



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ  
ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ Α. ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗΣ

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γ. ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ  
τ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΣΤΑΜΟΥ  
τ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γ. ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ  
τ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. ΣΤΑΜΟΥ  
τ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. ΜΠΑΛΤΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Β. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. ΝΑΛΜΠΙΑΝΤΗΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Η. ΠΑΠΑΚΩΝΣΤΑΝΤΗΣ  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Στους αγαπημένους μου γονείς,  
Αναστασία και Ανέστη

## Περιεχόμενα

|  |            |
|--|------------|
| Περιεχόμενα.....   | 1          |
| Ευχαριστίες.....   | 2          |
| Πίνακας συμβόλων.....  | 3          |
| Περίληψη.....  | 5          |
| Extended Abstract.....   | 9          |
| <b>1) Εισαγωγή.....</b>  | <b>22</b>  |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή.....   | 22         |
| 1.2 Βλάστηση ποταμών.....  | 23         |
| 1.3 Διάρθρωση διδακτορικής διατριβής.....  | 28         |
| 1.4 Πρωτότυπα στοιχεία διδακτορικής διατριβής.....                               | 30         |
| <b>2) Βιβλιογραφική επισκόπηση.....</b>  | <b>32</b>  |
| <b>3) Θεωρητικό υπόβαθρο.....</b>  | <b>62</b>  |
| 3.1. Τυρβώδης ροή.....   | 62         |
| 3.2. Στατιστική ανάλυση τυρβωδών μεγεθών.....                                    | 62         |
| 3.3. Οριακό στρώμα πυθμένα.....  | 64         |
| 3.4. Διαστρωμάτωση της ροής παρουσία βλάστησης.....                              | 67         |
| 3.5. Διατμητικές τάσεις.....   | 70         |
| <b>4) Πειράματα.....</b>   | <b>72</b>  |
| 4.1. Πειραματική διάταξη.....  | 72         |
| 4.2. Όργανο μέτρησης ταχυτήτων και περιορισμοί πειραμάτων.....                   | 76         |
| 4.3. Προκαταρκτικά πειράματα.....  | 79         |
| <b>5) Αποτελέσματα.....</b>  | <b>84</b>  |
| 5.1. Προφίλ ταχύτητας.....   | 84         |
| 5.2. Διατμητικές τάσεις.....   | 97         |
| 5.3. Ένταση τύρβης.....  | 108        |
| 5.4. Συγκρίσεις με άλλες εργασίες.....   | 115        |
| 5.5. Κατάντη συνθήκες.....   | 123        |
| <b>6) Μοντέλα κατανομής ταχυτήτων.....</b>                                       | <b>132</b> |
| 6.1. Γενική επισκόπηση μοντέλων.....   | 132        |
| 6.2. Κατανομή ταχύτητας πάνω από τη βλάστηση.....                                | 134        |
| 6.3. Ενιαία κατανομή ταχύτητας.....  | 138        |
| 6.4. Αναλυτικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας για βλάστηση με σφαιρικό φύλλωμα..... | 141        |
| 6.5. Νέο αναλυτικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας.....                              | 150        |
| <b>7) Συμπεράσματα και προτάσεις.....</b>  | <b>158</b> |
| 7.1. Γενικά συμπεράσματα.....  | 158        |
| 7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....  | 161        |
| Δημοσιεύσεις από τη διατριβή.....  | 163        |
| Αναφορές.....  | 165        |
| Παράρτημα.....   | 171        |

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ανέστη και Αναστασία, οι οποίοι είναι δίπλα μου και υποστηρίζουν κάθε επιλογή και προσπάθεια μου. Επίσης, τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την δυνατότητα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο στα πλαίσια της διδακτορικής μου εργασίας αλλά και τον καθηγητή κ. Γιώργο Χριστοδούλου, επιβλέποντα της διατριβής για την άριστη και εγκάρδια σχέση μεταξύ μας αλλά και για την απεριόριστη βοήθεια και καθοδήγηση του από τον οποίο απέκτησα σημαντικότερα εφόδια για την μετέπειτα επαγγελματική και ακαδημαϊκή καριέρα μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους καθηγητές της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κυρίους Παναγιώτη Παπανικολάου και Αναστάσιο Στάμου, για τις σημαντικές και εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους καθώς και την συμβουλευτική και εγκάρδια σχέση που αναπτύχθηκε μεταξύ μας. Ειδικότερες ευχαριστίες στον κ. Παπανικολάου για την ανυπολόγιστη σε αξία συμβολή του κατά την αρχή της πειραματικής διαδικασίας χωρίς την οποία τίποτα δεν θα ήταν εφικτό. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους τεχνικούς εργαστηρίου κ. Μανόλη Λασηθιωτάκη και κ. Γιάννη Πατσέλη για την βοήθεια τους δίχως την οποία δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν τα πειράματα αλλά και για την συνεργασία και την συνέπεια τους παρόλο το φόρτο εργασίας τους σε άλλα μοντέλα του εργαστηρίου για τα οποία ήταν υπεύθυνοι. Γενικότερα, οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους άμεσα ή έμμεσα με βοήθησαν κατά την διάρκεια της ενασχόλησης μου με αυτήν τη διδακτορική διατριβή. Ειδικότερα, θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στον καθηγητή κ. Μαμάση για θέματα που αφορούσαν την διαμονή μου στις ΝΕΕΜΠ που ήταν απαραίτητη προϋπόθεση διεξαγωγής της διατριβής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους μου αλλά και όσους γνώρισα όλο το χρονικό διάστημα της διατριβής που υπήρξε το πιο γόνιμο της ζωής μου και συνέβαλαν τα μέγιστα στην διαμόρφωση μου σαν επαγγελματία, ακαδημαϊκό και κυρίως σαν άνθρωπο.

## Πίνακας συμβόλων

| Σύμβολο   | Περιγραφή   |
|---|---|
| a ή λ   | Λόγος της μετωπικής επιφάνειας βλάστησης ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα  |
| b   | Πλάτος ορθογωνικής διατομής αγωγού  |
| b <sub>0</sub>  | Ο λόγος u <sub>h</sub> /u*  |
| C   | Η σταθερά ολοκλήρωσης   |
| c, C <sub>S</sub> και C <sub>R</sub>  | Αριθμητικές σταθερές: προτεινόμενες τιμές c = 0,5, C <sub>S</sub> = 0,003 και C <sub>R</sub> = 0,3                                      |
| C <sub>1</sub>  | Συντελεστής που εξαρτάται από την πυκνότητα βλάστησης   |
| c <sub>1</sub>  | Παράμετρος αναλυτικής λύσης της εξίσωσης (6-34)   |
| C <sub>2</sub>  | Συντελεστής που εξαρτάται από την ευκαμψία της βλάστησης  |
| C <sub>D</sub>  | Ο συντελεστής τριβής  |
| C <sub>h</sub>  | Ο συντελεστής Chezy   |
| d   | Η απόσταση του επιπέδου μηδενικής ταχύτητας από τον πυθμένα   |
| d <sub>0</sub>  | Η διάμετρος του κυλινδρικού στοιχείου   |
| D <sub>z</sub>  | Διάμετρος βλάστησης σαν συνάρτηση του ύψους   |
| f   | Ο συντελεστής αντίστασης τριβών   |
| g   | Η επιτάχυνση βαρύτητας  |
| H   | Το βάθος ροής   |
| h   | Ύψος συστάδας   |
| h <sub>c</sub>  | Πάχος ζώνης σφαιρικής βλάστησης   |
| h <sub>p</sub>  | Απόσταση από το πέρας της υποζώνης σταθερής ταχύτητας μέχρι το ύψος πέρατος του μίσχου/κυλίνδρου  |
| h <sub>s</sub>  | Το βάθος του νερού πάνω από την κορυφή της βλάστησης  |
| h <sub>sp</sub>   | Το βάθος όπου οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μεταξύ ελεύθερης ροής και βλάστησης διεισδύουν στο στρώμα της συστάδας |
| h <sub>ssp</sub>  | Παράμετρος (h <sub>s</sub> + h <sub>sp</sub> )  |
| J <sub>0</sub> ή S <sub>0</sub>   | Η κλίση του πυθμένα του καναλιού  |
| k   | Τραχύτητα   |
| k <sub>1</sub>  | Τροποποιημένος συντελεστής von Karman   |
| k <sub>s</sub>  | Ισοδύναμη τραχύτητα   |
| m   | Η πυκνότητα βλάστησης (αριθμός στοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα)   |
| n   | Ο συντελεστής τραχύτητας Manning  |
| p, $\bar{p}$ , p'   | Στιγμιαία, μέση και τυρβώδεις διακυμάνση της πίεσης   |
| Q   | Παροχή  |
| R   | Η υδραυλική ακτίνα  |
| Re  | Ο αριθμός Reynolds  |
| S   | Το άθροισμα των κλίσεων του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας  |
| U   | Η μέγιστη ταχύτητα διατομής   |
| u, v, w   | Τοπικές στιγμιαίες ή μέσες χρονικά ταχύτητες κατά x (κατά μήκος του αγωγού), y (εγκάρσια), z (κατακόρυφα) αντίστοιχα                    |
| $\bar{u}$ , $\bar{v}$ , $\bar{w}$   | Τοπικές μέσες χρονικά ταχύτητες στους τρεις άξονες  |
| u', v', w'  | Τυρβώδεις διακυμάνσεις ταχύτητας στους τρεις άξονες   |
| $\overline{u'w'}$ , $\overline{u'v'}$ , $\overline{v'w'}$ ή<br><u'w'>, <u'v'>, <v'w'> | Μέση χρονικά τιμή γινομένων τυρβωδών διακυμάνσεων ταχύτητας   |

|   |  |
|---|--|
| $\overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2}$ ή $\langle u'^2 \rangle,$<br>$\langle v'^2 \rangle, \langle w'^2 \rangle$ | Μέση χρονικά τιμή των τετραγώνων των τυρβωδών διακυμάνσεων ταχύτητας   |
| $u_*$   | Η ταχύτητα τριβής  |
| $u_{*N}$  | Η τιμή της ταχύτητας τριβής που προκύπτει από το μοντέλο της Nepf  |
| $\langle u_{*R} \rangle$  | Η μέση τιμή των ταχυτήτων τριβής όλων των θέσεων για ένα δεδομένο πείραμα σύμφωνα με το μοντέλο του Raupach  |
| $u_c$   | Η ταχύτητα ζώνης σφαιρικής βλάστησης   |
| $u_h$ (ή $u_{\text{top}}$ )   | Η ταχύτητα στην κορυφή της βλάστησης   |
| $V$   | Η μέση ταχύτητα του νερού στη διατομή  |
| $x, y, z$   | Καρτεσιανές συντεταγμένες  |
| $z_0$   | Το ύψος τραχύτητας   |
| $z_1$   | Το ύψος από το πέρας της υποζώνης σταθερής ταχύτητας   |
| $z_c$   | Το ύψος από τη διεπαφή μεταξύ ζώνης σφαιρικής και κυλινδρικής βλάστησης  |
| $z_s$   | Το ύψος από το επίπεδο όπου οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μπορούν να διεισδύσουν στο στρώμα της συστάδας, ( $h_{sp}$ )  |
| $A$   | Το εμβαδό της διατομής του νερού   |
| $\alpha_0, \alpha_1 \dots \alpha_n$   | Παράμετροι εκθετικής σειράς  |
| $\alpha_1$  | Ο λόγος $h/H$  |
| $\alpha_2$ και $b_1$  | Συντελεστές που σχετίζονται με την κλίση της κατανομής και το πλάτος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης ταχύτητας κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα του καναλιού, αντίστοιχα |
| $A_v$   | Το εμβαδό της μετωπικής επιφάνειας της βλάστησης   |
| $\delta$  | Πάχος οριακού στρώματος  |
| $\delta'$   | Πάχος στρωτού οριακού υποστρώματος   |
| $\delta_e$  | Βάθος διείσδυσης στροβίλων στην ζώνη των κυλινδρικών στοιχείων   |
| $Z, z$  | Η απόσταση (ύψος) από τον πυθμένα  |
| $\eta$  | Προσδιοριστέα σταθερά  |
| $\kappa$  | Ο συντελεστής von Karman   |
| $\nu$   | Κινηματική συνεκτικότητα   |
| $\rho$  | Πυκνότητα  |
| $\tau$  | Στιγμιαία ή μέση τοπική διατμητική τάση  |
| $\tau_0$  | Μέση διατμητική τάση ορίου   |
| $\tau_1$  | Στρωτή διατμητική τάση   |
| $\tau_t$  | Τυρβώδης διατμητική τάση   |
| $\tau_{\text{tot}}$   | Συνολική διατμητική τάση   |
| $\tau_{xz}$   | Η διατμητική τάση σε κατακόρυφο επίπεδο παράλληλο προς την κύρια διεύθυνση της ροής  |
| $Y$   | Ο λόγος $z/h$  |
| $\varphi_1$   | Παράμετρος εκθετικής σειράς  |
| $\Psi_h$ και $c_{d1}$   | Αριθμητικές σταθερές με προτεινόμενες τιμές $\Psi_h = 0,193$ και $c_{d1} = 7,5$  |
| $\omega$  | Παράγοντας που εξαρτάται από την γεωμετρία βλάστησης   |
| $\Omega$  | Παράγοντας που προκύπτει από προσαρμογή στα συγκεκριμένα πειράματα   |

## Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκε η συμπεριφορά του πεδίου ταχυτήτων σε ένα ανοικτό αγωγό παρουσία βλάστησης. Η επίδραση της βλάστησης στην ροή ποταμού παλαιότερα θεωρούταν ως όχληση λόγω της αντίστασης που προέβαλε στην ροή και ως επιπλέον τραχύτητα στον πυθμένα του καναλιού, με αποτέλεσμα την στόχευση της αφαίρεσης της για να αποφευχθεί η μείωση της παροχαρακτηριστικότητας και το ενδεχόμενο πλημμύρας. Στην σύγχρονη εποχή όμως αυτός ο τρόπος διαχείρισης έχει αντικατασταθεί καθώς αναγνωρίζονται τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει η βλάστηση, όπως την αύξηση της σταθερότητας των οχθών, τη μείωση της διάβρωσης και της θολότητας του νερού κλπ. Γενικότερα, η υδρόβια βλάστηση παρέχει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών στα οικοσυστήματα όπως η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και η παραγωγή οξυγόνου που βελτιώνουν την ποιότητα του νερού.

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιήθηκαν πολλές έρευνες για την κατανόηση και την ποσοτικοποίηση των φυσικών διαδικασιών που διέπουν τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ ροής νερού και βλάστησης. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές είναι πολύπλοκες και εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και από τα χαρακτηριστικά του φυτού όπως το μέγεθος, η γεωμετρία, η πυκνότητα, η ευκαμψία και η σχετική βύθιση της βλάστησης. Σε παλαιότερες έρευνες επιχειρήθηκε η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της βλάστησης με ενσωμάτωσή της στους συντελεστές αντίστασης, όπως π.χ. στον συντελεστή Manning  $n$ , ή με κατάλληλη τροποποίηση της σχέσης Prandtl – von Karman (εξωτερικός νόμος) για ροή πάνω από επίπεδη πλάκα. Από νεώτερες προσεγγίσεις διαφαίνεται ότι το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα S και η κατανομή πάνω από την συστάδα της βλάστησης ακολουθεί έναν λογαριθμικό νόμο. Καθώς αναπτύσσονται πιο περίπλοκα αριθμητικά εργαλεία για τη μοντελοποίηση των διαδικασιών αλληλεπίδρασης ροής-βλάστησης, η ανάγκη για λεπτομερή πειραματικά δεδομένα γίνεται όλο και πιο σημαντική, τόσο για την καλύτερη κατανόηση των υποκείμενων φαινομένων όσο και για σύγκριση και επαλήθευση. Η παρούσα εργασία στοχεύει να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού παρέχοντας λεπτομερείς μετρήσεις και ολοκληρωμένη σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής, δηλαδή των κατανομών ταχύτητας, των τυρβωδών εντάσεων και διατμητικών τάσεων, για τρεις τύπους τεχνητών στοιχείων βλάστησης με διαφορετική γεωμετρία και χαρακτηριστικά όπως ακαμψία και πορώδες (δύο άκαμπτα και ένα ημιάκαμπτο), όλα με παρόμοιες πυκνότητες.

Μετά από μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, παρουσιάζεται συνοπτικά το θεωρητικό υπόβαθρο για την παρούσα εργασία με βάση τη θεωρία της τυρβώδους ροής και του οριακού στρώματος και γίνεται αναφορά σε θεωρητικά στοιχεία για την διαστρωμάτωση ροής με παρουσία βλάστησης καθώς και για τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στα διάφορα στρώματα ροής.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακό κανάλι μήκους 16 m και πλάτους



0,50 m με κλίση 0,001. Τα στοιχεία βλάστησης τοποθετήθηκαν στο μεσαίο τμήμα του καναλιού, σε διατρημένο ψευδο-πυθμένα μήκους 8 μέτρων που εκτείνεται 5 m από την αρχή του καναλιού μέχρι 3 m από το τέλος του. Ανάντη και κατάντη του διάτρητου αυτού του πυθμένα προσαρμόστηκαν κανονικοί μη διάτρητοι πυθμένες ώστε να προκύψει ένας ενιαίος. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι στοιχείων, που μιμούνται βυθισμένα μικρά φυτά με άκαμπτους μίσχους και πυκνό ή αραιό φύλλωμα ή χωρίς φύλλωμα: (α) Απλές ράβδοι διαμέτρου 0,5 cm και ύψους 4 cm, β) Σύνθετα στοιχεία αποτελούμενα από πλαστικές σφαίρες διαμέτρου 3,0 cm που στερεώνονται πάνω από λεπτές ράβδους διαμέτρου 0,8 cm και ύψους 5 cm, γ) Σύνθετα στοιχεία που αποτελούνται από εύκαμπτες βελόνες διατεταγμένες αξονο-συμμετρικά πάνω από τις ίδιες ράβδους. Για όλους τους τύπους στοιχείων, δοκιμάστηκαν δύο μοτίβα τοποθέτησης, σε παράλληλο και κλιμακωτό πλέγμα 10x10 cm, αποδίδοντας αντίστοιχες πυκνότητες 100 και 200 στελεχών/m<sup>2</sup>.

Η παροχή μετρήθηκε μέσω μετρητή Venturi και διαφορικού μανόμετρου εγκατεστημένου στη γραμμή τροφοδοσίας του εργαστηρίου με ακρίβεια  $\pm 0,5$  l/s, ενώ το βάθος ροής καταγράφηκε με σταθμήμετρο κατά μήκος του άξονα του καναλιού με ακρίβεια  $\pm 0,2$  cm. Το βάθος ελέγχονταν από ένα θυρόφραγμα που βρίσκεται στο τέλος του καναλιού έτσι ώστε να παραμένει σταθερό πάνω από την περιοχή των μετρήσεων. Η παροχή  $Q = 41$  l/s και το βάθος ροής  $H = 25$  cm επιλέχθηκαν μετά από προκαταρκτικά πειράματα και ήταν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα χωρίς βλάστηση για την ίδια παροχή και βάθος επίσης για λόγους σύγκρισης. Οι μετρήσεις ταχύτητας ελήφθησαν μέσω ενός τρισδιάστατου οργάνου ADV (ADV LabVer. 2.7 Probe N0187 Nortec AS) με ακρίβεια  $\pm 0,01$  cm/s, σε 6-9 κατακόρυφες γραμμές σε επιλεγμένες θέσεις εντός της συστοιχίας βλάστησης.

Παρουσιάζονται λεπτομερή πειραματικά αποτελέσματα σε διαγραμματική μορφή. Συγκεκριμένα (α) κατακόρυφες κατανομές των ταχυτήτων  $u$  κατά την κύρια διεύθυνση της ροής, (β) κατακόρυφες κατανομές των τυρβωδών διατμητικών τάσεων  $\tau_{xz}/\rho = -\overline{u'w'}$  και (γ) κατακόρυφες κατανομές της έντασης της τύρβης σε όλες τις θέσεις μέτρησης για κάθε πείραμα. Στις κατανομές ταχυτήτων εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μια σημαντική μείωση της ταχύτητας (σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση) που εκτείνεται αρκετά πάνω από την κορυφή των στοιχείων. Η μείωση της ταχύτητας είναι σαφώς πιο έντονη στις περιπτώσεις των σύνθετων στοιχείων, με ελάχιστες τιμές στο ύψος του ογκώδους τμήματος του στοιχείου στις εγγύτερες προς αυτά θέσεις. Γενικά, οι ελάχιστες ταχύτητες εμφανίζονται κάπως υψηλότερα στα πειράματα με το άκαμπτο φύλλωμα (περίπου στο επίπεδο του κέντρου της σφαίρας), ενώ στα πειράματα με τα ημιάκαμπτα στοιχεία βρίσκονται περίπου στη βάση του εύκαμπτου φυλλώματος. Σε όλες τις περιπτώσεις η μείωση της παρατηρούμενης ταχύτητας μέσα στη διάταξη της βλάστησης φαίνεται να αντισταθμίζεται στην περιοχή πάνω από τα στοιχεία.

