική Ρευστών*, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα
- Νάνου-Γιάνναρου Α.,2019, *Σημειώσεις Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων: Υδραυλική κλειστών αγωγών υπό πίεση* Διδακτικές σημειώσεις
- Νουτσόπουλος Γ., Γ.Χριστοδούλου, Τ. Παπαθανασιάδης, 2007, *Υδραυλική ανοιχτών αγωγών και ποταμών*, Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα.
- Νουτσόπουλος Γ., Γ.Χριστοδούλου,1996, *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών για Πολιτικούς Μηχανικούς*. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα.
- Παπακωνσταντής Η., 2017, *Πραγματικά Ρευστά*, Διδακτικές σημειώσεις
- Παπανικολάου Π. Ν., 2016, *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 4.
- Παπανικολάου Π. Ν., 2017, *Πειραματική Υδραυλική*, Διδακτικές σημειώσεις.
- Παπανικολάου Π. Ν.,2016 *Μηχανική Ρευστών-Τυρβώδη ροή*, Διδακτικές σημειώσεις

### Διεθνής βιβλιογραφικές αναφορές

- A. A. Beheshti , B. Ataie-Ashtiani,2016 *Scour Hole Influence on Turbulent Flow Field around Complex Bridge Piers* Springer Science and Business Media Dordrecht 2016
- A. A. Beheshti and B. Ataie-Ashtiani, 2010, *Experimental Study of Three-Dimensional Flow Field around a Complex Bridge Pier*, Journal of Engineering Mechanics, 136:143-154
- A. Keshavarzi , B. Melville , J. Ball, 2013, *Three-dimensional analysis of coherent turbulent flow structure around a single circular bridge pier*,<https://doi.org/10.1007/s10652-013-9332-1>
- A. Mashhadi , A. Sohankar , Md. Mahbub Alam, 2021, *Flow over rectangular cylinder: Effects of cylinder aspect ratio and Reynolds number*, International Journal of Mechanical Sciences 195 106264
- B. A. Vijayasree, T. I. Eldho, B. S. Mazumder & N. Ahmad (2017), *Influence of bridge pier shape on flow field and scour geometry*, International Journal of River Basin Management

- B. Dargahi, 1989, *The Turbulent Flow Field Around a Circular Cylinder*, Hydraulics Laboratory, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Charbeneau R.J., E.R. Holley, 2001, *Backwater Effects of Piers in Subcritical Flow.*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, Report FHWA/TX-0-1805-1.
- C. K. Shrestha, 2015, *Bridge Pier Flow Interaction and Its Effect on the Process of Scouring*, Faculty of Engineering and Information Technology University of Technology Sydney (UTS)
- C.Lin, T. Chun Ho, S. Dey ,2008, *Characteristics of Steady Horseshoe Vortex System near Junction of Square Cylinder and Base Plate*
- C.R. Suribabu, R.M. Sabarish, R. Narasimhan, A.R. Chandhru, 2011, *Backwater rise and Drag Characteristics of Bridge Piers under Sub-critical Flow Conditions*, Centre for Advanced Research in Environment, SASTRA University Thanjavur-613 401
- D. A. Lyn, 1993, *Turbulence measurements in open-channel flows over artificial beds for*, Journal of Hydraulic Engineering 119:306-326
- Dr. Bing-Chen Wang, 2017, *Chapter 4: Immersed Body Flow [pp. 445-459 (8e), or 374-386 (9e)]* , University of Manitoba, Winnipeg, MB, R3T 5V6
- D. Tordella , S. Scarsoglio, 2009, *The first Rcr as a possible measure of the entrainment length in a 2D steady wake*, Physics Letters A 373 (2009) 1159–1164
- F. Yan \*, H. Yang and L. Wang, 2021, *Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface*, Water, 13, 197.
- F.S. Peveira, G. Vaz, L. Eca, S.S. Girimaji, 2018, *Simulation of the flow around a circular cylinder at  $Re=3900$  with Partially-Averaged Navier-Stokes equations*, International Journal of Heat and Fluid Flow 69 234-246
- Fr. H White, 2011, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Book Company Seventh Edition, New York
- J.P. Gallardo, B. Pettersen & H. I. Andersson (2014), *Coherence and Reynolds stresses in the turbulent wake behind a curved circular cylinder*, Journal of Turbulence, 15:12, 883-904
- K. Shimada, T. Ishihara, 2002, *Application of a Modified  $k_\epsilon$  Model to the Prediction of Aerodynamic Characteristics of Rectangular Cross-section Cylinders*, Journal of Fluid and Structures 465-485
- M. J. E. Yazdi, A. B. Khoshnevis, 2020, *Comparing the wake behind circular and elliptical cylinders in a uniform current*, SN Applied Sciences 2:994  
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2698-z>

- M. S. Kirkgoz, M. Ardichoglu, 1997, *Velocity profiles of developing and developed open channel flow*, Journal of. Hydraulic. Engineering 123:1099-1105.
- N.-S Cheng, M. Wei, 2019, *Scaling of Scour Depth at Bridge Pier Based on Characteristic Dimension of Large-Scale Vortex*, Water 11, 2458
- P. Gautam, T.I. Eldho, B.S. Mazumder, M.R. Behera, 2018, *Experimental Study of Flow and Turbulence characteristics around Simple and Complex Piers using PIV*, Experimental Thermal and Fluid Science  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.09.010>
- R. Ghobadian , M.Basiri, Z.S.Tabar, 2018, *Interaction between channel junction and bridge pier on flow characteristics*, Alexandria Engineering Journal 57, 2787-2795
- S. Dey , D. Swargiary , S. Sarkar , H.Fang, R. Gaudio, 2018, *Turbulence features in a wall-wake flow downstream of a wall-mounted vertical cylinder*, European Journal of Mechanics / B Fluids (69) 46-61
- S.Z. Shuja, B.S. Yilbas, M.O. Budair, 2002, *Vortex shedding over a rectangular cylinder with ground effect: flow and heat transfer characteristics*, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow Vol 12. No. 8 916-939
- Skogerboe, Gaylord V.; Austin, Lloyd H, C. K.-Tao, "*Subcritical Flow at Open Channel*, Structures Bridge Constructions, 1970. Reports. Paper 92.
- V. T Chow, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company ,Tokyo, 1959
- W. Huang , Q.Yang , Hong Xiao, 2009, *CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers.*, Computers & Fluids 38 1050-1058
- X. Jin, P. Cheng, W-L. Chen, H. Lui, 2018, *Prediction model of velocity field around circular cylinders over various Reynolds numbers by fusion convolutional neural networks based on pressure on the cylinder*, Physics of Fluids 30 ,  
<https://doi.org/10.1063/15024595>