Όσον αφορά τις τυρβώδεις τάσεις  $\tau_{xz}$ , παρατηρούνται πολύ υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση. Αξιοσημείωτη είναι η εξαιρετικά ανομοιόμορφη κατανομή που εμφανίζεται στις περισσότερες θέσεις μέτρησης εντός της συστοιχίας βλάστησης, υποδηλώνοντας την ανάπτυξη έντονων στρωμάτων διάτμησης. Επιπλέον, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις κατανομές διατμητικών τάσεων μεταξύ των θέσεων μέτρησης σε κάθε πείραμα. Οι διατμητικές τάσεις τείνουν να επιτυγχάνουν τη μέγιστη τιμή τους κυρίως κοντά στην κορυφή της συστοιχίας και αργά μειώνονται με το ύψος πάνω από την κορυφή. Οι τάσεις κάτω από την κορυφή είναι γενικά μικρότερες. Αυτή η συμπεριφορά είναι αντίθετη με την περίπτωση της ροής χωρίς βλάστηση, όπου οι διατμητικές τάσεις είναι μεγαλύτερες κοντά στον πυθμένα και σταδιακά μειώνονται με το ύψος.

Η ένταση τύρβης είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση, εντός και πάνω από την συστοιχία βλάστησης. Πάνω από την συστοιχία βλάστησης φαίνεται για όλες τις περιπτώσεις οι εντάσεις να συγκλίνουν, να είναι σχεδόν σταθερές και να προσεγγίζουν την κατανομή της έντασης τύρβης για την περίπτωση χωρίς βλάστηση χωρίς όμως να την φθάνουν ποτέ ενώ είναι εμφανής μια μικρή πτωτική τάση της έντασης τύρβης καθώς ανερχόμαστε προς την ελεύθερη επιφάνεια. Αντίθετα, παρατηρείται σημαντική αύξηση της έντασης στο επίπεδο του ογκώδους τμήματος των στοιχείων της βλάστησης και προς την περιοχή της κορυφής της σε όλες τις περιπτώσεις, οφειλόμενη στην έντονη μείωση της ταχύτητας σε αυτό το επίπεδο. Κοντά στα στοιχεία παρατηρείται έντονη διακύμανση με μέγιστο κοντά ή και πάνω από την κορυφή των στοιχείων, ενώ φαίνεται ότι η ένταση τύρβης εξαρτάται από το μέγεθος και την γεωμετρία του στοιχείου βλάστησης αλλά και την πυκνότητά της, με αποτέλεσμα να παίζει σημαντικό ρόλο η απόσταση από το κοντινότερο στοιχείο βλάστησης.

Περαιτέρω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ μεγεθών και επιχειρείται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών που αφορούν παρόμοιες διατάξεις βλάστησης (Fairbanks 1998, Dunn et al. 1994, Li et al. 2014). Τέλος, επιχειρήθηκε μια πειραματική διερεύνηση στην περιοχή κατάντη της βλάστησης καθώς η βιβλιογραφία είναι πολύ φτωχή στο θέμα αυτό και είναι εύλογο ότι το πεδίο των ταχυτήτων δεν μπορεί να επανέλθει ακαριαία μετά το πέρας της περιοχής βλάστησης.

Στο τελικό στάδιο της διατριβής γίνεται γενική επισκόπηση μοντέλων κατανομής ταχυτήτων που έχουν ερευνηθεί εκτενώς αλλά ένα παγκοσμίως αποδεκτό μοντέλο είναι ακόμα ανέφικτο. Γενικά υπάρχουν δύο τύποι προσέγγισης για ροές με βλάστηση, διστρωματική και τριστρωματική. Στην πρώτη, η κορυφή της συστάδας ορίζει σαφώς μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρωμάτων, πάνω και εντός της βλάστησης ενώ στην δεύτερη το προφίλ ταχύτητας μπορεί χονδρικά να χωριστεί σε τρεις υδροδυναμικές ζώνες: μία εντός της συστάδας, μία πάνω από την συστάδα και μία ενδιάμεση μεταβατική. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται και συγκρίνονται με τα

πειραματικά αποτελέσματα δυο μοντέλα για την κατανομή ταχύτητας πάνω από τη βλάστηση, του Raupach (1994) και της Nepf (2012b) που βασίζονται στην ίδια κύρια εξίσωση (λογαριθμική), με διαφορές στον τρόπο υπολογισμού των βασικών παραμέτρων των μοντέλων. Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε η εφαρμογή μιας ενιαίας κατανομής και επιλέχθηκε ένα σχετικά απλό μοντέλο (Carollo et al. 2002). Αν και για βλάστηση χωρίς φύλλωμα το μοντέλο αυτό παρέχει καλή εφαρμογή με τις μετρήσεις σε ολόκληρη τη στήλη νερού όπου η ταχύτητα μειώνεται ομαλά προς τον πυθμένα (εκτός από θέσεις που βρίσκονται πολύ κοντά στα στοιχεία και εμφανίζεται απότομη μείωση), δεν συμβαίνει το ίδιο για τη βλάστηση με φύλλωμα. Σε αυτή την περίπτωση η κατανομή παρουσιάζει γενικά μια ελάχιστη τιμή στο επίπεδο του φυλλώματος και είναι αδύνατο να περιγραφεί από ένα ενοποιημένο μοντέλο, καθιστώντας αναγκαία την δημιουργία ενός σύνθετου μοντέλου κατανομής ταχύτητας βασιζόμενο στην διαστρωμάτωση της ροής. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται δύο νέα μοντέλα με διαχωρισμό της ροής σε ζώνες: (α) ένα για βλάστηση με σφαιρικό φύλλωμα, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας από Κινέζους ερευνητές βασισμένο σε προκαταρκτικά πειράματα της παρούσας εργασίας, και (β) ένα γενικότερο πιο απλοποιημένο μοντέλο με στόχο να μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε γεωμετρία βλάστησης και το οποίο προκύπτει από συνδυασμό υπαρχουσών θεωριών. Η συμφωνία του νέου μοντέλου κατανομής ταχύτητας με τα πειραματικά δεδομένα κρίνεται ικανοποιητική.

# EXPERIMENTAL STUDY OF FLOW IN AN OPEN CHANNEL WITH SIMULATED VEGETATION

## Extended Abstract

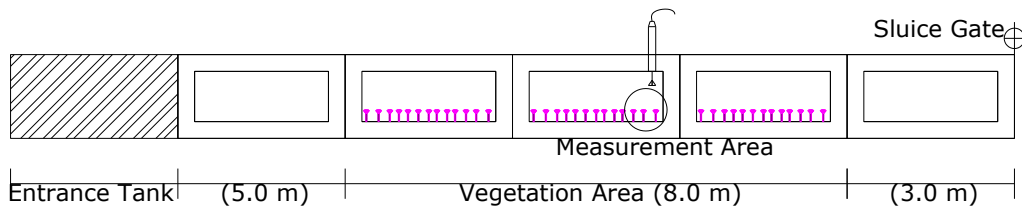
In this doctoral thesis, the behavior of the flow field in an open channel in the presence of vegetation was studied. The effect of vegetation on river flow was previously considered a nuisance due to the resistance it offered to flow so that it was often removed to avoid reduced channel capacity and higher risk for flooding. In modern times, however, the important environmental benefits offered by vegetation are recognized, such as increasing bank stability, reducing erosion and water turbidity, and providing a wide range of services to ecosystems such as shelter for aquatic life, nutrient uptake and oxygen production that improve water quality.

In recent years, much research has been conducted to understand and quantify the physical processes that govern the complex interaction between water flow and vegetation. These interactions depend on environmental factors and plant characteristics such as relative submergence, flexibility, size and density of vegetation. Early studies attempted to quantify the effect of vegetation on channel roughness either by incorporating it into the resistance coefficients such as the Manning coefficient  $n$ , or by properly modifying the velocity distribution over a smooth flat plate given by the Prandtl – von Karman relation (external law of the wall). More recent research suggests that the vertical velocity profile often has a characteristic S-shape and the distribution over the canopy follows approximately a logarithmic law. As more sophisticated numerical tools are developed to model the complex flow–vegetation interaction processes, the need for detailed experimental data becomes increasingly important, both for a better understanding of the underlying phenomena and for comparison and verification. The present work aims to contribute to filling this gap by providing detailed measurements and comprehensive comparison of key flow field characteristics, i.e. velocity profiles, turbulent intensities and turbulent shear stresses, for three types of artificial vegetation elements with different geometries and characteristics such as stiffness and porosity (two rigid and one semi-rigid), all with similar densities.

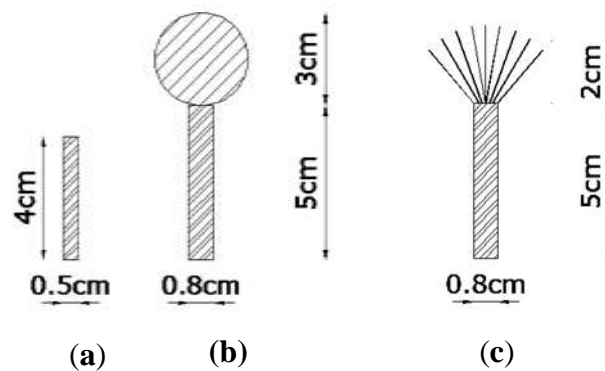
After an extensive literature review, the theoretical background for the present work is briefly presented, based on the theory of turbulent flow and boundary layer, followed by a discussion of flow stratification in the presence of vegetation and for the shear stresses that develop in the various flow layers.

A laboratory channel 16 m long and 0.50 m wide with a slope of 0.001 was used for the experiments (Figure 1). Vegetation elements were placed in the middle part of the channel, on an 8 m long perforated pseudo-bottom extending 5 m from the beginning of the channel to 3 m from its end. Upstream and downstream of this perforated bottom normal non-perforated bottoms were fitted to produce a straight bed. Three

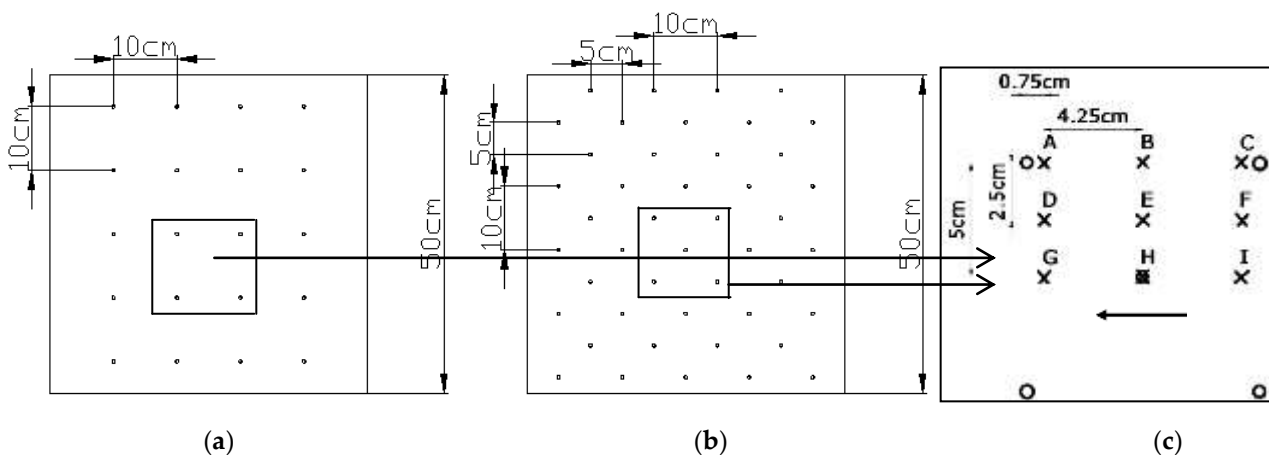
types of elements were used (Figure 2), mimicking submerged small plants with rigid stems and dense or sparse foliage or no foliage: (a) Simple rods 0.5 cm in diameter and 4 cm high, b) Compound elements consisting of 3.0 cm diameter plastic spheres fixed over thin rods 0.8 cm in diameter and 5 cm high, c) Compound elements consisting of flexible needles arranged axisymmetrically over the same rods. For all element types, two placement patterns were tested (Figure 3a, b), in a parallel and staggered 10x10 cm grid, yielding respective densities of 100 and 200 stems/m<sup>2</sup>.



**Figure 1.** Sketch of the channel's side view



**Figure 2.** Vegetation elements: (a) simple rod, (b) compound rigid and (c) compound semi-flexible



**Figure 3.** Vegetation patterns (a) parallel at 100 stems/m<sup>2</sup> and (b) staggered at 200 stems/m<sup>2</sup>, (c) Measurement locations (x) within the vegetation array (arrow denotes the flow direction).

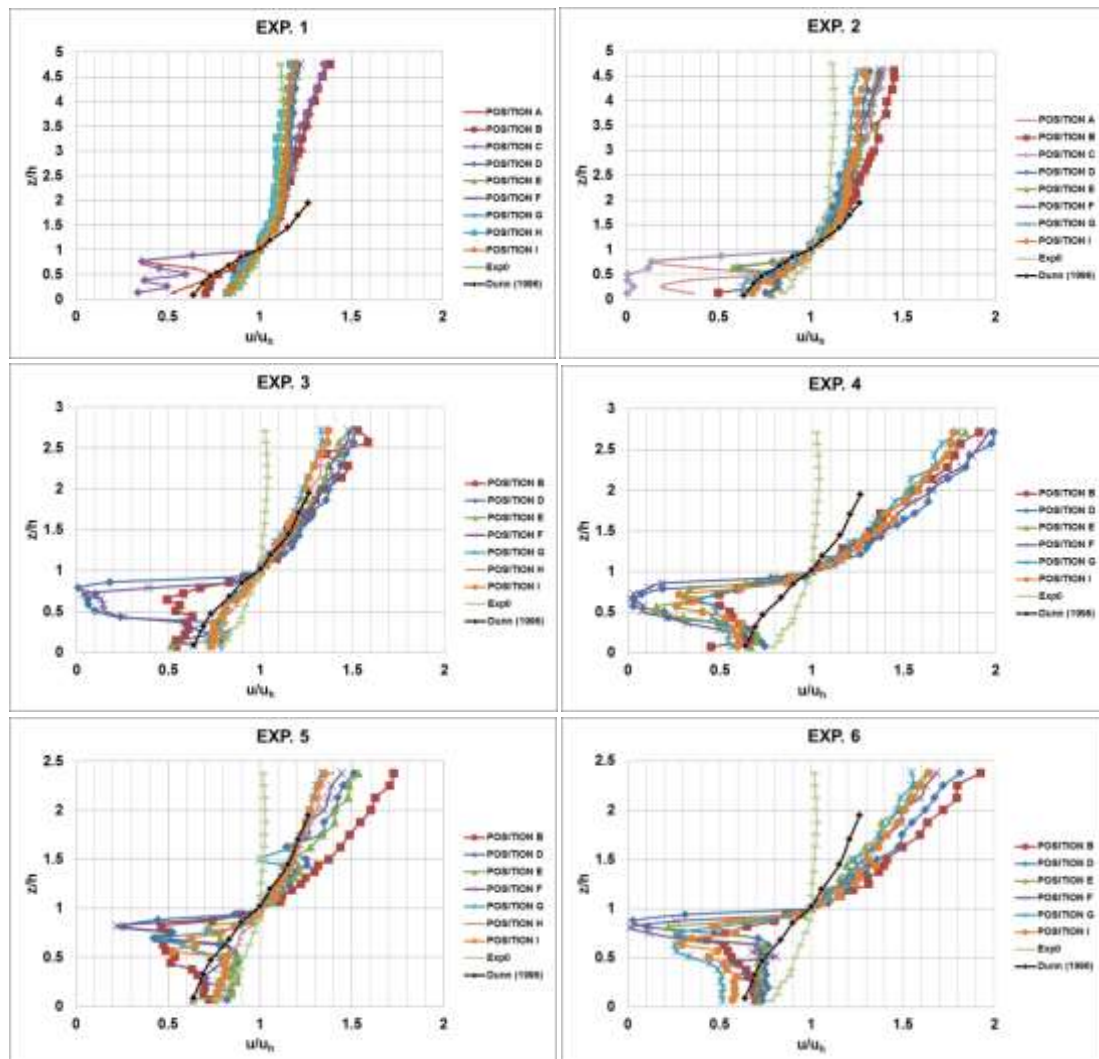
**Table 1.** Sets of experiments

| Experiment | Vegetation pattern | Vegetation type       | Vegetation density (stems/m <sup>2</sup> ) | Element height h (cm) | Frontal density $\lambda$ | Submergence ratio H/h |
|------------|--------------------|-----------------------|--|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| Exp0       | no vegetation      |                       |  |                       |                           |                       |
| Exp1       | parallel           | simplerigid           | 100  | 4                     | 0.020                     | 6.250                 |
| Exp2       | staggered          | simplerigid           | 200  | 4                     | 0.040                     | 6.250                 |
| Exp3       | parallel           | compoundsemi-flexible | 100  | 7                     | 0.071                     | 3.571                 |
| Exp4       | staggered          | compoundsemi-flexible | 200  | 7                     | 0.142                     | 3.571                 |
| Exp5       | parallel           | compoundrigid         | 100  | 8                     | 0.111                     | 3.125                 |
| Exp6       | staggered          | compoundrigid         | 200  | 8                     | 0.222                     | 3.125                 |

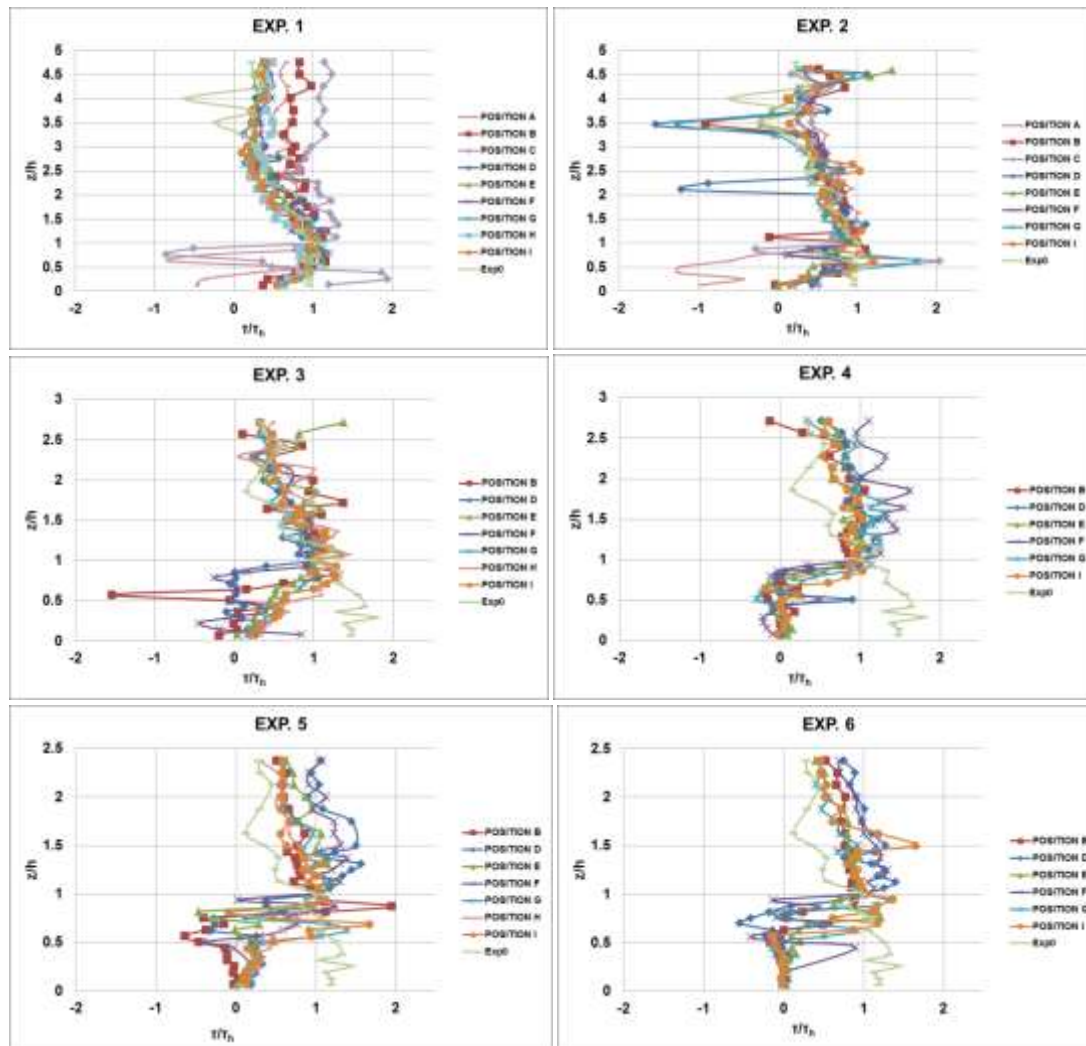
The flow rate was measured via a Venturi meter and a differential manometer installed in the laboratory supply line with an accuracy of  $\pm 0.5$  l/s, while the flow depth was recorded with a point gauge along the axis of the channel with an accuracy of  $\pm 0.2$  cm. The depth was controlled by a sluice gate located at the end of the channel so that it remained constant over the measurement area. The flow rate  $Q = 41$  l/s and the flow depth  $H = 25$  cm were chosen after preliminary experiments and were constant throughout the experiments. A no-vegetation experiment for the same flow rate and depth was also performed for comparison. Velocity measurements were taken via a 3D Acoustic Doppler Velocimeter (ADV LabVer. 2.7 Probe N0187 Nortec AS) with an accuracy of  $\pm 0.01$  cm/s, in 9 vertical lines at selected locations within the vegetation array (Figure 3c). The ADV instrument operates at a specific frequency of 25 Hz and each measurement lasted 2 minutes. A limited number of measurements were also made at selected locations downstream of the vegetated area in an effort to evaluate the extent of the influence of vegetation on the flow field downstream of it. Detailed data of all experiments are presented at the Appendix.

The main experimental results are shown in dimensionless form in the following figures: (a) in Figure 4 vertical distributions of velocities  $u$  along the main flow direction, (b) in Figure 5 vertical distributions of turbulent shear stresses  $\tau_{xz}/\rho = -\overline{u'w'}$  and (c) in Figure 6 vertical distributions of turbulence intensity, at all measurement locations for each experiment. In all cases the vertical coordinate  $z$  is normalized with the respective vegetation element height  $h$ ; in Figs 4 and 5, the local velocities and shear stresses are normalized with the respective value at the top of the element, whereas in Fig.6 the turbulence intensity  $u_{RMS}(\sqrt{u'^2})$  is normalized with the local value of velocity  $u$ . As seen in Fig.4, there is in almost all cases a significant decrease in velocity (compared to the case without vegetation) which extends well above the top of the elements. The decrease in velocity is clearly more pronounced for the compound elements, with peaks at the height of the bulky part of the element. In general, the minimum velocities appear somewhat higher in the experiments with the rigid foliage (around the level of the center of the sphere), while in the experiments with the semi-rigid elements they are at about the base of the flexible foliage. In all

cases the observed velocity reduction within the vegetation appears to be compensated for in the area above the elements. In the same figure the results reported by Dunn et al (1996) are shown for comparison. These are spatial average values for a staggered array of simple rods, somewhat similar to the present Exp2, but with different spacing and dimensions of the elements. It is noticed that for this experiment, excluding the positions A and C which are very close to the elements, the profiles in the other measurement positions are in good agreement with Dunn et al's, the latter ascending more steeply above the top of vegetation due to shorter distance to the free surface. On the contrary, in other experiments considerable differences are observed, highlighting the importance of element geometry and location in the array.



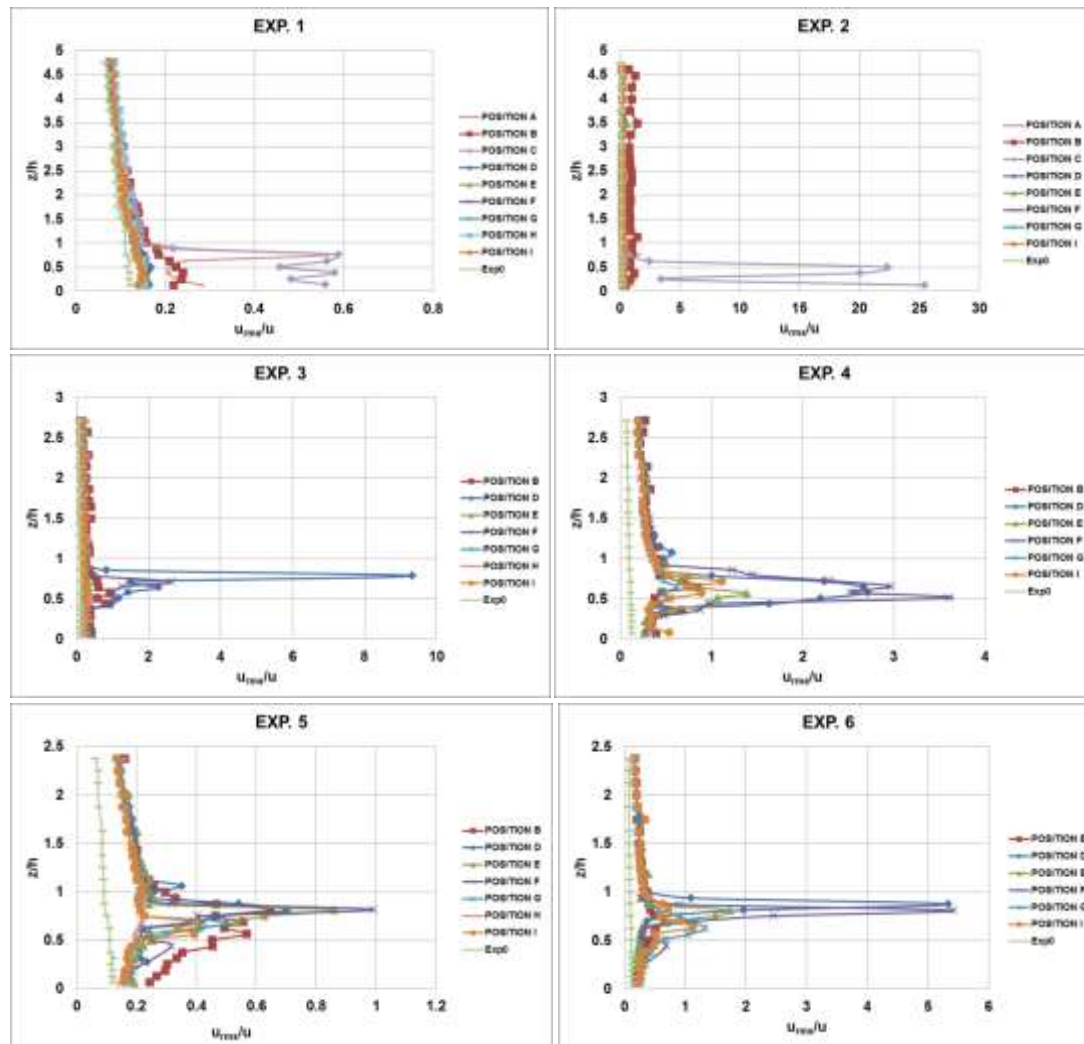
**Figure 4.** Normalized vertical velocity profiles



**Figure 5.** Normalized turbulent shear stress profiles

Regarding the turbulent stresses  $\tau_{xz}$ , much higher values are observed compared to the unvegetated case, generally increasing upwards but also having a decreasing or stabilizing trend near the free surface. Of particular note is the highly nonuniform distribution occurring at most measurement sites within the vegetation array, suggesting the development of intense shear layers. Furthermore, there are no significant differences in the shear stress distributions between the measurement locations in each experiment. Shear stresses tend to reach their maximum value mostly near the top of the array and slowly decrease with height above the top; below the top they are generally smaller. This behavior is opposite to the case of unvegetated flow, where shear stresses are greatest near the bottom and gradually decrease with height.



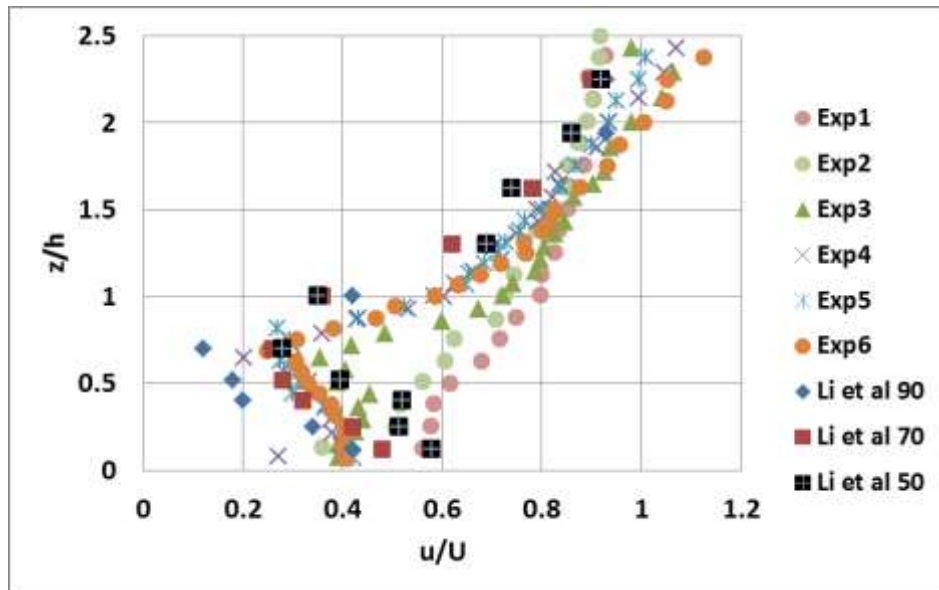


**Figure 6.** Profiles of turbulence intensity

Turbulence intensity is higher compared to the unvegetated case, within and above the vegetation array. Also, above the vegetation array, the intensities appear for all cases to converge, to be almost constant and to approach the distribution for the case without vegetation but never reaching it, while a slight decreasing trend is evident towards the free surface. On the contrary, one may observe a remarkable increase in intensity at the level of the massive part of the vegetation elements and towards the top in all cases. This is obviously due to the sharp reduction of the respective mean velocity at this level. Close to the elements, a strong variation is observed, with a maximum near or even above the top of the elements. In general, the turbulence intensity depends on the size and geometry of the vegetation elements and the density of the array, but most importantly on the proximity to the vegetation element.

Figure 7 illustrates a comparison of the velocity profiles of the present experiments with those of Li et al. (2014), where compound elements relatively similar to the present ones but flexible, resembling the species *Hydrilla verticillate*, were used at three densities (50, 70 and 90 stems/m<sup>2</sup>). Considering the differences in elements

dimensions, flexibility and density, the agreement for the experiments with the compound elements is satisfactory.



**Figure 7.** Comparison of dimensionless velocity profiles for all experiments with those of Li et al. (2014) in position B

The main conclusions from the experimental measurements may be summarized as follows:

- a. There are considerable differences in the local flow conditions depending on the location within the vegetation array, the proximity to elements and the type of element. This implies that data obtained at a single location or by spatial averaging are inadequate to describe the true nature of flow within the vegetation.
- b. Overall, the effect of foliage is very important, yielding considerably higher velocity reduction, higher shear stresses and turbulence intensity compared to simple stems without foliage. However, the type of foliage, i.e., rigid or semi-flexible of about similar size, appears of minor significance.
- c. For all types of elements, the effect of vegetation on the flow parameters measured increases with its density.
- d. In general, severe reduction of velocity occurs within the canopy below the top of the elements, which is more pronounced for the compound elements compared to simple stems. The minimum velocities are observed at the level of the foliage, i.e., at the upper (bulkier) part and tend to zero at certain locations off the elements alignment.
- e. The turbulent shear stresses are mostly higher above the top of the canopy than

below. Within the canopy they are comparable to the no-vegetation case in the experiments with simple stems, but smaller for the compound elements.

f. The relative turbulence intensity in the case of simple stems is somewhat higher than without vegetation and decreases gradually with distance from the bottom whereas in the presence of foliage it is much higher within the canopy, due to severe reduction of local mean velocity in that area.

g. The presence of vegetation affects the flow field downstream, and the effect is higher for the elements with foliage and for the denser pattern. The distance affected is at least twice the vegetation width and needs further investigation.

For a quantitative assessment of the velocity field a general overview of velocity distribution models in vegetated flow was made. Considerable research has been carried out previously but a universally accepted model is still unattainable. There are generally two types of approaches, two-layer and three-layer. In the former, the top of the canopy clearly defines an interface between two layers, above and within the vegetation, while in the latter the velocity profile can be roughly divided into three hydrodynamic zones: one within the canopy, one above the canopy, and an intermediate transition. More specifically, two models for the velocity distribution above vegetation are considered, by Raupach (1994) and Nepf (2012b), based on essentially the same logarithmic equation (1) with differences in the way the main parameters of the models are calculated. In particular, Raupach employed Equation (1) for the velocity distribution above terrestrial canopies, considering the height  $h$  of vegetation elements and the frontal density  $\lambda$  as independent variables.

$$u/u^* = 1/\kappa \ln((z - d)/z_0) \quad (1)$$

He found that the ratio of the shear velocity  $u^*$  to the velocity  $u_h$  at the top of the canopy may be expressed as:

$$\gamma = u_h/u^* = \exp(c\lambda\gamma/2)(C_S + C_R\lambda)^{-0.5} \quad (2)$$

where  $c$ ,  $C_S$  and  $C_R$  are numerical constants with proposed values  $c = 0.5$ ,  $C_S = 0.003$  and  $C_R = 0.3$ . Equation (2) requires an iterative solution to obtain  $u_h/u^*$ . Furthermore, he proposed the following equations for the zero-plane displacement height  $d$  and the roughness height  $z_0$ :

$$z_0/h = (1 - d/h)\exp(-\kappa u_h/u^* - \Psi_h) \quad (3)$$

$$1 - d/h = [1 - \exp(-(c_{d1}2\lambda)^{0.5})]/(c_{d1}2\lambda)^{0.5} \quad (4)$$

where  $\kappa = 0.4$  is the von Karman constant, and  $\Psi_h$  and  $c_{d1}$  are numerical constants,

with proposed values  $\Psi_h = 0.193$  and  $c_{d1} = 7.5$ .

The approach of Raupach was implemented in the context of the present study as follows: First, for each set of experiments, the values of  $u_h/u^*$ ,  $d$  and  $z_0$  were evaluated based on Equations (2), (3) and (4) according to the respective value of  $\lambda$  shown in Table 1. Then, the logarithmic law (Equation (1)) was fitted to the velocity measurements for  $z > h$  at each measurement position. Thus, the local value of  $u^*$  was obtained as the slope of the fitting line in a semi-log plot. In general, a very good fit was observed, thus confirming the validity of Equation (1). In fact, in several cases, its applicability appeared to extend below the top of the canopy.

The values of  $u^*$  for all experiments and positions, as well as those of  $d$  and  $z_0$ , are listed in Table 2. One may notice that: (a) for any given position, the values of  $u^*$  are considerably larger for the compound elements compared to the simple rods as well as for the staggered (denser) pattern compared to the parallel one; (b) the values of  $u^*$  for the two types of compound elements are about the same for the sparse (parallel) placement pattern, although the frontal density  $\lambda$  is appreciably different; (c) the values of  $d$  and  $z_0$  are also larger for the compound elements, but they differ appreciably between the two types of compound elements; and (d) for a given experiment, three groups of nearly identical  $u^*$  values at positions along lines parallel to the elements' alignment may be identified, i.e., at (A,B,C), (D,E,F) and (G,H,I), suggesting a lateral differentiation of shear offered by the canopy to the upper non-vegetated layer.

**Table 2.** Main parameters of Raupach's (1994) model for the present experiments

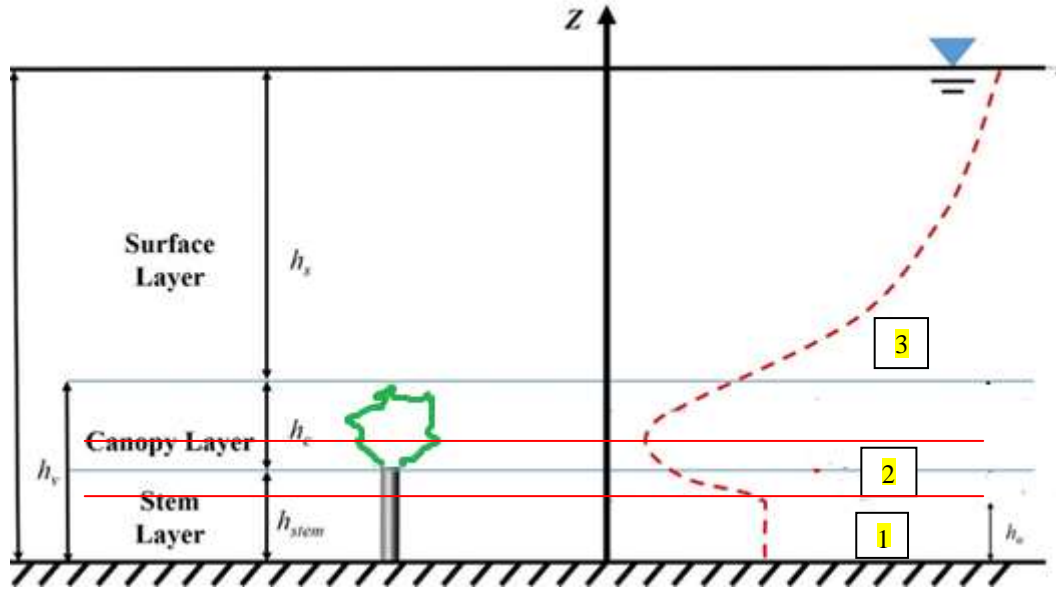
|      | d (cm) | $z_0$ (cm) | $u^*$ (cm/s) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|--------|------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      |        |            | A            | B    | C    | D    | E    | F    | G    | H    | I    |
| Exp1 | 0.92   | 0.029      | 2.19         | 2.15 | 2.16 | 2.39 | 2.42 | 2.37 | 2.49 | 2.40 | 2.48 |
| Exp2 | 1.22   | 0.065      | 2.47         | 2.48 | 2.47 | 2.56 | 2.59 | 2.51 | 2.77 |      | 2.71 |
| Exp3 | 2.63   | 0.194      |              | 3.13 |      | 3.30 | 3.33 | 3.34 | 3.61 | 3.61 | 3.61 |
| Exp4 | 3.32   | 0.306      |              | 3.45 |      | 3.52 | 3.59 | 3.53 | 3.80 |      | 3.80 |
| Exp5 | 3.50   | 0.305      |              | 3.17 |      | 3.34 | 3.33 | 3.33 | 3.61 | 3.65 | 3.64 |
| Exp6 | 4.32   | 0.411      |              | 3.83 |      | 4.04 | 4.07 | 4.09 | 4.45 |      | 4.48 |

Subsequently, the application of a unified distribution over the entire water column was attempted in order to reveal the extent of the influence of element geometry at different locations within the vegetation. To this end, a relatively simple model was chosen, presented by Carollo et al. (2002). Although for unfoliated vegetation this model provides a good fit with measurements throughout the water column where the velocity decreases smoothly towards the bottom, except at locations close to the elements where a sharp decrease occurs, this is not the case for vegetation with foliage. In this case the distribution generally presents a minimum value at the leaf level and is impossible to be described by a unified model, pointing out the need for

the creation of a complex velocity distribution model based on the stratification of the flow. In summary, from the preceding analysis on velocity distribution of vegetated flows, the following main conclusions are drawn:

1. The logarithmic distribution originally developed by Raupach (1994) for flow over terrestrial canopies is capable of well describing the velocity profile in the layer above the aquatic vegetation, with proper determination of its parameters. These were found to depend on the type and density of vegetation elements and also on the relative location with respect to the elements' alignment.
2. For vegetation without foliage, i.e., simple stems, the velocity generally decreases gradually towards the bottom, except at locations in close proximity to the elements where an abrupt decrease occurs. Thus, excluding those locations, a unified velocity distribution, such as the one proposed by Carollo et al. (2002), provides good fit with the measurements over the entire water column.
3. For vegetation with foliage, the velocity distribution below the top of the canopy depends strongly on the relative location in the vegetation array and to a lesser extent on the pattern/density. At several locations, the distribution exhibits a minimum value at the level of the foliage, with the velocity reduction being more severe in between the elements' alignment.
4. The type of foliage of similar size, i.e., dense/rigid or sparse/flexible, appears to be of secondary importance concerning main features of the velocity distribution, such as the maximum velocity defect at the foliage level and the shear velocity offered to the upper free layer.

Considering the above, a new model of velocity distribution in presence of compound vegetation was deemed necessary. Two new analytical models are presented: (a) for vegetation with spherical foliage, developed in the context of research collaboration by Chinese researchers based on preliminary experiments of this work, and (b) a more general, simplified model aimed at being applicable to any vegetation geometry. In the first one the water column is divided into three layers (stem, canopy and surface layer, as shown by the blue lines in Figure 8), and the lower two layers into two sublayers each. Different analytical expressions are used for the velocity distribution in each layer/sublayer, as described in Wang et al. (2023). Good agreement of this model is found with preliminary results for spherical foliage, however there are considerable limitations for its wider application as it refers to a specific geometry and the values of several parameters were determined to achieve best fit with the experimental data.



**Figure 8.** Sketch of vegetation with compound elements and layers of analytical models

In the second model, a similar procedure was followed, separating the flow into three zones, as shown by the red lines in Figure 8, applying a combination of existing theories. Near the bed, (Zone 1) a constant velocity is assumed, derived from the simplified momentum equation in the flow direction, which expresses the balance between the gravity component and the vegetation drag, ignoring the Reynolds stress, in accordance with Huai et al. (2009), Nepf (2012b) and given as:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2gS_0}{C_d m d_0}} \quad (5)$$

where  $d_0$  is the stem diameter,  $m$  is the vegetation density (number of vegetation elements per unit bottom area),  $C_d$  is the drag coefficient,  $S_0$  is the slope of the channel and  $u_0$  is the velocity.

In the surface flow zone (Zone 3), where the velocity increases up to the free surface, the logarithmic law (equation 1) is implemented in combination with Raupach's theory (1994) for determining the parameters  $d$  and  $z_0$  by means of equations (2), (3) and (4). The logarithmic velocity distribution seems to be the most suitable at least for the unimpeded flow layer, having been used by many researchers, such as Klopstra et al. (1997), Shi & Hughes (2002), Ghisalberti & Nepf (2002). An additional advantage of this distribution is its validity well inside the vegetation, i.e. below its top.

In the intermediate zone (Zone 2), where the velocity decreases until its minimum located behind the bulkier part of the vegetation (foliage), a series solution is adopted following Wang et al. (2023), herein using the first three terms:

$$u_p = u_0 \left[ 1 + \frac{-\phi_1}{2} + \frac{(-\phi_1)^2}{40} + \frac{(-\phi_1)^3}{4400} + \dots \right] \quad (6)$$

$$\phi_1 = \left( \frac{C_d m d_0}{k_1^2} \right) z_1 \quad (7)$$

where  $k_1$  denotes the modified von Karman coefficient and  $z_1$  the vertical coordinate (see Figure 8), which starts at the interface of Zones 1 and 2. This interface depends on the height of Zone 1 which is less than the height of the cylindrical element (stem) due to the intrusion of vortices from the foliage zone which cause a reduction in speed. According to Nepf (2012b) the penetration length scale  $\delta_e$  (eddy penetration depth) in submerged simple cylindrical vegetation is:

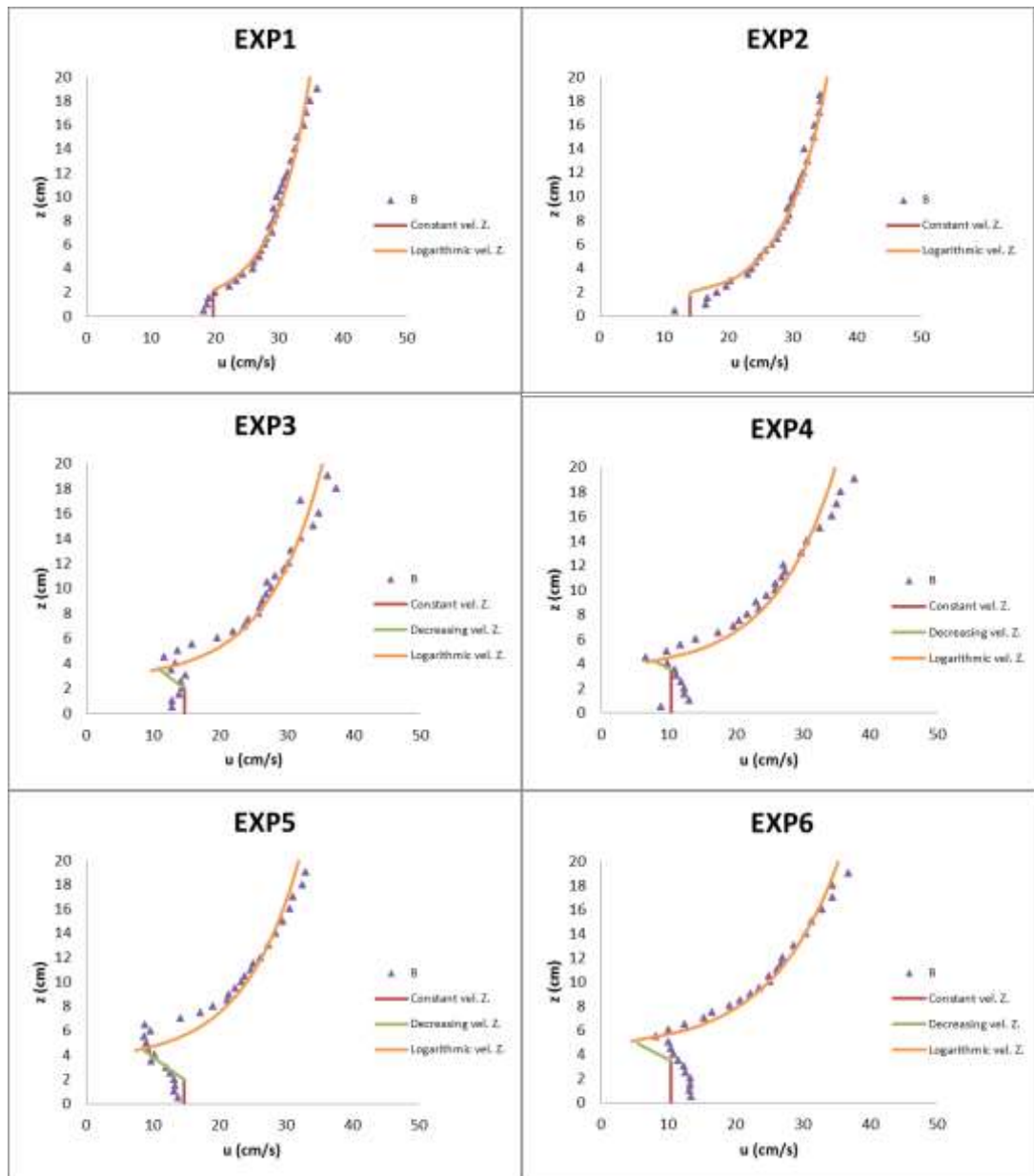
$$\delta_e \approx \frac{0.23}{C_d m d_0} \quad (8)$$

Obviously, Eq. (8) is applicable only for Experiments 1 and 2 of this thesis. In fact, it yields large values of  $\delta_e$  exceeding the height of the rods (0.4 m and 0.2 m, respectively), confirming the proposal of Nepf that for sparse vegetation the logarithmic velocity profile spans practically the entire flow depth. For vegetation with complex geometry a modified form is suggested:

$$\delta_e = \frac{\omega}{C_d m d_0} \quad (9)$$

where the factor  $\omega$  depends on the vegetation geometry. For the present experiments, the value  $\omega = 0.027$  was chosen, which best matches the velocity profiles of the experiments and is close to literature values (Wang et al. 2023).

The difference from the layer division of the previous model is that the thickness of Zones 2 and 3 is not predetermined: the zone of decreasing velocity is assumed to extend higher into the foliage and the zone of unimpeded flow lower into the vegetation, until the respective distributions meet defining the velocity minimum. It should be noted that in the case of simple vegetation elements, such as in the present experiments 1 and 2, it is assumed that zone 2 does not exist. The agreement of the new analytical model with the experimental data is presented below in Figure 9 and is deemed satisfactory.



**Figure 9.**Comparative velocity plots of new analytical model and experimental data for all experiments at position B



# 1) Εισαγωγή

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Από τις πρώτες στιγμές της ανθρωπότητας οι ποταμοί αποτέλεσαν σπουδαία κέντρα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και κοινωνιών καθώς εμπεριείχαν όλες τις απαραίτητες συνθήκες για αυτές να αναπτυχθούν, κυρίως προμήθεια άφθονου και πόσιμου νερού. Έτσι δεν είναι καθόλου τυχαίο που και στις μέρες μας πολλές πόλεις διασχίζονται από ποτάμια αλλά είναι αποτέλεσμα της ιστορικής εξέλιξης σύμφωνα με την προηγούμενη παρατήρηση. Η σημασία τους μάλιστα ήταν τόσο σημαντική που τους προσέδιναν θεϊκές ιδιότητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ο Αχελώος ποταμός που βρίσκεται στην δυτική Ελλάδα, τόπο καταγωγής του συγγραφέα της παρούσας διατριβής, που σύμφωνα με την αρχαία Ελληνική Μυθολογία, ήταν μια ποτάμια θεότητα. Ο Ησίοδος συγκαταλέγει τον Αχελώο στα παιδιά της Γηθύος και του Ωκεανού. Κόρες του ήταν οι Σειρήνες, οι Νύμφες και πολλές άλλες πηγές (Κασταλία, Καλλιρρόη κλπ). Ο Αχελώος είχε αρκετές μορφές αλλά συνήθως απεικονίζεται από την μέση και κάτω σαν ψάρι, γενειοφόρος και με κέρατα στο κεφάλι του. Άλλες μορφές του ήταν σαν φίδι, σαν ταύρος και σαν ανθρωπόμορφο ον με κεφάλι ταύρου που από τα γένια του έτρεχαν πολλά νερά. Όλες αυτές οι ανθρωπομορφίες του ποταμού αντιπροσώπευαν πιθανόν τις διαφορετικές όψεις του ανά ιστορική περίοδο και εποχή. Το μόνο βέβαιο είναι πως στις περισσότερες μορφές του ο Αχελώος φάνταζε ένα άσχημο τέρας. Γνωστός είναι ο μύθος της πάλης του με τον Ηρακλή για χάρη της Δηιάνειρας. Ο Ηρακλής όταν πήγε στον Άδη συνάντησε τον Μελέαγρο, αδελφό της Δηιάνειρας και γιο του Οινέα. Αυτός του ζήτησε σαν χάρη να παντρευτεί την αδελφή του. Ο ήρωας δεν αθέτησε την υπόσχεση του και πήγε στην Καλυδώνα όπου βασίλευε ο Οινέας. Εκεί όμως ένας επίμονος μνηστήρας, ο Αχελώος, ζητούσε την κόρη του Οινέα παίρνοντας διάφορες μορφές. Έγινε μάχη και ο ποτάμιος θεός, παρά τις συνεχείς μεταμορφώσεις του, έχασε. Τότε ο Ηρακλής του απέκοψε το δεξί του κέρατο, γεγονός που στην πραγματικότητα αντιστοιχίζεται με το κλείσιμο της μίας εκβολής του ποταμού, και από το αίμα που έρρευσε γεννήθηκαν οι Σειρήνες. Το κέρατο αυτό δεν το κράτησε ο Ηρακλής και ο Αχελώος σε αντάλλαγμα του έδωσε το κέρας της Αμάλθειας δηλαδή σε πραγματικούς όρους το νέο πλούσιο γόνιμο έδαφος, που στην συνέχεια ο ήρωας δώρησε στον Οινέα. Ο ποταμός-Θεός είχε νικηθεί και ο Ηρακλής νυμφεύθηκε την Δηιάνειρα. Βέβαια ο μύθος αυτός και κατά τον Διόδωρο αλλά και τον Στράβωνα ερμηνεύει τις προσπάθειες των αρχαίων εκεί κατοίκων να τιθασεύσουν την ορμή του ποταμού που αναπαριστάται με το κέρας (κέρατο) του Αχελώου το οποίο προκαλούσε καταστροφές, και περιφράσσοντάς τον με μεγάλα έργα που προκαλούσαν τις μεταμορφώσεις του για να τον μετατρέψουν σε γόνιμο ποταμό, όπως μεταφορικά προσομοιάζεται με τον γάμο του Ηρακλή.

Από τον παραπάνω μύθο γίνεται σαφής η ευεργετικότητα των ποτάμιων συστημάτων αλλά και οι κίνδυνοι που συνυπάρχουν με αυτήν. Γι αυτό υπήρξε από νωρίς η ανάγκη για τον έλεγχο τους ώστε να γίνει εκμετάλλευση των θετικών επιπτώσεων και η

προστασία από τις αρνητικές. Για τον λόγο αυτό ήταν αναγκαία η επιστημονική ανάλυση και εξήγηση όλων των φαινομένων που παρουσιάζονται στα ποτάμια οικοσυστήματα. Η χρήση του όρου οικοσύστημα δεν γίνεται τυχαία καθώς κάθε ποταμός δεν λειτουργεί σαν ανεξάρτητο υδάτινο σώμα αλλά έρχεται σε επαφή και αλληλεπίδραση με το έμβιο περιβάλλον δηλαδή με την χλωρίδα και την πανίδα που ζει και αναπτύσσεται μέσα και γύρω από αυτόν. Η παρούσα εργασία έχει ως επίκεντρο την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης της βλάστησης με την ποτάμια ροή μέσω εργαστηριακών πειραμάτων.

## 1.2 Βλάστηση ποταμών

Η επίδραση της βλάστησης στην ποτάμια ροή δεν είχε πάντα την ίδια σημασία. Μέχρι και το μεγαλύτερο μέρος του προηγούμενου αιώνα, αντιμετωπιζόνταν ως όχληση λόγω της αντίστασης που προέβαλε στην ροή και θεωρούταν ως επιπλέον τραχύτητα στον πυθμένα του καναλιού, με αποτέλεσμα την μείωση της παροχρεωτικότητας του και την πρόκληση πλημμύρας. Έτσι ο σχεδιασμός και η κοινή πρακτική υποδείκνυαν την αφαίρεση της. Στην σύγχρονη εποχή όμως αυτός ο τρόπος διαχείρισης έχει αντικατασταθεί από προσεγγίσεις που αναγνωρίζουν τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει η βλάστηση σε ένα υδάτινο οικοσύστημα, όπως την αύξηση της σταθερότητας των οχθών, τη μείωση της διάβρωσης και της θολότητας του νερού κλπ.

Η βλάστηση εντός της κοίτης αλλά και στην όχθη είναι συνηθισμένη σε μικρά κανάλια, ρέματα και ποταμούς και έχει ουσιώδεις φυσικές, βιολογικές και βιοφυσικές λειτουργίες. Πέρα από αυτές τις παραμέτρους δεν θα πρέπει να αγνοηθεί η σημαντική επίδραση που έχει η βλάστηση στην αισθητική του περιβάλλοντος και στη διατήρηση και ανάπτυξη των οικοσυστημάτων. Ένας χώρος από τον οποίο απομακρύνεται ή απομειώνεται η βλάστηση, υποβαθμίζεται αμέσως από άποψη οπτικής αξίας και όχι μόνο, ενώ η σύγχρονη τάση ακόμα και στα αστικά περιβάλλοντα είναι η ενίσχυση της. Η υδρόβια βλάστηση παρέχει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών στα οικοσυστήματα όπως η πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και η παραγωγή οξυγόνου που βελτιώνουν την ποιότητα του νερού. Η πιθανή απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου είναι τόσο υψηλή που ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν την ευρεία φύτευση σε υδάτινα κανάλια (Nepf 2012a). Τα φυτικά στοιχεία αποτελούν τη βάση πολλών τροφικών αλυσίδων σε όλα τα οικοσυστήματα και επίσης η βλάστηση προάγει τη βιοποικιλότητα δημιουργώντας διαφορετικούς τύπους με χωρική ετερογένεια στην ταχύτητα του ρέματος οι οποίοι γίνονται κατάλληλοι ως ενδιαιτήματα για άλλους ζωντανούς οργανισμούς. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ροής και βλάστησης είναι πολύπλοκες και εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και από τα χαρακτηριστικά των φυτών, όπως η μέση ταχύτητα ροής, η τύρβη, η μορφολογία του καναλιού, η θερμοκρασία του νερού, η μορφολογία των φυτών, η ηλικία και το μέγεθος και η χωρική κατανομή των φυτικών συστάδων. Η γνώση των αλληλεπιδράσεων ροής-βλάστησης είναι σημαντική για τις εφαρμογές τόσο τις

μηχανικές, π.χ. εκτιμήσεις των επιπέδων πλημμύρας, όσο και για τις οικολογικές, π.χ. αποκατάσταση ρεμάτων. Οι συνθήκες ροής επηρεάζουν τον ρόλο των φυτών ως φίλτρων αιωρούμενων ιζημάτων και βυθίσεις των διαλυμένων θρεπτικών συστατικών και ρύπων. Αντιστρόφως, η δομή και η αφθονία της βλάστησης επηρεάζουν το βάθος ροής, τη παροχετευτικότητα της πλημμύρας, την ικανότητα μεταφοράς ιζημάτων και άλλες υδραυλικές και υδρολογικές παραμέτρους (Nikora et al. 2008).

Ένα βασικό στοιχείο της βλάστησης που παίζει σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση της με την ροή νερού είναι το είδος της. Με τον όρο αυτό δεν εννοούμε την βιοποικιλότητα της που είναι μεν ένα σπουδαίο θέμα αλλά αφορά άλλους επιστημονικούς κλάδους. Αντίθετα αυτό που έχει σημασία για την παρούσα διατριβή και γενικότερα για το αντικείμενο του υδραυλικού μηχανικού είναι το υδροδυναμικό καθεστώς στο οποίο βρίσκεται. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της βλάστησης που συνδέονται με αυτό είναι κυρίως η γεωμετρία, η πυκνότητα (όχι μόνο το πλήθος των στοιχείων βλάστησης ανά επιφάνεια αλλά και το μοτίβο ή διάταξη δηλαδή το σχέδιο τοποθέτησής τους) και η ακαμψία καθώς επίσης και η σχετική βύθιση, δηλαδή αν το νερό σκεπάζει πλήρως την βλάστηση ή όχι και έτσι να είναι βυθισμένη ή αναδεδυμένη. Από αυτά τα χαρακτηριστικά προκύπτουν διάφοροι συνδυασμοί, παραδείγματα των οποίων θα ακολουθήσουν σε εικόνες.



**Εικόνα 1.1.** Φυτικό στοιχείο εύκαμπτης βυθισμένης βλάστηση (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: [www.flickr.com/photos/planta1](http://www.flickr.com/photos/planta1))



**Εικόνα 1.2.** Αναδυόμενη εύκαμπτη βλάστηση με μεγάλη πυκνότητα ομοιόμορφα κατανεμημένη στο μεγαλύτερο μέρος της κοίτης ποταμού (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: <https://pxhere.com/el/photo/612437>)



**Εικόνα 1.3.** Αναδυόμενη εύκαμπτη βλάστηση με μεγάλη πυκνότητα αλλά με μοτίβο συστάδων συγκεντρωμένο στις όχθες (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: <https://pixnio.com/el/media/el-2329938#>)



**Εικόνα 1.4.** Αναδυόμενη άκαμπτη βλάστηση (κορμός δέντρου) με χαμηλή πυκνότητα (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: <https://pixnio.com/el/media/el-2728456>)



**Εικόνα 1.5.** Βυθισμένη και αναδυόμενη εύκαμπτη βλάστηση με μεγάλη πυκνότητα και τυχαίο μοτίβο συστάδων (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: <https://pxhere.com/el/photo/631513>)





**Εικόνα 1.6.** Βυθισμένη και αναδύομενη εύκαμπτη βλάστηση με μέτρια πυκνότητα και συγκεντρωτικό μοτίβο συστάδων σε μια περιοχή (η εικόνα διαθέτει άδεια creative commons, πηγή: <https://pxhere.com/el/photo/119146>)

Η παρούσα εργασία διερευνά την απόκριση του πεδίου ροής πάνω από δύο διαφορετικές πυκνότητες βυθισμένης βλάστησης με διαφορετική γεωμετρία των στοιχείων βλάστησης. Η επιλογή μελέτης της περίπτωσης βυθισμένης βλάστησης έγινε προκειμένου να εξεταστεί πληρέστερα η επίδραση της βλάστησης στη ροή καθ' όλο το ύψος της υγρής στήλης, δηλαδή τόσο μέσα στη ζώνη της βλάστησης όσο και πάνω από αυτήν, δεδομένου ότι τα σχετικά φαινόμενα και οι μηχανισμοί (π.χ. οριακό στρώμα και στρώμα ανάμειξης) που υπεισέρχονται δεν έχουν πλήρως διευκρινιστεί ή ερευνηθεί. Αντίθετα στην περίπτωση αναδύομενης βλάστησης φαίνεται ότι η ροή διέπεται κυρίως από μια ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων βαρύτητας και αντίστασης των στοιχείων της βλάστησης, θεωρώντας τις τριβές του πυθμένα και τον τοιχωμάτων αμελητέες σε σχέση με την αντίσταση της βλάστησης. Η ανάγκη για λεπτομερή πειραματικά δεδομένα γίνεται όλο και πιο απαραίτητη, αφ' ενός για την καλύτερη κατανόηση της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης ροής – βλάστησης και αφ' ετέρου για σύγκριση και επαλήθευση με τα αναπτυσσόμενα αριθμητικά μοντέλα των πολύπλοκων διαδικασιών αλληλεπίδρασης ροής-βλάστησης και για την μεγαλύτερη εμπάθυνση στα υποκείμενα φαινόμενα. Οι περισσότερες προηγούμενες εργασίες αναφέρονται κυρίως σε έναν μεμονωμένο τύπο στοιχείου, όπως άκαμπτα κυλινδρικά στοιχεία ή ένα συγκεκριμένο φυσικό φυτό, και συχνά παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά ταχύτητας και τύρβης ως χωρικούς μέσους όρους σε διάφορες

τοποθεσίες εντός της βλάστησης (π.χ. Dunn et al. 1996 , Wilson et al. 2003), ή σε μια μεμονωμένη θέση, όπως ο άξονας του καναλιού (π.χ. Li et al. 2014). Αυτό δυσκολεύει την εκτίμηση της επίδρασης που προκαλούν διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία των στοιχείων ή τη θέση εντός της συστοιχίας βλάστησης. Η πρωτοτυπία και στόχευση της παρούσας εργασίας είναι να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού παρέχοντας λεπτομερείς μετρήσεις και ολοκληρωμένη σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών της ροής, δηλαδή των ταχυτήτων, των τυρβωδών εντάσεων και διατμητικών τάσεων, για τρεις τύπους τεχνητών στοιχείων βλάστησης με διαφορετική γεωμετρία και χαρακτηριστικά όπως ακαμψία (δύο άκαμπτα και ένα ημιάκαμπτο) για παρόμοιες πυκνότητες.

### 1.3 Διάρθρωση διδακτορικής διατριβής

Η διδακτορική διατριβή αποτελείται από επτά κεφάλαια, μια σύντομη περιγραφή των οποίων ακολουθεί αμέσως:

#### Κεφάλαιο 1~Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο 1 εισάγει τον αναγνώστη στο θέμα της διδακτορικής διατριβής περνώντας αρχικά από μια αναφορά στα ποτάμια οικοσυστήματα στην βλάστηση που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του ποτάμιου συστήματος. Γίνεται αναφορά στα είδη της βλάστησης αλλά και στις συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να υπάρξει σε σχέση με το νερό. Αναφέρεται επίσης το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η διατριβή καθώς και η θεωρητική και πρακτική σημασία του παράλληλα με τις πρωτοτυπίες που προκύπτουν από αυτήν και ενισχύουν την έρευνα για την αλληλεπίδραση ροής νερού και βλάστησης.

#### Κεφάλαιο 2~ Ιστορική βιβλιογραφική επισκόπηση

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει μια βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στο θέμα της διατριβής καθώς η αλληλεπίδραση ροής - βλάστησης είχε ενδιαφέρον από τον προηγούμενο αιώνα ενώ τα τελευταία χρόνια η έρευνα για τις διάφορες πτυχές της ροής με παρουσία βλάστησης έχει αναπτυχθεί έντονα λόγω της αναγνώρισης της διατήρησής της για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Η μελέτη της βιβλιογραφίας κατέδειξε την πολυπλοκότητα των φαινομένων που παρουσιάζονται στην αλληλεπίδραση ροής-βλάστησης και παρότι έχουν διερευνηθεί πολλές πλευρές της δεν υπήρξε μια εργασία που να επικεντρώθηκε στην επίδραση της γεωμετρίας της βλάστησης στο πεδίο ταχυτήτων για διαφορετικές μορφές της. Εξάλλου το πεδίο ταχυτήτων δεν είναι ομοιόμορφο παντού όταν πρόκειται για αραιή βλάστηση, κάτι που επίσης δεν έχει διερευνηθεί στην βιβλιογραφία. Τα δυο αυτά θέματα αναδεικνύουν την σημασία και την πρωτοτυπία της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

#### Κεφάλαιο 3~Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το Κεφάλαιο 3 παρέχει μια περιεκτική παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου που

είναι απαραίτητο για την κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην ροή νερού διαμέσου βλάστησης και περιλαμβάνει την τυρβώδη ροή και την στατιστική ανάλυση των τυρβωδών μεγεθών που προκύπτουν από τις τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας, την θεωρία του οριακού στρώματος πυθμένα και την λογαριθμική κατανομή της ταχύτητας πάνω από αυτό σε ανοιχτό αγωγό καθώς και την διαστρωμάτωση που προκαλεί η παρουσία βλάστησης και που οφείλεται σε ασυνέχειες της ταχύτητας οδηγώντας σε δημιουργία διατμητικών στρώσεων. Με βάση αυτήν την θεωρία έγινε η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

#### Κεφάλαιο 4~Πειράματα

Το Κεφάλαιο 4 περιέχει μια αναλυτική περιγραφή των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Συγκεκριμένα γίνεται εκτενής αναφορά στην πειραματική διάταξη εντός του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, στα είδη τεχνητής βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν, στην πυκνότητα και το μοτίβο τοποθέτησης της βλάστησης, τις συνθήκες ροής καθώς και στο όργανο μέτρησης (ταχύμετρο υπερήχων ADV) και στην διαδικασία συλλογής δεδομένων. Επιπρόσθετα αναφέρονται τα προκαταρκτικά πειράματα ως ένα αρχικό βήμα για να οδηγηθούμε στην καταληκτική απόφαση για τους συνδυασμούς συνθηκών ροής και βλάστησης που χρησιμοποιήθηκαν.

#### Κεφάλαιο 5~Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο 5 μετά από μια συγκεντρωτική περιγραφή των οριστικών πειραμάτων, παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχήματα με τα κατακόρυφα προφίλ των κύριων μεγεθών της ροής, δηλαδή της ταχύτητας, των τυρβωδών τάσεων και εντάσεων, ανά πείραμα και ανά θέση μέτρησης. Στην συνέχεια παρατίθενται παρόμοια διαγράμματα ενσωματώνοντας πειραματικά δεδομένα άλλων εργασιών ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση με αυτές, αφού πρώτα αδιαστατοποιηθούν τα μεγέθη σε όλες τις εργασίες κατά τον ίδιο τρόπο, και να δειχθεί η εγκυρότητα των μετρήσεων της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τέλος παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την περιοχή κατάντη της βλάστησης είτε με κατακόρυφα προφίλ μεγεθών είτε με διαγράμματα ισοταχών καμπυλών.

#### Κεφάλαιο 6~Μοντέλα κατανομής ταχυτήτων

Το Κεφάλαιο 6 παρέχει μια περιεκτική επισκόπηση διαφόρων μοντέλων κατανομής ταχυτήτων είτε δύο στρωμάτων είτε τριών ενώ στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή μερικών από αυτά στα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας κρίνοντας ταυτόχρονα την καταλληλότητα και την εφαρμοσιμότητά τους. Τέλος, παρουσιάζονται δύο νέα μοντέλα με διαχωρισμό της ροής σε ζώνες: (α) ένα για βλάστηση με σφαιρικό φύλλωμα, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας από Κινέζους ερευνητές βασισμένο σε προκαταρκτικά πειράματα της παρούσας εργασίας, και (β) ένα γενικότερο πιο απλοποιημένο μοντέλο με στόχο να



μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε γεωμετρία βλάστησης και το οποίο προκύπτει από συνδυασμό υπάρχουσών θεωριών.

#### Κεφάλαιο 7~Συμπεράσματα

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της διδακτορικής διατριβής και προτάσεις για έρευνα στο μέλλον.

Ακολουθούν οι συναφείς με τη διατριβή δημοσιεύσεις του συγγραφέα, η Βιβλιογραφία και Παράρτημα με αναλυτικούς πίνακες των πειραματικών μετρήσεων.

#### 1.4 Πρωτότυπα στοιχεία διδακτορικής διατριβής

Τα κύρια πρωτότυπα στοιχεία της διατριβής τα οποία συμβάλλουν στην έρευνα για την ροή σε ανοιχτό αγωγό με παρουσία βλάστησης είναι τα εξής:

- Παρέχονται λεπτομερείς μετρήσεις σε διάφορες θέσεις εντός της βλάστησης των βασικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής, δηλαδή των κατανομών ταχύτητας, τυρβωδών εντάσεων και τυρβωδών διατμητικών τάσεων, για τρεις τύπους τεχνητών στοιχείων βυθισμένης βλάστησης με διαφορετική γεωμετρία και χαρακτηριστικά, για δύο πυκνότητες/διατάξεις βλάστησης. Η ανάγκη για λεπτομερή πειραματικά δεδομένα είναι σημαντική, τόσο για την καλύτερη κατανόηση των υποκείμενων φαινομένων όσο και για σύγκριση και επαλήθευση με μαθηματικά μοντέλα που αναπτύσσονται για την περιγραφή των πολύπλοκων διαδικασιών αλληλεπίδρασης ροής-βλάστησης. Τα διαθέσιμα δεδομένα στη βιβλιογραφία για τα χαρακτηριστικά ταχύτητας και τύρβης αναφέρονται ως επί το πλείστον σε έναν τύπο στοιχείου, όπως άκαμπτα κυλινδρικά στοιχεία, ή ένα συγκεκριμένο φυσικό φυτό, και συχνά αναφέρονται ως χωρικοί μέσοι όροι διαφόρων θέσεων εντός της βλάστησης ή αφορούν μια μεμονωμένη θέση, όπως ο άξονας του καναλιού. Έτσι, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι παραλλαγές που σχετίζονται με διαφορές στη γεωμετρία των στοιχείων ή τη θέση εντός της συστοιχίας βλάστησης.
- Με κατάλληλη επιλογή της μορφής των στοιχείων βλάστησης επιτυγχάνεται η συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της ροής μεταξύ (α) στοιχείων με φύλλωμα και χωρίς φύλλωμα και (β) στοιχείων με διαφορετικού τύπου φύλλωμα, ένα συμπαγές/άκαμπτο και ένα πορώδες/εύκαμπτο.
- Διαπιστώνεται η αισθητή χωρική διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών της ροής, εξαρτώμενη από τη θέση και την εγγύτητα προς τα στοιχεία βλάστησης.
- Γίνεται συστηματική διερεύνηση της μαθηματικής έκφρασης των προφίλ ταχύτητας σε όλο το ύψος της υγρής στήλης και εντοπίζονται διαφορές τόσο πάνω από τη συστάδα όσο και εντός αυτής, οφειλόμενες στην πυκνότητα της βλάστησης, στη γεωμετρία των στοιχείων και στη θέση εντός της βλάστησης.
- Παρουσιάζεται ένα νέο απλοποιημένο αναλυτικό μοντέλο κατανομής

ταχύτητας, που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για κάθε γεωμετρία σύνθετης βλάστησης και το οποίο προκύπτει από συνδυασμό θεωριών ακολουθώντας μια διαδικασία διαχωρισμού της ροής σε ζώνες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

## 2) Βιβλιογραφική επισκόπηση

Γενικά, η παρουσία βλάστησης επηρεάζει έντονα το πεδίο ροής, αυξάνει την αντίσταση στη ροή, μεταβάλλει τις τοπικές συνθήκες της και προάγει την καθίζηση του αιωρούμενου υλικού. Άρα είναι απαραίτητη η κατανόηση και η ποσοτικοποίηση των φυσικών διαδικασιών που διέπουν τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ ροής νερού και βλάστησης. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια πραγματοποιήθηκαν πολλές έρευνες για διάφορες πτυχές της ροής μέσω της βλάστησης.

Η εκτίμηση της αντίστασης ροής της βλάστησης έχει σπουδαία σημασία για μηχανικές και οικολογικές εφαρμογές. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ροής και βλάστησης είναι πολύπλοκες και εξαρτώνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και από τα χαρακτηριστικά του φυτού όπως η ευκαμψία, το μέγεθος και η πυκνότητα της βλάστησης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η βλάστηση θεωρούνταν ως επιπλέον τραχύτητα στον πυθμένα του καναλιού και κατά αυτόν τον τρόπο εξεταζόταν σε παλιότερες εποχές χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για προβλήματα ροής σε ανοικτούς αγωγούς (Στάμου 2011) όπως:

$$\text{Η εξίσωση Darcy-Weisbach } J_o = f \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g} \quad (2-1)$$

$$\text{Η εξίσωση Chezy } V = C_h \sqrt{R J_o} \quad (2-2)$$

$$\text{Η εξίσωση Manning } V = \frac{R^{1/6}}{n} \sqrt{R J_o} = \frac{1}{n} R^{2/3} J_o^{1/2} \quad (2-3)$$

όπου  $V$  είναι η μέση ταχύτητα του νερού στη διατομή,  $J_o$  είναι η κλίση του πυθμένα του καναλιού για ομοιόμορφη ροή,  $f$  είναι ο συντελεστής αντίστασης τριβών,  $R$  η υδραυλική ακτίνα,  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας,  $C_h$  είναι ο συντελεστής Chezy και  $n$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning.

Συγκεκριμένα, υπήρξε συστηματική προσπάθεια ώστε να επιτευχθεί η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της βλάστησης με ενσωμάτωση της στους συντελεστές αντίστασης όπως π.χ. στον συντελεστή Manning  $n$ . Άλλοι ερευνητές κατά το ίδιο σκεπτικό έκαναν χρήση της κατανομής της μέσης ταχύτητας πάνω από λεία επίπεδη πλάκα που δίδεται προσεγγιστικά από τη σχέση Prandtl – von Karman (ή εξωτερικός νόμος) (Παπανικολάου 2010):

$$\frac{U-u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{H}{z} \right) \quad (2-4)$$

όπου το  $U$  είναι η μέγιστη ταχύτητα διατομής, το  $H$  είναι το βάθος ροής,  $u_*$  είναι η ταχύτητα τριβής,  $\kappa$  είναι ο συντελεστής von Karman και  $u$  είναι η τοπική ταχύτητα σε απόσταση  $z$  από τον πυθμένα, ενώ με κατάλληλη τροποποίησή της μέσω και των πειραμάτων τους (πχ. Raupach 1994, Nepf 2012b) συμπεριλάμβαναν την επίδραση

της βλάστησης. Στην συνέχεια ακολουθεί μια εκτεταμένη παρουσίαση βασικών σημείων διάφορων εργασιών της βιβλιογραφίας σχετικών με την παρούσα διατριβή.

Στην εργασία των Kouwen et al (1969) πραγματοποιήθηκαν πειράματα τα οποία έδειξαν ότι, για πλατιά κανάλια που έχουν τεχνητή εύκαμπτη τραχύτητα (βλάστηση) προσκολλημένη στον πυθμένα, ο συντελεστής  $n$  είναι κυρίως μία συνάρτηση της σχετικής τραχύτητας  $H/h_k$  όπου το  $H$  είναι το βάθος ροής και το  $h_k$  είναι το ύψος ανασχηματισμού της τραχύτητας. Η εύκαμπτη τραχύτητα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά τα πειράματα κατασκευάστηκε τοποθετώντας επίπεδες λωρίδες από στυρίνη στον πυθμένα του καναλιού. Τα προφίλ ταχύτητας μετρήθηκαν στο μέσο του καναλιού με σωλήνα Pitot ενώ η κλίση, το βάθος ροής και οι ανυψώσεις της επιφάνειας του νερού με σταθμήμετρο ακίδας (point gauge). Η συσχέτιση του συντελεστή  $n$  ως συνάρτηση του γινομένου  $UxR$  δεν ήταν ικανοποιητική και αυτό οδήγησε τους συγγραφείς να επιχειρήσουν μια πιο θεμελιώδη προσέγγιση για να υπολογίσουν την αντίσταση της ροής σε κανάλια με βλάστηση. Έτσι προτάθηκε μια ημι-θεωρητική ανάλυση για την αντίσταση της ροής σε κανάλια με βλάστηση, της μορφής:

$$\frac{u}{u_*} = C_1 + C_2 \ln \left( \frac{A}{A_v} \right) \quad (2-5)$$

όπου το  $A$  είναι το εμβαδό της διατομής του νερού, το  $A_v$  είναι το εμβαδό της μετωπικής επιφάνειας της βλάστησης, το  $C_1$  εξαρτάται από την πυκνότητα βλάστησης και το  $C_2$  εξαρτάται από την ευκαμψία της βλάστησης. Οι τιμές των σταθερών  $C_1$  και  $C_2$  πινακοποιούνται μέσω πειραμάτων για διάφορες περιπτώσεις.

Οι Petryk and Bosmajian (1975) στην εργασία τους αναπτύσσουν μια ποσοτική μέθοδο για την πρόβλεψη του συντελεστή Manning  $n$  ως συνάρτηση του βάθους ροής και των χαρακτηριστικών της βλάστησης. Η ανάλυση και τα αποτελέσματα επικεντρώθηκαν στις συνθήκες όπου το βάθος ροής είναι μικρότερο από ή ίσο με το μέγιστο ύψος της βλάστησης. Η εργασία αυτή έλαβε υπόψη της τα δεδομένα από πειράματα πεδίου σε πραγματικά ποτάμια με κανονική βλάστηση (φυτά και δέντρα). Ουσιαστικά, παρουσιάζεται ένα μοντέλο αντίστασης ροής για συνθήκες μη βυθισμένης βλάστησης το οποίο προβλέπει τον συντελεστή Manning  $n$  σε όρους πυκνότητας βλάστησης σαν συνάρτηση της υδραυλικής ακτίνας  $R$  και του συντελεστή τραχύτητας Manning του πυθμένα χωρίς βλάστηση  $n_b$ . Για την ειδική περίπτωση ομοιόμορφης πυκνότητας βλάστησης με το ύψος, που μπορεί να εφαρμοστεί σε πλημμυρικές κοίτες με μεγάλο αριθμό δέντρων, ο συντελεστής Manning  $n$  αυξάνεται γραμμικά με την  $2/3$  δύναμη της υδραυλικής ακτίνας. Αυτό προϋποθέτει ότι η ροή πραγματοποιείται μέσω περιοχών με έντονη βλάστηση όπου η διατμητική δύναμη στο όριο του καναλιού είναι αμελητέα σε σύγκριση με την δύναμη τριβής της βλάστησης. Η πιο χρήσιμη εφαρμογή του μοντέλου αντίστασης ροής είναι η πρόβλεψη της μεταβολής του συντελεστή Manning  $n$  με το βάθος.

Η μελέτη του Chen (1976) στόχευε να διερευνήσει την αντίσταση σε ρηχές ροές

πάνω από επιφάνειες φυσικού χλοοτάπητα χρησιμοποιώντας εργαστηριακό εξοπλισμό. Αυτή η ανάγκη για την επαναξιολόγηση των μεθόδων και των τύπων για την εκτίμηση της αντίστασης ροής, οφείλεται στο αυξημένο ενδιαφέρον για την μαθηματική προσομοίωση της διαδικασίας βροχής-απορροής και της στερεοαπορροής από μια λεκάνη απορροής που μπορεί να αποτελείται από διάφορες επιφάνειες βλάστησης. Χρησιμοποιήθηκαν δυο είδη βλάστησης-χλοοτάπητα με μέσο ύψος 76mm (το Kentucky Bluegrass και το Bermuda grass) ανθεκτικά στην διάβρωση πάνω σε μια στρώση εδάφους πάχους 0,3m. Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής  $f$  αυξάνεται με την κλίση του πυθμένα αλλά μειώνεται με τον αριθμό Reynolds για στρωτή ροή της οποίας το εύρος στις μικρές κλίσεις είναι μεγαλύτερο από ό,τι στις μεγαλύτερες κλίσεις πυθμένα. Επίσης, στην μεταβατική περιοχή ο συντελεστής  $f$  για ροή στην ίδια κλίση διαφέρει εξαιτίας κυρίως της ποικιλίας σχημάτων των καναλιών.

Στην εργασία του Raupach (1994) εξετάζεται η λογαριθμική κατανομή ταχυτήτων πάνω από επίγειες συστάδες βλάστησης χρησιμοποιώντας μια προηγούμενη θεώρηση του ιδίου για τον διαχωρισμό της τριβής πάνω σε τραχιές επιφάνειες και προτείνονται απλές αναλυτικές εκφράσεις για το ύψος τραχύτητας ( $z_0$ ) και το επίπεδο μηδενικής μετατόπισης ( $d$ ) για την κατανομή αυτή σε επιφάνειες με βλάστηση, ως συναρτήσεις του ύψους της συστάδας ( $h$ ) και του δείκτη επιφάνειας ( $\Lambda =$  λόγος της επιφάνειας που προκύπτει από την προβολή της σε ένα επίπεδο κάθετο στον πυθμένα προς την επιφάνεια πυθμένα που καταλαμβάνουν τα αντίστοιχα στοιχεία στην κάτοψη). Οι εκφράσεις που προκύπτουν παρέχουν καλή εφαρμογή σε πολλά δεδομένα πεδίου και αεροσήραγγας και είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπως παραμετροποιήσεις επιφανειών σε ατμοσφαιρικά μοντέλα. Η κύρια εξίσωση για την κατανομή ταχυτήτων είναι:

$$u/u_* = 1/\kappa \ln[(z - d)/z_0] \quad (2-6)$$

όπου το  $z_0$  είναι το ύψος τραχύτητας, το  $d$  είναι η απόσταση του επιπέδου μηδενικής ταχύτητας από τον πυθμένα,  $u_*$  είναι η ταχύτητα τριβής,  $\kappa$  είναι ο συντελεστής von Karman και  $u$  είναι η τοπική ταχύτητα σε απόσταση  $z$  από τον πυθμένα.

Οι Dunn et al. (1996) πραγματοποίησαν πειράματα με τεχνητή άκαμπτη ή εύκαμπτη βυθισμένη βλάστηση σε κλιμακωτή διάταξη. Τόνισαν τη σημαντική επίδραση της διάταξης της πυκνότητας στο προφίλ ταχύτητας και έδειξαν ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας (αντίστασης) δεν είναι σταθερός κατακόρυφα αλλά φτάνει στο μέγιστο περίπου στο ένα τρίτο του ύψους της συστάδας. Η ανάλυση της πειραματικής μελέτης δείχνει ότι τα προφίλ οριζόντιας μέσης ταχύτητας μέσω των άκαμπτων κυλίνδρων είχαν ένα χαρακτηριστικό σχήμα που εξαρτιόταν από την πυκνότητα των κυλίνδρων. Έτσι, άλλες παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο, ιδιαίτερα η ευκαμψία των φυτών και ο αριθμός Reynolds των κυλίνδρων. Τα μετρούμενα προφίλ των τάσεων Reynolds και της έντασης τύρβης δείχνουν ότι αυτές οι τιμές φτάνουν στο μέγιστο κοντά στην κορυφή της συστάδας και καταστέλλονται σημαντικά μέσα στη

συστάδα. Στην κορυφή της συστάδας υπήρχε μια ασυνέχεια στην τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας και πάνω από τη συστάδα ο συντελεστής οπισθέλκουσας βρέθηκε να είναι ουσιαστικά ίσος με μηδέν.

Ο Fairbanks (1998) στην μεταπτυχιακή εργασία του πραγματοποίησε λεπτομερείς μετρήσεις για συνθήκες βυθισμένης και μη-βυθισμένης βλάστησης προσομοιωμένης με πείρους και ανέφερε ότι οι μέγιστες εντάσεις τύρβης εμφανίζονται κοντά στην κορυφή της συστάδας όπου η ροή είναι περισσότερο διατμητική. Τα διαμήκη και κατακόρυφα προφίλ λοξότητας (skewness) πλήρως βυθισμένης βλάστησης υποδεικνύουν ότι αναπτύσσονται οργανωμένοι στρόβιλοι στο στρώμα διάτμησης κοντά στην κορυφή των πείρων. Μεταξύ της κορυφής των πείρων και της ελεύθερης επιφάνειας, όλα τα δεδομένα διαμήκους ταχύτητας ακολουθούν στενά το ίδιο λογαριθμικό προφίλ. Τα δεδομένα κατακόρυφης ταχύτητας, ωστόσο, δεν είναι χωρικά ομοιόμορφα μεταξύ της κορυφής των πείρων και της ελεύθερης επιφάνειας, υποδεικνύοντας ότι λαμβάνει χώρα δευτερεύουσα ροή. Ακριβώς κάτω από την κορυφή των πείρων, τα δεδομένα ταχύτητας αποκλίνουν από ένα λογαριθμικό προφίλ.

Η εργασία της Nepf (1999) περιλαμβάνει πείραμα πεδίου και πείραμα εργαστηρίου για να υποστηρίξει ένα μοντέλο που αναπτύσσεται στην εργασία αυτή με βάση την φυσική σύνδεση μεταξύ της μεταφοράς ενέργειας (μετατροπή μέσης κινητικής ενέργειας σε τυρβώδη κινητική ενέργεια από τα υδρόβια φυτά στην κλίμακα των μίσχων και των κλαδιών του φυτού) και της παραγωγής ίχνους του φυτού (απόνερα), για να περιγράψει την τριβή, την τύρβη και την διάχυση για ροή διαμέσου αναδυόμενης βλάστησης, που για πρώτη φορά συμπεριλαμβάνει την σχετική υποκείμενη φυσική και καλύπτει το φυσικό εύρος της πυκνότητας βλάστησης και των αριθμών Reynolds των μίσχων. Επίσης, αυτή η εργασία επεκτείνει το βασισμένο στον κύλινδρο μοντέλο για αντίσταση βλάστησης συμπεριλαμβάνοντας την εξάρτηση του συντελεστή τριβής  $C_D$  από την πυκνότητα του πληθυσμού των μίσχων, και εισάγει την σημασία της μηχανικής διάχυσης στις ροές με βλάστηση. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν το μοντέλο από το οποίο εξάγονται διάφορα συμπεράσματα αλλά μπορεί να κάνει και προβλέψεις για την ένταση της τύρβης ανάλογα με την πυκνότητα βλάστησης. Επιπλέον, το μοντέλο προβλέπει ότι η ένταση της τύρβης αυξάνεται με την εισαγωγή αραιής βλάστησης λόγω της αύξησης των εμφανιζόμενων απόνερων αλλά στη συνέχεια μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας της βλάστησης καθώς μειώνεται η μέση ταχύτητα ροής. Λόγω της μείωσης της κλίμακας του στροβιλισμού, η διάχυση μειώνεται μέσα σε μια συστάδα. Συγκεκριμένα, για φυτικές πυκνότητες (λόγος του τετραγώνου της διαμέτρου προς το τετράγωνο της μέσης απόστασης μεταξύ των κυλίνδρων) μεγαλύτερες από 1%, οι κλίμακες στροβιλισμού ελέγχονται από τη γεωμετρία βλάστησης, δηλαδή τη διάμετρο  $d$ . Η κλίμακα μήκους ανάμειξης μειώνεται έτσι σε σύγκριση με τις συνθήκες ανοικτού καναλιού. Αυτή η αλλαγή στην κλίμακα του στροβιλισμού ελέγχει την τυρβώδη διάχυση, έτσι ώστε η τυρβώδης διάχυση να μειώνεται εντός της περιοχής βλάστησης, παρά το γεγονός ότι η ένταση της τύρβης μπορεί να αυξηθεί. Για υψηλότερη

πυκνότητα βλάστησης καθίσταται σημαντική η μηχανική διάχυση, δηλαδή η διάχυση που προκύπτει από την έμφραξη των διαδρομών άμεσης ροής από τη βλάστηση (στοιχεία συστοιχίας) και θα κυριαρχήσει στη συνολική διάχυση για  $Re_d < \sim 200$ .

Η εργασία των Wu et al (1999) διερευνά τη μεταβολή των συντελεστών τραχύτητας της βλάστησης με το βάθος της ροής. Χρησιμοποιήθηκε ένα στρώμα/πλέγμα από χονδρότριχες αλόγου (με διαστάσεις μήκος 7,3 m, πλάτος 1,2 m και ύψος  $1,5 \pm 0,3$  m) στην πειραματική μελέτη για την προσομοίωση της βλάστησης στα υδατορρέυματα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ο συντελεστής τραχύτητας μειώνεται με την αύξηση του βάθους σε μη βυθισμένες συνθήκες. Εντούτοις, σε πλήρως βυθισμένες συνθήκες, ο συντελεστής τραχύτητας της βλάστησης τείνει να αυξάνεται στα χαμηλά βάθη αλλά μετά μειώνεται ασυμπτωτικά σε μια σταθερά καθώς η στάθμη του νερού συνεχίζει να αυξάνεται. Αναπτύχθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο βασισμένο στην ισορροπία δυνάμεων για την εκτίμηση του συντελεστή τριβής των στοιχείων βλάστησης. Χρησιμοποιείται η εξίσωση Manning για να μετατρέψει τον συντελεστή τριβής  $C_d$  σε συντελεστή τραχύτητας  $n$ . Τα δεδομένα αυτής της εργασίας συγκρίνονται με αυτά από επιλεγμένες προηγούμενες εργαστηριακές δοκιμές και δοκιμές πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια σταθερή τάση της μεταβολής του συντελεστή τριβής έναντι του αριθμού Reynolds. Αυτή η τάση μπορεί να αναπαρασταθεί με έναν χαρακτηριστικό αριθμό βλάστησης  $k$ . Με δεδομένες πληροφορίες όπως η κλίση του πυθμένα, το ύψος της βλάστησης και ο αριθμός  $k$ , κάποιος μπορεί να εφαρμόσει το προτεινόμενο μοντέλο για να προβλέψει τον συντελεστή τραχύτητας που αντιστοιχεί σε διαφορετικά βάθη ροής.

Οι Nepf και Vivoni (2000) εστίασαν στη διάκριση των κυρίαρχων καθεστώτων ροής για αναδύομενη και βυθισμένη βλάστηση και συζήτησαν λεπτομερώς τη δομή ροής, τα χαρακτηριστικά τύρβης και την ανταλλαγή ορμής. Οι παρατηρήσεις τους υποδηλώνουν ότι η ροή μέσα σε μια συστάδα υδρόβιας βλάστησης μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές. Στην άνω συστάδα, που ονομάζεται "ζώνη κατακόρυφης ανταλλαγής", η κατακόρυφη τυρβώδης ανταλλαγή με το υπερκείμενο νερό είναι δυναμικά σημαντική για την ισορροπία της ορμής και της τύρβης και η τύρβη που δημιουργείται από τη μέση διάτμηση στην κορυφή της συστάδας είναι σημαντική. Η κάτω συστάδα ονομάζεται "ζώνη διαμήκους ανταλλαγής" επειδή επικοινωνεί με το περιβάλλον νερό κυρίως μέσω της διαμήκους μετακίνησης. Σε αυτήν την περιοχή, η τύρβη δημιουργείται τοπικά από τα στοιχεία της συστάδας και η εξίσωση ορμής είναι μια απλή ισορροπία της οπισθέλκουσας της βλάστησης και της κλίσης πίεσης. Σε αναδύομενες συστάδες υπάρχει μόνο μια διαμήκης ζώνη ανταλλαγής. Όταν η συστάδα βυθιστεί, εμφανίζεται μια κατακόρυφη ζώνη ανταλλαγής στην κορυφή της και βαθαίνει μέσα στην συστάδα καθώς αυξάνεται η βύθιση.

Στην εργασία του Järvelä (2002) μελετήθηκε η αντίσταση ροής του φυσικού γρασιδιού, ψηλών χόρτων και των θάμνων σε ένα εργαστηριακό κανάλι. Ο στόχος ήταν να διερευνηθεί, πώς το είδος, η πυκνότητα και η τοποθέτηση της βλάστησης, το βάθος ροής στην περιοχή μελέτης και η ταχύτητα επηρεάζουν τις απώλειες τριβής. Τα

φυτά μελετήθηκαν σε διάφορους συνδυασμούς υπό μη βυθισμένες και βυθισμένες συνθήκες σε συνολικά 350 πειράματα. Οι απώλειες ενέργειας μετρήθηκαν με διαφορικό αισθητήριο πίεσης και το βάθος νερού με αισθητήρα πίεσης, που αμφότερα ήταν συνδεδεμένα σε υπολογιστή με κατάλληλο λογισμικό. Τα αποτελέσματα δείχνουν μεγάλες διακυμάνσεις στο συντελεστή τριβής  $f$ , με το βάθος της ροής, την ταχύτητα, τον αριθμό Reynolds, και την πυκνότητα της βλάστησης. Ωστόσο, ο  $Re$  μόνο δεν ήταν αρκετός για να εξηγήσει την αντίσταση και η σχετική τραχύτητα από μόνη της δεν φαινόταν κατάλληλη για την εκτίμηση του συντελεστή τριβής  $f$ . Ο συντελεστής τριβής  $f$  εξαρτιόταν κυρίως από (1) την σχετική τραχύτητα στην περίπτωση του γρασιδιού, (2) την ταχύτητα ροής στην περίπτωση των θάμνων και τον συνδυασμό ψηλών χόρτων/γρασιδιού, και (3) το βάθος ροής σε περίπτωση θάμνων χωρίς φύλλα σε γυμνό πυθμενικό έδαφος. Τα φύλλα των θάμνων φαίνονταν να διπλασιάζουν ή ακόμα και να τριπλασιάζουν τον συντελεστή τριβής σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς φύλλα παρά το γεγονός ότι στον πυθμένα αναπτυσσόταν ψιλά χόρτα και στις δύο περιπτώσεις. Ο διπλασιασμός της πυκνότητας των θάμνων χωρίς φύλλα επίσης διπλασίασε τις τιμές  $f$  για τις ίδιες συνθήκες ροής. Για τους θάμνους χωρίς φύλλα, ο  $f$  φάνηκε να αυξάνει με το βάθος σχεδόν γραμμικά και ανεξάρτητα της ταχύτητας. Απροσδόκητα, διαφορετική απόσταση του ίδιου αριθμού των θάμνων χωρίς φύλλα με γρασίδι δεν είχε καμία σημαντική επίδραση στον  $f$ . Με βάση την πειραματική εργασία, αποκτήθηκε μια καλύτερη κατανόηση της αντίστασης ροής εξαιτίας διαφόρων συνδυασμών φυσικής άκαμπτης και εύκαμπτης βλάστησης υπό μη βυθισμένες και βυθισμένες συνθήκες και μπορεί περαιτέρω να ενσωματωθεί σε αριθμητικά μοντέλα.

Η εργασία των Righetti and Armanini (2002) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της αντίστασης λόγω βλάστησης σε ένα ποτάμι που χαρακτηρίζεται από πλήρως βυθισμένη βλάστηση η οποία σχηματίζεται από πυκνές αποικίες θάμνων κλιμακωτής διάταξης, μια αραιή και μια πυκνή. Η ροή παρουσιάζει ισχυρές χωρικές μεταβολές μεταξύ των φυτών που καθιστούν αναξιόπιστη την παραδοσιακή προσέγγιση βάσει μέσης χρονικά τιμής των τυρβωδών διακυμάνσεων. Προτείνεται ένα πιο χρήσιμο μοντέλο με βάση τη χρονική και χωρική μέση τιμή. Η κατακόρυφη κατανομή της μέσης ταχύτητας και της τυρβώδους τάσης έχουν μετρηθεί με τεχνικές ανεμομετρίας laser-Doppler, μέσω κανόνων χωρικής και χρονικής μέσης τιμής. Με βάση την χρονικά και χωρικά μέση ταχύτητα και το προφίλ τάσης Reynolds, προτείνεται ένα αναλυτικό μοντέλο δύο στρωμάτων, με σκοπό να περιγράψει τις ομοιόμορφες συνθήκες ροής σε ολόκληρο το βάθος ροής. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιούνται σε ένα εργαστηριακό κανάλι. Τέλος, κάποια σημεία που χρήζουν προσοχής είναι ότι ο γενικός τύπος μπορεί να επηρεαστεί από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού του θάμνου και η ανάλυση έχει επιβεβαιωθεί μόνο από δυο προσομοιώσεις πυκνοτήτων βλάστησης.

Οι Stone and Shen (2002) παρουσιάζουν μια εργαστηριακή μελέτη η οποία αποτελείται από μια εκτεταμένη σειρά πειραμάτων σε κανάλι για ροές με



αναδυόμενους και βυθισμένους κυλινδρικούς μίσχους διαφόρων μεγεθών και συγκεντρώσεων οι οποίοι είχαν κλιμακωτής γεωμετρίας διάταξη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντίσταση ροής μεταβάλλεται με το βάθος ροής, τη συγκέντρωση μίσχων, το μήκος και τη διάμετρο μίσχων. Η αντίσταση του μίσχου που δημιουργείται από τη ροή διαμέσου της βλάστησης εκφράζεται καλύτερα σε όρους μέγιστης μέσης καθ' ύψος ταχύτητας μεταξύ των μίσχων. Αναπτύσσονται τύποι βασισμένοι στην φυσική για την αντίσταση ροής, την φαινομενική ταχύτητα καναλιού και τις ταχύτητες ροής στο στρώμα τραχύτητας και στο επιφανειακό στρώμα. Οι τύποι επιβεβαιώνονται με τα δεδομένα του καναλιού από την συγκεκριμένη μελέτη καθώς επίσης και από παλιότερες μελέτες. Επίσης, παρουσιάζεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό των υδραυλικών συνθηκών του καναλιού (αντίσταση ροής -ταχύτητας) χρησιμοποιώντας αυτούς τους τύπους. Η επίδραση της ευκαμψίας της βλάστησης δεν εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη καθώς θεωρείται αμελητέα αλλά προτείνεται περαιτέρω έρευνα πάνω σε αυτό.

Το περιβάλλον μικρο-ροής των υδρόβιων φυτών με αναφορά στα είδη *Myriophyllum* και *Hydrilla* προσομοιώνεται σε ένα εργαστηριακό κανάλι στην εργασία των Shi and Hughes (2002). Κάθε προφίλ της μέσης ταχύτητας αποτελείται από τρεις υδροδυναμικές περιοχές (δηλαδή την ζώνη εσωτερικά της συστοιχίας, την ζώνη πάνω από την συστοιχία και μια μεταβατική ζώνη μεταξύ αυτών), που υποδηλώνουν την παρουσία των δύο βενθικών οριακών στρωμάτων (εσωτερικό και εξωτερικό). Από τα 38 μετρημένα προφίλ της μέσης ταχύτητας, τα περισσότερα δεν ταιριάζουν σε μια λογαριθμική σχέση. Οι ακόλουθες υδροδυναμικές παράμετροι χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των περιοχών ροής: η τοπική ταχύτητα τριβής ( $u_*$ ), το μήκος τραχύτητας ( $z_0$ ), ο αριθμός Reynolds τραχύτητας της συστοιχίας ( $Re_*$ ), η διατμητική τάση πυθμένα ( $\tau_0$ ) και το στρωτό υπόστρωμα ( $\sigma$ ).

Στην εργασία των Carollo et al (2002), μελετήθηκε πειραματικά η ροή πάνω από εύκαμπτη πυθμενική βλάστηση. Ένα δισδιάστατο ADV χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των τοπικών ταχυτήτων ροής για διαφορετικές συγκεντρώσεις βλάστησης, παροχές και κλίσεις καναλιού. Αναλύεται η επίδραση της συγκέντρωσης βλάστησης και η αναλογία βάθους / ύψους βλάστησης επί των μετρούμενων προφίλ ταχύτητας. Όλες οι μετρημένες διανομές ταχύτητας είναι σχήματος S και παρουσιάζουν ένα προφίλ τριών ζωνών. Η σχέση μεταξύ της κατανομής ταχύτητας και της κατανομής έντασης τύρβης αναλύεται επίσης. Τα χαρακτηριστικά (σημείο καμψής, μέγιστη τιμή, ασύμπτωτες) των μετρούμενων κατανομών ταχύτητας και τα αποτελέσματα των προηγούμενων ερευνητών χρησιμοποιούνται για την επιλογή μιας αναλυτικής έκφρασης για το σχήμα του προφίλ της ταχύτητας. Ένα θεωρητικό προφίλ ταχύτητας συνάγεται χρησιμοποιώντας τη κλασική προσέγγιση του Prandtl με το μήκος ανάμειξης με μια νέα έκφραση για το μήκος αυτό. Το συνεπαγόμενο προφίλ τεσσάρων συντελεστών επιτρέπει την περιγραφή της ροής τόσο εντός όσο και πάνω από τη βλάστηση. Η φυσική και γεωμετρική έννοια των τεσσάρων συντελεστών παρουσιάζονται επίσης. Σύμφωνα με προηγούμενες εργασίες, το ύψος λυγισμένης βλάστησης συμπίπτει με το βάθος του νερού στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη ένταση

τύρβης και όπου εμφανίζεται το σημείο καμπής σε σχετικό βάθος  $Y_i \equiv h_k$ . Η ανάλυση όλων των μετρημένων κατανομών ταχύτητας υπογράμμισε ότι η θέση της λογαριθμικής ζώνης επηρεάζεται από την αναλογία βάθους / ύψους βλάστησης, αλλά δεν παρατηρήθηκε σχετική επίδραση της συγκέντρωσης της βλάστησης-μίσχων. Ωστόσο, η συγκέντρωση της βλάστησης-μίσχων επηρεάζει το σχήμα του προφίλ ταχύτητας. Το προτεινόμενο προφίλ ταχύτητας μπορεί επίσης να ενσωματωθεί εύκολα για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας ροής στην κατακόρυφο που είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της μέσης ταχύτητας της εγκάρσιας διατομής και, στη συνέχεια, του συντελεστή απωλειών (friction factor). Στη συνέχεια, η μέση ταχύτητα της εγκάρσιας διατομής συγκρίθηκε με την «πραγματική», που λήφθηκε από τις μετρούμενες τιμές παροχής και βάθους νερού. Αυτή η σύγκριση έδειξε μια αμελητέα διαφορά μεταξύ των δύο τιμών μέσης ταχύτητας, μέσου σφάλματος περίπου 2%.

Ο κύριος στόχος της έρευνας των Stephan and Gutknecht (2002) είναι η ανάλυση της επίδρασης της τραχύτητας που προκαλείται από την υδρόβια βλάστηση, συγκεκριμένα τα βυθισμένα macrophytes, στο σύνολο του πεδίου ροής. Αυτή η έρευνα επικεντρώνεται στον ορισμό μιας χαρακτηριστικής υδραυλικής παραμέτρου τραχύτητας για να ποσοτικοποιηθεί η αντίσταση της βλάστησης. Διεξήχθησαν εργαστηριακά πειράματα με τρεις διαφορετικούς τύπους της βλάστησης, που επιλέχθηκαν με σκοπό να υπάρξει ποικιλία στις δομές των φυτών καθώς και στα μήκη μίσχων. Αυτά τα φυτά είναι πολύ εύκαμπτα και, επομένως, προσαρμόζονται στη ροή. Επιπλέον, αντιδρούν με κυματιστή κίνηση στη ροή. Μετρήσεις της ταχύτητας πάνω από αυτά τα φυτά διεξήχθησαν για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της υδραυλικής τραχύτητας και του ύψους του φυτού μετά από τον ανασχηματισμό του  $h_k$  (deflected plant height). Το ύψος ανασχηματισμού του φυτού χρησιμοποιείται ως γεωμετρική παράμετρος τραχύτητας, ενώ η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου με βάση τον γενικό λογαριθμικό νόμο, ο οποίος τροποποιήθηκε από τον Nikuradse, χρησιμοποιήθηκε ως υδραυλική παράμετρος τραχύτητας. Αναλύθηκε επίσης η επίδραση του σχετικού βυθίσματος στην υδραυλική τραχύτητα. Η ανάλυση των μετρήσεων ταχύτητας δείχνει ότι η ισοδύναμη τραχύτητα άμμου και η απόσταση του επιπέδου μηδενικής ταχύτητας του λογαριθμικού νόμου συσχετίζονται με το ύψος ανασχηματισμού του φυτού και είναι περίπου ίσα σε αυτό το ύψος. Η ισοδύναμη τραχύτητα της άμμου καθώς και η απόσταση του επιπέδου μηδενικής ταχύτητας του λογαριθμικού προφίλ ταχύτητας ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους με το μέσο ύψος εκτροπής του φυτού και αυξήθηκε με την αύξηση του ύψους του φυτού. Έτσι, το μέσο εκτρεπόμενο ύψος φυτού περιγράφει τη γεωμετρική τραχύτητα των φυτών συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά του φυτού και της ροής. Επιπλέον, το μέσο ύψος εκτροπής του φυτού είναι μια χρήσιμη κλίμακα μήκους υδραυλικής τραχύτητας για να περιγράψει την υδραυλική αντίσταση λόγω των υδρόβιων φυτών. Τα αποτελέσματα επισημαίνουν ότι η κυματιστή κίνηση των φυτών δεν αυξάνει την υδραυλική αντίσταση επειδή η ισοδύναμη τραχύτητα της άμμου συσχετίζεται καλύτερα με τη μέση τιμή και όχι με το μέγιστο ύψος εκτροπής του φυτού. Οι τυρβώδεις εντάσεις για τη ροή μικρής σχετικής βύθισης πάνω από τα χαλίκια

μειώνονται σημαντικά με τη μείωση της σχετικής βύθισης. Αυτό το φαινόμενο απόσβεσης δεν παρατηρήθηκε για τη ροή μικρής σχετικής βύθισης πάνω από την εύκαμπτη βλάστηση.

Η υδρο-μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ ροής και εύκαμπτων φυτών που καλύπτουν τον πυθμένα του ποταμού μελετήθηκε στην εργασία των Velasco et al (2003). Επιτεύχθηκε ο χαρακτηρισμός της αντίστασης ροής (συντελεστές τριβής) εξαιτίας εύκαμπτης τραχύτητας-βλάστησης για διάφορες πυκνότητες φυτών. Επιπλέον, η μέτρηση λεπτομερών προφίλ τυρβώδους ταχύτητας μέσα και πάνω από βυθισμένους και σε κάμψη μίσχους επέτρεψε να διακριθούν διαφορετικές τυρβώδεις περιοχές. Προέκυψαν μερικές ενδιαφέρουσες σχέσεις μεταξύ του πεδίου ταχύτητας και του αποκλινόμενου ύψους των φυτών, όπως μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ μιας αδιάστατης παραμέτρου ροής και της σχετικής εκτροπής των φυτών. Τυρβώδεις τάσεις μετρήθηκαν και έδειξαν δύο διαφορετικές περιοχές: πάνω από και μέσα στην περιοχή βλάστησης. Η φασματική αλληλεπίδραση μεταξύ των ταλαντώσεων των φυτών, των ιχνών τους (απόνερον) και της τύρβης σε διαφορετικά βάθη, δημιουργεί έντονα ανισότροπες τυρβώδεις διακυμάνσεις και προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι τυρβώδεις διαδικασίες και η πολύπλοκη δομή τους, εφαρμόστηκαν θεωρητικές έννοιες και αρκετές αναλύσεις δεδομένων. Η κατανόηση της ισχυρής ανισοτροπίας από τις μετρήσεις ADV και ορισμένες οπτικές παρατηρήσεις των δομών ροής δείχνουν ότι υπάρχουν πολλές πιθανές κλίμακες συζευγμένων μηκών και μηχανισμοί συνεκτικής δομής. Η μείωση της αντίστασης στη ροή σε εύκαμπτη βλάστηση έχει επιβεβαιωθεί για την αύξηση των ταχυτήτων και τη χαμηλή σχετική τραχύτητα ( $h_k/H$ ). Υπό πλήρως καμπτόμενες συνθήκες φυτού, οι διακυμάνσεις στους συντελεστές τριβής για διαφορετικές πυκνότητες φυτών μειώνονται και η τιμή τους πέφτει σχεδόν ασυμπτωτικά στον συντελεστή τριβής, που ισοδυναμεί με τον αντίστοιχο χωρίς βλάστηση. Υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ της βλαστικής ενεργούς τραχύτητας και της τοπικής παραμόρφωσης των φυτών (ύψους εκτροπής φυτού). Η πυκνότητα, η ακαμψία και η γεωμετρική ροπή του φυτικού μοντέλου, σε συνδυασμό με τις συνθήκες ροής, προκαλούν αντίσταση στη ροή. Αναλύθηκαν δύο διαφορετικοί μηχανισμοί ανταλλαγής ορμής: μέσα στη βλάστηση, όπου οι εγκάρσιες τυρβώδεις τάσεις κυριαρχούν στις κατακόρυφες συνιστώσες (χωρικές βαθμίδες πίεσης στα απόνερα), και πάνω από τα φυτά, όπου η τυρβώδης παραγωγή από κατακόρυφες τάσεις Reynolds αναπτύσσουν ένα λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας. Η ανισοτροπία της τύρβης είναι εμφανής σε διαφορετικά βάθη και οφείλεται σε αρκετούς διαφορετικούς μηχανισμούς. Οι κλίσεις πίεσης και οι δευτερεύουσες ροές διέπουν τη χαμηλότερη ζώνη της περιοχής βλάστησης, μειώνοντας την ποσότητα της τάσης διάτμησης του πυθμένα. Οι υπολογισμοί των ολοκληρωμένων κλιμάκων μήκους δείχνουν σαφώς την κατανομή των δομών στροβίλων με το βάθος. Οι τυρβώδεις δομές μεγάλης κλίμακας περιορίζονται από χωρικές και γεωμετρικές κλίμακες τραχύτητας και οι φασματικές πληροφορίες σε διαφορετικά βάθη δείχνουν να είναι πολύ χρήσιμες.

Τα εργαστηριακά πειράματα των Wilson et al (2003) χρησιμοποιούνται για να

διερευνήσουν την επίδραση δύο μορφών εύκαμπτης βλάστησης στη δομή τύρβης μέσα σε μια βυθισμένη συστοιχία και στην παραπάνω περιοχή της επιφανειακής ροής. Οι δύο προσομοιωμένες μορφές φυτών περιλαμβάνουν εύκαμπτες ράβδους σταθερού ύψους, και τις ίδιες ράβδους με προσαρτημένο φύλλωμα. Αυτές οι μορφές φυτού ήταν διατεταγμένες σε κανονική κλιμακωτή διαμόρφωση, με την ίδια πυκνότητα. Η γεωμετρία του φυτού και οι μηχανικές του ιδιότητες έχουν κλίμακα αντίστοιχη προς ένα πραγματικό υδρόβιο φυτό χρησιμοποιώντας ομοιότητα Froude. Περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον ποσοτικό προσδιορισμό της ακαμψίας, της ελαστικότητας και της σχέσης δύναμης τριβής-ταχύτητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι μέσα στο στρώμα του φυτού, το προφίλ ταχύτητας δεν ακολουθεί πλέον το προφίλ λογαριθμικού νόμου, και η μέση ταχύτητα για την συστοιχία ράβδων / φύλλων είναι μικρότερη από τη μισή από αυτήν που παρατηρείται για την απλή συστοιχία ράβδων. Εκτός από το μέσο πεδίο ροής, οι εντάσεις τύρβης δείχνουν ότι η επιπλέον επιφανειακή περιοχή των φύλλων μεταβάλλει τη μεταφορά ορμής μεταξύ των περιοχών εντός της συστοιχίας και της επιφανειακής ροής. Ενώ το φύλλωμα προκαλεί μεγαλύτερες δυνάμεις τριβής, η τύρβη που δημιουργείται από την διάτμηση μειώνεται λόγω της αναστολής της ανταλλαγής ορμής από την επιφάνεια των φύλλων. Η προσθήκη του φυλλώματος στην κορυφή των στελεχών αναστέλλει την τυρβώδη ανάμιξη μεταξύ των δύο περιοχών ροής, δηλ. του στρώματος συστοιχίας και του επιφανειακού στρώματος ροής, και μετατοπίζει την κορυφή τυρβώδους τάσης σε ένα επίπεδο πάνω από την άνω επιφάνεια της συστοιχίας. Είναι γνωστό ότι η πρόσθετη οπισθέλκουσα (αντίσταση) που ασκείται από τα φυτά μειώνει τη μέση ταχύτητα ροής των περιοχών εντός βλάστησης σε σχέση με αυτές που δεν έχουν βλάστηση, αλλά αυτή η έρευνα δείχνει ότι η μορφή του φυτού μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο μέσο πεδίο ροής και, επομένως, να επηρεάσει δυννητικά τις στρατηγικές διαχείρισης του συστήματος ποταμών και υδροτόπων. Αυτό υποδηλώνει ότι σε περιοχές που είναι επιρρεπείς στην έκπλυση και διάβρωση, τα μακρόφυτα με φύλλωμα μπορεί να παρέχουν καλύτερη προστασία σε σχέση με τα ισόδυναμα χωρίς φύλλωμα. Αυτή η έρευνα δείχνει ότι η μεγαλύτερη περιοχή απορρόφησης της ορμής που παρέχεται από ορισμένες μορφές φυτού, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο μέσο πεδίο ροής ολόκληρου του καναλιού.

Η εργασία του Green (2004) περιλαμβάνει ένα πείραμα πεδίου (σε κανονικό ποτάμι με κανονική βλάστηση τυχαία κατανεμημένη σε συστοιχίες με ανομοιόμορφα μεγέθη) και ασχολείται με τα προφίλ ταχύτητας κατά μήκος και κάθετα του άξονα της βλάστησης (σε μια συστοιχία) που αποτελείται από macrophytes. Η ταχύτητα ροής και τα μοτίβα τύρβης μετρήθηκαν εντός και γύρω από ένα κοινό loticmacrophyte, *Ranunculus penicillatus* subspecies *pseudofluitans* (streamwater-crowfoot) χρησιμοποιώντας ένα δισδιάστατο ηλεκτρομαγνητικό ρευματομέτρο (EMCM). Λόγω της μεγάλης πυκνότητας των ειδών αυτών, υπήρξε μια απότομη κλίση ταχύτητας στο όριο των φυτών, με ταχύτητες να πέφτουν σε μία συνεχώς χαμηλή τιμή μετά από όχι περισσότερο από 5 cm εντός του φυτού, αναγκάζοντας έτσι το μεγαλύτερο μέρος της ροής να κινηθεί πάνω και γύρω από τα macrophytes.

Υπήρξε μια νεκρή ζώνη νερού αμέσως κατάντη του φυτού, πέρα από την οποία το ρεύμα κινείται προς τα μέσα από τις πλευρές επιτρέποντας τη ροή υπό τους συρόμενους βλαστούς. Υψηλές τυρβώδεις εντάσεις καταγράφηκαν για τις κατά μήκος και εγκάρσιες συνιστώσες της ταχύτητας στα πλευρικά περιθώρια και κατάντη του φυτού. Εν τω μεταξύ, οι κυματισμοί του νερού ανάντη του φυτού παράγουν στροβιλισμό/τύρβη στην κατά μήκος συνιστώσα, αλλά όχι στην εγκάρσια συνιστώσα. Εντοπίστηκε ένα απότομο όριο μεταξύ των μεγάλων ταχυτήτων σε περιοχές που δεν έχουν βλάστηση και των μικρών ταχυτήτων εντός του συγκεκριμένου είδους φυτού. Αυτό υποδηλώνει ότι ένα πρακτικό μοντέλο που βασίζεται στο αποτέλεσμα έμφραξης από ένα φυτό θα έχει ένα αποδεκτό επίπεδο φυσικού ρεαλισμού τουλάχιστον για αυτό το είδος και πιθανότατα για άλλα είδη με παρόμοια πυκνή δομή. Αυτή η μελέτη έχει επίσης εντοπίσει τη δημιουργία τύρβης στα όρια των υδρόβιων φυτών, η οποία επηρεάζει την αντίσταση. Έτσι, η χωρική κατανομή των φυτών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ένα μοντέλο αντίστασης της βλάστησης. Παρομοίως, η μεταβλητότητα της ροής στο ελεύθερο ρεύμα δίπλα στα μακρόφυτα δημιουργεί περιοχές τόσο διάπλυσης των λεπτών κόκκων όσο και εναπόθεσης, κάτι που με τη σειρά του, παρέχει ετερογένεια στο υπόστρωμα του ενδιαίτηματος για να κατοικήσουν διαφορετικά είδη ασπόνδυλων. Αυτή η δομή της βλάστησης παράγει υψηλό βαθμό ετερογένειας της ροής στην περιοχή της. Η εργασία επίσης καταλήγει σε επιπλέον οικοϋδραυλικά συμπεράσματα σε σχέση με την υδρόβια βιοποικιλότητα.

Η κανονική μορφή ατμοσφαιρικών ροών κοντά στην επιφάνεια της γης, ελλείψει συστοιχίας βλάστησης, μοιάζει με ένα οριακό στρώμα με τραχύ πυθμένα, αλλά με παρουσία εκτεταμένης και πυκνής συστοιχίας βλάστησης η ροή μέσα και ακριβώς πάνω από το φύλλωμα συμπεριφέρεται ως στρώμα διεισδύμενης ανάμιξης. Οι Roggi et al. (2004) μελέτησαν το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιώντας λεπτομερείς μετρήσεις ταχύτητας με laser-Doppler που διεξάγονται σε ανοιχτό κανάλι σε ένα ευρύ φάσμα πυκνοτήτων βλάστησης και αναπτύσσοντας ένα φαινομενολογικό μοντέλο που περιγράφει τη δομή της τύρβης μέσα στην στρώση της συστοιχίας (CSL). Το μοντέλο διαχωρίζει τον χώρο μέσα στο CSL σε τρεις ξεχωριστές ζώνες: τη βαθιά ζώνη στην οποία το πεδίο ροής φαίνεται να κυριαρχείται από στροβιλισμούς που συνδέονται με τη σειρά στροβίλων von Kármán, αλλά περιοδικά διακόπτονται από ισχυρές σαρώσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων επηρεάζονται από την πυκνότητα της συστοιχίας. Η δεύτερη ζώνη, η οποία βρίσκεται κοντά στην κορυφή της συστοιχίας, είναι μια υπέρθεση συνδεδεμένων στροβιλισμών και κυμάτων Kelvin – Helmholtz που παράγονται από διατμητική αστάθεια στα προφίλ μέσης διαμήκους ταχύτητας. Εδώ, η σχετική σημασία του στρώματος ανάμιξης και των συναφών στροβιλισμών φαίνεται να ποικίλλει ανάλογα με την πυκνότητα της συστοιχίας μέσω ενός συντελεστή  $\alpha$ . Οι συγγραφείς έδειξαν ότι η σχετική ενίσχυση της τυρβώδους διάχυσης πάνω από την τιμή του επιφανειακού στρώματος κοντά στην κορυφή της συστοιχίας εξαρτάται από το μέγεθος του  $\alpha$ . Στην ανώτερη ζώνη, η ροή ακολουθεί την κλασική θεωρία οριακού στρώματος. Τέλος, αποδεικνύεται ότι ο συνδυασμός αυτής της πρόσφατης προτεινόμενης κλίμακας μήκους ( $\alpha$ ) και μοντέλων closure

(κλεισίματος ) πρώτης τάξης μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια τη μέση ταχύτητα και τις τάσεις Reynolds για ένα ευρύ φάσμα πυκνοτήτων τραχύτητας. Με την πρόσφατη πρόοδο στην τηλεπισκόπηση της μορφολογίας της συστοιχίας, αυτό το μοντέλο προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη φυσική προσέγγιση για την περιγραφή της ροής πάνω από βλάστηση στην επιφάνεια της γής χωρίς να καταφύγει σε εμπειρικά μήκη τραχύτητας.

Στην εργασία των Carollo et al (2005) τα πειραματικά δεδομένα που συλλέγονται από ένα ευθύ κανάλι με πυθμένα που καλύπτεται από βλάστηση σε μορφή γρασιδιού έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της αντίστασης ροής για εύκαμπτα βυθισμένα στοιχεία. Η βλάστηση ήταν ένα μίγμα τριών φυτών. Αρχικά, οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου του Kouwen. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μία βαθμονόμηση δύο συντελεστών που εμφανίζονται στην ημιλογαριθμική εξίσωση αντίστασης ροής. Τέλος, εφαρμόζοντας το θεώρημα Π και την συνθήκη ατελούς αυτο-ομοιότητας (the incomplete self-similarity condition), εξάγεται μια εξίσωση αντίστασης ροής που συνδέει τον συντελεστή τριβής με τον αριθμό Reynolds, την αναλογία βάθους / ύψους βλάστησης και τον βαθμό ανασχηματισμού. Οι τέσσερις συντελεστές που εμφανίζονται σε αυτήν την εξίσωση έχουν εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις που αντιστοιχούν σε τέσσερις συγκεντρώσεις βλάστησης. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε επιβάλλοντας ότι μόνο ο παράγοντας κλίμακας  $A_0$  του νόμου για την αντίσταση ροής εξαρτάται από τη συγκέντρωση της βλάστησης. Σε αυτό το άρθρο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξετάστηκε πρώτα η μέθοδος του Kouwen. Χαρακτηρίζοντας τα στοιχεία βλάστησης από μηχανικής άποψης, η μέθοδος εισάγει τη λεγόμενη «συνολική ακαμψία» που λαμβάνει υπόψη τόσο τη συγκέντρωση όσο και την ακαμψία των στοιχείων. Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα, προέκυψε ότι η μέθοδος του Kouwen παράγει μια συστηματική υπερεκτίμηση της αντίστασης ροής, η οποία αυξάνεται με τη συγκέντρωση των φυτικών στοιχείων. Για την επίτευξη καλής συμφωνίας με τα πειραματικά δεδομένα, η μέθοδος χρειάστηκε βαθμονόμηση. Ειδικότερα, επανεκτιμήθηκαν οι συντελεστές που εμφανίζονται στον ημι-λογαριθμικό νόμο της αντίστασης ροής.

Ένα νέο μοντέλο αναπτύχθηκε από τους Huthoff et al (2007) για τη μέση ταχύτητα ροής με παρουσία βυθισμένης βλάστησης. Το μοντέλο βασίζεται σε μια προσέγγιση δύο στρωμάτων, όπου η ροή πάνω και μέσα από το στρώμα βλάστησης περιγράφεται ξεχωριστά. Η βλάστηση αντιμετωπίζεται ως ένα ομοιογενές πεδίο πανομοιότυπων κυλινδρικών στελεχών και το πεδίο ροής θεωρείται σταθερό και ομοιόμορφο. Αποδεικνύεται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτιμήσεις κλίμακας του πεδίου μέσης ροής για την αποφυγή περιπλοκών που σχετίζονται με διαδικασίες ροής μικρότερης κλίμακας και ότι η συμπεριφορά της ροής κατά μέσο όρο πάνω από την βλάστηση περιγράφεται με ακρίβεια. Η προκύπτουσα έκφραση του μέσου πεδίου ροής είναι απλή σε μορφή, ακολουθεί τους θεμελιώδεις νόμους της ροής ρευστού και δείχνει πολύ καλή συμφωνία με τα πειράματα εργαστηριακών καναλιών. Το νέο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορη αξιολόγηση της υδραυλικής

απόκρισης ενός ποταμού σε περιπτώσεις όπου κατακλύζονται από πλημμύρα παραποτάμιες περιοχές με βλάστηση. Στην ίδια μελέτη, η ροή πάνω από στοιχεία τραχύτητας μεγάλης κλίμακας περιγράφεται από ένα μοντέλο μέσης ταχύτητας όπου διακριτά χαρακτηριστικά ροής αποδίδονται σε δύο ξεχωριστά στρώματα ροής. Οι προβλέψεις της νέας έκφρασης για τη μέση ταχύτητα κατά βάθος για ροή με βυθισμένη άκαμπτη βλάστηση δίνουν εξαιρετική συμφωνία με τις μετρηθείσες ταχύτητες ροής. Αποδείχθηκε ότι η μέση ροή κατά βάθος στο στρώμα αντίστασης περιγράφεται επαρκώς μέσω μιας απλής ισορροπίας δυνάμεων. Εκτός από τον συντελεστή οπισθέλκουσας που είναι ιδιαίτερος για το σχήμα των στοιχείων αντίστασης, δεν απαιτείται περαιτέρω παράμετρος βαθμονόμησης για το μοντέλο στρώματος αντίστασης. Για το επιφανειακό στρώμα, μια σύγκριση με τα αποτελέσματα από τα πειράματα καναλιών δείχνει ότι το μήκος κλίμακας  $l$ , που απαιτείται στη σχέση μέσης ταχύτητας με βάθος, αντιπροσωπεύεται καλά από την απόσταση μεταξύ των κυλινδρικών στελεχών. Ένας εκθέτης τύπου δυναμικού νόμου που εξαρτάται από το βάθος χρησιμοποιείται για να ωθήσει τον νόμο κλίμακας σε μια ρεαλιστική οριακή τιμή για σχετικά ρηχές επιφανειακές ροές. Αυτός ο προσαρμοστικός δυναμικός εκθέτης βελτιώνει τις προβλεπόμενες ταχύτητες στο επιφανειακό στρώμα εάν η βλάστηση διεισδύει περίπου στο ήμισυ της συνολικής στήλης νερού, έως ότου αναδυθεί η βλάστηση (και το επιφανειακό στρώμα εξαφανίζεται). Για σχετικά μεγαλύτερα βάθη του επιφανειακού στρώματος, οι μέσες ταχύτητες ροής ακολουθούν τον νόμο αντίστασης του Manning.

Στο σημείωμα (Discussion) των Nikora et al (2008) εξετάζονται οι επιπτώσεις της βλάστησης στην υδραυλική αντίσταση σε μικρά ρέματα και προτείνονται απλές ποσοτικές σχέσεις για την πρόβλεψη και την ποσοτικοποίηση αυτών των επιπτώσεων χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του φυτού με τη μεγαλύτερη ερμηνευτική δύναμη. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι επιπτώσεις της βιομάζας των υδρόβιων φυτών, του ύψους και της δομής (αρχιτεκτονικής) τους στην υδραυλική απόδοση πέντε ρεμάτων στην Νέα Ζηλανδία που αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο εύρος διαστάσεων καναλιού, ροών, ειδών υδρόβιων φυτών και συστάδων. Η ροή ήταν υποκρίσιμη και τυρβώδης ενώ οι μετρήσεις έγιναν σε διάστημα έξι μηνών, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα μεγέθη της παροχής, του πλάτους των ρεμάτων και του βάθους, για διάφορους σχηματισμούς ξεχωριστών επιφανειών βλάστησης. Έτσι μελετήθηκε η επίδραση των συντελεστών  $n$ ,  $C$ ,  $f$  σε σχέση με τις υδραυλικές παραμέτρους και τις παραμέτρους βλάστησης, η εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης από τις παραμέτρους βλάστησης και η επίδραση της απομάκρυνσης της βλάστησης. Το πεδίο ροής μετρήθηκε με ADV ενώ η στάθμη του νερού με μια συσκευή μέτρησης με laser. Συμπερασματικά, οι συγκρίσεις μεταξύ των παραμέτρων της βλάστησης έδειξαν ότι οι λόγοι του μέσου ύψους της συστοιχίας προς το μέσο βάθος ροής και του μέσου μήκους του φυτού προς το μέσο βάθος ροής ήταν οι καλύτεροι περιγραφείς της τραχύτητας. Οι επιδράσεις των μεμονωμένων ειδών των φυτών και τα χαρακτηριστικά μοτίβα ξεχωριστών επιφανειών τους δεν ήταν σημαντικές. Τα δεδομένα από όλους τους τόπους συμπίπτουν σε απλές γραμμές,

υποδεικνύοντας ότι οι γενικές φυσικές παράμετροι της βλάστησης πρέπει να είναι αυτές που κυρίως καθορίζουν την υδραυλική αντίσταση στα υπό μελέτη ρέματα και όχι οι ειδικές παράμετροι κάθε είδους βλάστησης όπως συχνά υποτίθενται.

Στη μελέτη των Rhee et al (2008), τρία είδη Κορεάτικης φυσικής βλάστησης (*Zoysia matrella*, *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. και *Phragmites communis* Trin.) χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα σε κανάλι, σχετικά με την επίδραση της βλάστησης του καναλιού στην αντίσταση ροής. Καμπύλες αντίστασης 'n-VR' όπου n ο συντελεστής Manning, V η μέση ταχύτητα και R η υδραυλική ακτίνα, αναπτύχθηκαν για κάθε είδος βλάστησης. Όλα τα είδη βλάστησης δοκιμάστηκαν κάτω από συνθήκες μη κομμένης βλάστησης. Το είδος *Z. Matrella* δοκιμάστηκε υπό πλήρως βυθισμένες συνθήκες και τα άλλα δυο είδη δοκιμάστηκαν κάτω από βυθισμένες και μη βυθισμένες συνθήκες. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δυο εξωτερικά κανάλια κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων, μια για κάθε είδος βλάστησης με διαφορετική πυκνότητα. Πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές πειραμάτων για τα είδη *Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng. και *Phragmites communis* Trin. με πυκνότητες 206 και 154 stems/m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Ο συντελεστής αντίστασης (Manning's n) συγκλίνει περίπου στην τιμή 0,027 για το είδος *Z. Matrella* καθώς το VR αυξάνεται. Οι συντελεστές αντίστασης για τα άλλα φυτά βρέθηκαν να επηρεάζονται από τις καταστάσεις των φυτών, δηλαδή αν είναι χλωρά ή ξεραμένα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του ανασχηματισμένου μέρους της βλάστησης και της επιφάνειας του νερού μπορεί επίσης να αυξήσει τον συντελεστή αντίστασης. Σε όρους βάθους νερού, το είδος *P. communis* Trin βρέθηκε να επηρεάζει περισσότερο τους συντελεστές αντίστασης σε σύγκριση με τα είδη *Z. matrella* και *P. alopecuroides* (L.) Spreng. Κάποια γενικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι: (1) ο συντελεστής αντίστασης του *Z. matrella* προσεγγίζει μια ασυμπτωτική τιμή 0,027, η οποία είναι ίδια με την τιμή που πρότεινε ο Chow (1959). Αυτή η τιμή μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλα κοντά χόρτα, (2) εύκαμπτα χόρτα ενδιάμεσου ύψους όπως το *P. alopecuroides* (L.) Spreng. επηρεάζονται λιγότερο από τη διακύμανση του βάθους του νερού, επομένως, για το σχεδιασμό του καναλιού, η ίδια καμπύλη αντίστασης μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στις βυθισμένες όσο και στις μη βυθισμένες συνθήκες, (3) οι συντελεστές αντίστασης των «ξεραμένων» φυτών είναι συνήθως μικρότεροι από εκείνους των «χλωρών» και (4) οι συντελεστές αντίστασης είναι μεγαλύτεροι όταν η ροή επηρεάζεται τόσο από το φύλλο και το βλαστικό μέρος της βλάστησης από ό,τι όταν επηρεάζεται μόνο από το βλαστικό μέρος της βλάστησης. Το αποτέλεσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γέφυρα για άλλες έρευνες, έτσι ώστε τα κριτήρια που αναπτύχθηκαν για διαφορετικά χόρτα και ποτάμια περιβάλλοντα μπορούν να προσαρμοστούν στις κορεατικές ποτάμιες συνθήκες.

Η εργασία των Tanino and Nepf (2008) διερευνά την τριβή που ασκείται από τυχαία κατανεμημένους, άκαμπτους, αναδυόμενους κυλίνδρους ομοιόμορφης διαμέτρου  $d=0.64\text{cm}$  (απόσταση κυλίνδρων  $2d$ ). Πειραματικές μετρήσεις παρουσιάζονται για λόγους όγκου στερεών (βλάστηση)  $\phi=0.091, 0.15, 0.20, 0.27,$  και  $0.35$  και αριθμό



Reynolds κυλίνδρου  $Re_p = U_p d / \nu = 25$  έως 685, όπου  $U_p$  η χρονικά και κατά την διατομή μέση ταχύτητα πόρων και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα. Αυτά τα εύρη συμπίπτουν με τις συνθήκες στις συστοιχίες υδρόβιων φυτών. Ο μέσος χρονικά και κατά την διατομή μέσος συντελεστής τριβής  $C_D$  μειώθηκε με την αύξηση του  $Re_p$  και αυξήθηκε με την αύξηση του  $\phi$  κάτω από τις συνθήκες ροής που ερευνήθηκαν. Ο αδιάστατος λόγος της μέσης τριβής ανά μονάδα μήκους κυλίνδρου  $\langle f_D \rangle_H$  με το γινόμενο της συνεκτικότητας  $\mu$  και το  $U_p$  παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση με το  $Re_p$  της μορφής  $\langle f_D \rangle_H / (\mu U_p) = \alpha_0 + \alpha_1 Re_p$ . Στο εύρος των πειραματικών συνθηκών, το  $\alpha_1$  αυξάνεται μονοτονικά με το  $\phi$ . Αντίθετα, το  $\alpha_0$  είναι σταθερό για  $0.15 \leq \phi \leq 0.35$ , που δείχνει ότι η συνεκτική τριβή ανά μονάδα μήκους κυλίνδρου είναι ανεξάρτητη του  $\phi$  για αυτό το εύρος.

Στη εργασία των Chen et al (2009), δύο διαφορετικά είδη φυσικών υδρόβιων φυτών χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των συντελεστών αντίστασης (Manning's  $n$ ). Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές πυκνότητες βλάστησης ομοιόμορφης κατανομής και σε κάθε μια εφαρμόστηκαν 4-5 ταχύτητες ροής ενώ πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων χωρίς βλάστηση για σύγκριση με τις άλλες σειρές. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι κάθε είδος φυτού επηρεάζει διαφορετικά από άποψη αντίστασης ροής. Η ανάλυση των υδραυλικών παραμέτρων υποδεικνύει ότι υπάρχουν ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ του συντελεστή αντίστασης και του αριθμού Froude. Ο συντελεστής αντίστασης και ο αριθμός Froude έχουν εκθετική σχέση για την οποία παρουσιάζεται μια εξίσωση βασισμένη στα πειραματικά δεδομένα. Επομένως, ο αριθμός Froude μπορεί να αντικαταστήσει το γινόμενο της ταχύτητας και της υδραυλικής ακτίνας (VR) για να εκτιμηθεί ο συντελεστής αντίστασης. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό με ακρίβεια της ταχύτητας και της παροχής κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του ποταμού και των υγροτόπων. Καθώς ο αριθμός Froude αυξάνεται, οι συντελεστές αντίστασης μειώνονται και συνήθως τείνουν σε μια καθορισμένη τιμή, στην τιμή του συντελεστή αντίστασης για συνθήκες ροής χωρίς βλάστηση. Έτσι παρουσιάζεται η διαδραστικότητα του συντελεστή αντίστασης, των χαρακτηριστικών της βλάστησης και των υδραυλικών συνθηκών.

Με βάση τα λεπτομερή εργαστηριακά πειράματα και τη θεωρητική ανάλυση των Hua et al (2009), προτείνεται ένα νέο μοντέλο τριών στρωμάτων για την πρόβλεψη της κατακόρυφης κατανομής ταχύτητας σε ροή ανοιχτού καναλιού με βυθισμένη βλάστηση. Η μέση χρονικά ταχύτητα και συμπεριφορά τύρβης μιας μόνιμης ομοιόμορφης ροής με πλήρως βυθισμένη τεχνητή άκαμπτη βλάστηση μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα 3D Micro ADV και προέκυψε η κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας και της διατμητικής τάσης Reynolds σε διαφορετικό ύψος βλάστησης, πυκνότητα βλάστησης και θέσεις μέτρησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προφίλ ταχύτητας διακρίνεται σε τρία στρώματα δηλαδή το ανώτερο χωρίς βλάστηση στρώμα, το ανώτερο και το κατώτερο στρώμα μέσα στη βλάστηση. Κατά συνέπεια, διαφορετικές μέθοδοι εφαρμόστηκαν για να περιγράψουν την κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας. Για το ανώτερο χωρίς βλάστηση στρώμα, υιοθετήθηκε μια τροποποιημένη

θεωρία μήκους ανάμειξης σε συνδυασμό με την έννοια του «νέου οριακού στρώματος βλάστησης» και παρουσιάστηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της κατακόρυφης κατανομής ταχύτητας σε αυτήν την περιοχή. Για το κατώτερο στρώμα μέσα στη βλάστηση, η μέση ταχύτητα κατά βάθος λήφθηκε με αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ορμής. Για το ανώτερο στρώμα μέσα στη βλάστηση, η αναλυτική λύση παρουσιάστηκε εκφράζοντας την τάση διάτμησης ως έναν τύπο προσαρμοσμένο στα πειραματικά δεδομένα. Οι αναλυτικές προβλέψεις για την ταχύτητα σε όλο το βάθος ροής συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από άλλους ερευνητές και η καλή συμφωνία απέδειξε ότι το μοντέλο τριών στρωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της κατανομής ταχύτητας της ροής ανοιχτού καναλιού με βυθισμένη άκαμπτη βλάστηση. Το αναλυτικό μοντέλο είναι απλό και βολικό για εφαρμογή, ειδικά για σκοπούς πρωτογενούς αξιολόγησης. Κατά τη διάρκεια της πρακτικής εφαρμογής, η μόνη παράμετρος που απαιτείται να εξακριβωθεί είναι το  $a$  που είναι μια σταθερά που μπορεί να προσδιοριστεί από εργαστηριακές μετρήσεις. Για αυτήν τη μελέτη, το  $a$  προσδιορίζεται από τα πειραματικά δεδομένα και το αποτέλεσμα δείχνει ότι το  $a$  ποικίλλει για διαφορετική πυκνότητα και ύψος βλάστησης.

Στην μελέτη των Okamoto and Nezu (2010), πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τύρβης για ροές με άκαμπτη και εύκαμπτη βλάστηση με χρήση τεχνικής PIV. Η άκαμπτη βλάστηση προσομοιώθηκε με λωριδοτές πλάκες και η εύκαμπτη βλάστηση με λωριδοτά φύλλα. Ως αποτέλεσμα, ο χαρακτηρισμός της αντίστασης ροής λόγω τραχύτητας εύκαμπτης βλάστησης εξετάστηκε για διαφορετικά ύψη φυτών. Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε ότι το ύψος ανασχηματισμού βλάστησης είναι μια σημαντική παράμετρος για την περιγραφή της επίδρασης της τραχύτητας στο πεδίο ροής και ότι η αντίσταση ροής της εύκαμπτης βλάστησης είναι μικρότερη από της άκαμπτης εξαιτίας αυτής της απόκλισης του ύψους. Επίσης, παρατηρήθηκαν δυο είδη κυματισμών ή κίνησης της βλάστησης ενώ γίνεται χρήση της λογαριθμικής εξίσωσης (2-6) για  $z > d$ .

Εργαστηριακά πειράματα των Shi et al (2010) πραγματοποιήθηκαν σε κανάλι για τη μέτρηση των κατακόρυφων προφίλ των μέσων ταχυτήτων ροής για δύο διαφορετικές παροχές και τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες βλάστησης του είδους *Hydrilla* που βρίσκονται στον πυθμένα. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τον υπολογισμό τριών υδραυλικών παραμέτρων, του συντελεστή τραχύτητας Manning, του αριθμού Reynolds και του αριθμού Froude και παρουσιάστηκαν διαγράμματα των παραμέτρων αυτών με την μέση ταχύτητα ή το βάθος για κάθε περίπτωση πειράματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι (1) η κατακόρυφη κατανομή των μετρούμενων ταχυτήτων ροής εμφανίζει προφίλ τριών ζωνών, (2) ο συντελεστής τραχύτητας Manning μειώνεται με την αύξηση της μέσης κατά βάθος ταχύτητας ροής, (3) η σχέση μεταξύ του συντελεστή τραχύτητας Manning και της μέσης κατά βάθος ταχύτητας ροής ακολουθεί μια ομαλή καμπύλη, (4) ο συντελεστής τραχύτητας Manning αλλάζει σημαντικά με την αύξηση της πυκνότητας στους πυθμένες με βλάστηση του είδους *Hydrilla*, (5) ο αριθμός Froude είναι ανεξάρτητος της

πυκνότητας στους πυθμένες με βλάστηση του είδους Hydrilla.

Η εργασία των Ghazvinizadeh and Jamali (2010) παρουσιάζει μια πειραματική μελέτη για την κάθετη ανάμειξη σε περιβάλλον με συστοιχία βλάστησης. Για να προσομοιωθούν άκαμπτοι αναδύομενοι μίσχοι βλάστησης χρησιμοποιήθηκαν κύλινδροι από πολυαμίδη διαμέτρου 0,6 cm οι οποίοι ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένοι και βιδωμένοι σε 3 πλάκες από Plexiglas μήκους 2,5 m και πλάτους ίδιου με το κανάλι, δημιουργώντας μια παράταξη συνολικού μήκους 7,5 m ενώ δεν είχαν όλοι το ίδιο ύψος με αποτέλεσμα να δημιουργούνται 2 στρώματα διαφορετικής πυκνότητας βλάστησης με πυκνότερο πάντα το κατώτερο στρώμα. Επίσης υπάρχει σταθερή ροή χρωστικής σε σταθερό βάθος μέσα στο κατώτερο στρώμα. Τα προφίλ της συγκέντρωσης εξήχθησαν από video χρησιμοποιώντας τον νόμο Beer-Lambert και το MATLAB's image processing toolbox, ενώ το πεδίο ροής και ειδικά τα τυρβώδη χαρακτηριστικά του μελετήθηκε από τετράλεπτες καταχωρίσεις ενός ADV με συχνότητα 25Hz. Τα συμπεράσματά τους ήταν ότι μείωση της κατακόρυφης τυρβώδους διάχυσης γίνεται με την αύξηση της πυκνότητας βλάστησης με το βάθος και η ύπαρξη μικρής διάτμησης στην διεπιφάνεια των διαφορετικών πυκνοτήτων δεν οδηγεί σε σχηματισμό στροβιλισμών ή δημιουργούνται στροβιλισμοί με μικρή ισχύ. Επίσης τα προφίλ ταχύτητας είναι σε καλή συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις για μεγάλους αριθμούς Reynolds. Γενικά η βλάστηση με κατακόρυφη διαφοροποίηση της πυκνότητάς της προκαλεί μικρές επιπτώσεις στην διαδικασία μίξης στις ροές με βλάστηση, αν και οι αρθρογράφοι προτείνουν περαιτέρω διερεύνηση του θέματος

Η στάση των φυτών μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην υγεία της υδρόβιας βλάστησης, καθορίζοντας την τριβή, τον έλεγχο της διαθεσιμότητας του φωτός, και την ανταλλαγή θρεπτικών συστατικών και οξυγόνου. Η αναδιάταξη της υπό άνωση εύκαμπτης υδρόβιας βλάστησης που προκαλείται από την ροή μελετήθηκε από τους Luhar and Nepf (2011), μέσω ενός συνδυασμού εργαστηριακών πειραμάτων σε κανάλι και θεωρητικών μοντέλων. Στα εργαστηριακά πειράματα μετρήθηκαν η τριβή και η στάση των προσομοιωμένων φύλλων βλάστησης που εκτείνονται στο φυσικό εύρος της ακαμψίας θαλάσσιου γρασιδιού και της άνωσης. Το θεωρητικό μοντέλο υπολογίζει τη στάση των φυτών βασιζόμενο σε μια ισορροπία δυνάμεων που περιλαμβάνει την αντίσταση που εξαρτάται από τη στάση τους και τις δυνάμεις επαναφοράς που οφείλονται στην ακαμψία της βλάστησης και στην άνωση. Έτσι έχουμε περιπτώσεις όπου κυριαρχεί η ακαμψία ή η άνωση, κάτι που προκαλεί διαφορές στην μορφολογία της βλάστησης και σε άλλες λειτουργίες της όπως η διαθεσιμότητα του φωτός και η ανταλλαγή οξυγόνου. Όταν η υδροδυναμική δύναμη είναι μικρή σε σύγκριση με τις δυνάμεις επαναφοράς, τα προσομοιωμένα φύλλα παραμένουν όρθια και ο τετραγωνικός νόμος,  $F_x \sim V^2$ , προβλέπει τη τριβή καλά ( $F_x$  είναι η τριβή,  $V$  είναι η μέση ταχύτητα). Όταν η υδροδυναμική δύναμη υπερβαίνει τις δυνάμεις επαναφοράς, τα προσομοιωμένα φύλλα λυγίζουν από την ροή και ο τετραγωνικός νόμος τριβής δεν ισχύει πλέον. Το μοντέλο προβλέπει με επιτυχία πότε συμβαίνει αυτή η μετάβαση, πρέπει όμως να γίνει και έλεγχος των υποθέσεων που έγιναν για την ανάπτυξη του. Το μοντέλο προβλέπει επίσης ότι όταν ο κυρίαρχος

μηχανισμός αποκατάστασης είναι η ακαμψία των φύλλων, η αναδιάταξη οδηγεί στην κλίμακα  $F_x \sim V^{4/3}$ . Όταν ο κυρίαρχος μηχανισμός αποκατάστασης είναι η άνωση των φύλλων, η αναδιάταξη μπορεί να οδηγήσει σε υπο-γραμμική αύξηση της τριβής με την ταχύτητα, δηλαδή με ένα  $F_x \sim V^a$ , με  $a < 1$ . Εργαστηριακές μετρήσεις επιβεβαίωσαν και τις δύο αυτές προβλέψεις. Η προσομοιωμένη βλάστηση κατασκευάστηκε από δυο ειδών υλικά, αφρό σιλικόνης και πολυαιθυλένιο, και είχε πέντε διαφορετικά μήκη. Το μοντέλο προβλέπει ακόμα την τριβή και τη στάση των φύλλων με επιτυχία για την προσομοιωμένη βλάστηση και τα φυσικά συστήματα βλάστησης που κυμαίνονται από το είδος θαλάσσιου γρασιδιού μέχρι θαλάσσιων μακροφυκών πιο περίπλοκης μορφολογίας τροποποιώντας ανάλογα τις παραμέτρους ακαμψίας και άνωσης.

Το αντικείμενο της έρευνας Chen et al (2011) ήταν η ανάπτυξη μιας μεθόδου για την περιγραφή της μηχανικής της βλάστησης σε ρέοντα υγρά. Αυτό επιτεύχθηκε σκιαγραφώντας μεθόδους για την περιγραφή της αντίδρασης της βλάστησης σε ροή κάτω από άκαμπτες και λυγισμένες συνθήκες για απλά στοιχεία βλάστησης. Εφαρμόστηκε στατική ανάλυση στην μη καμπτόμενη βλάστηση με χρήση της θεωρίας προβόλου (μικρής απόκλισης) και δυναμική ανάλυση στην καμπτόμενη με χρήση της θεωρίας προβόλου μεγάλης απόκλισης. Πραγματοποιήθηκαν δέκα πειράματα σε έξι δείγματα βλάστησης, δυο από τεχνητά υλικά και τέσσερα από φυσικά. Η θέση της μέγιστης τάσης εφελκυσμού επηρεάζεται από έναν συνδυασμό της (κωνικής) γεωμετρίας του στελέχους και του αριθμού Reynolds. Αυτή η θέση βρίσκεται στην ή κοντά στη βάση του φυτού για χαμηλό βαθμό κωνικότητας και κινείται προς τα πάνω για κωνικά φυτά. Στη δυναμική κατάσταση, αυτή η θέση κινείται προς τα κάτω με τον αριθμό Reynolds. Η μέγιστη τάση εφελκυσμού είναι συνάρτηση της διαμέτρου της βάσης βλάστησης τόσο στις στατικές όσο και στις δυναμικές συνθήκες. Ωστόσο, στη στατική κατάσταση, η αναλογία διαμέτρων κορυφής προς βάσης έχει μικρότερη επίδραση σε αυτήν την τάση, έτσι η κάμψη θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον ακριβή προσδιορισμό της εσωτερικής τάσης για εύκαμπτη βλάστηση. Η αδιάστατη τριβή πέφτει ουσιαστικά με τον αριθμό Reynolds, εκτός από τα πολύ κωνικά φυτά. Αυτό υπονοεί ότι οι συντελεστές αντίστασης, όπως οι Manning's  $n$  και Darcy – Weisbach's  $f$ , οι οποίοι είναι φυσικά ανάλογοι με τη αδιάστατη τριβή, ενδέχεται να μειωθούν με τον αριθμό Reynolds. Περαιτέρω, η τριβή με υψηλούς αριθμούς Reynolds είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της στατικής κατάστασης, υποδηλώνοντας ότι η κάμψη μειώνει την αντίσταση σε σύγκριση με τα άκαμπτα φυτά. Ωστόσο, η δύναμη τριβής αυξάνεται με τον αριθμό Reynolds, επειδή απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη έλξης για την κάμψη της βλάστησης σε μεγαλύτερο βαθμό. Τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση των επιρροών των μηχανικών ιδιοτήτων της βλάστησης στη κατανομή των δυνάμεων, στις συμπεριφορές λυγισμού/κάμψης και πιθανές θέσεις και συνθήκες διάρρηξης της βλάστησης. Η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των υδραυλικών συνθηκών για την αστοχία της βλάστησης και την αντίσταση ροής η οποία προκαλείται από την βλάστηση, ειδικά για εύκαμπτα είδη. Αν και οι τεχνικές που αναπτύσσονται είναι βασισμένες σε απλοποιημένες υποθέσεις,

η ανάλυση παρέχει μια βάση για μελλοντική ανάπτυξη για βυθισμένη βλάστηση και για πολύπλοκες συστάδες βλάστησης.

Το άρθρο των Siniscalchi and Nikora (2013) διερευνά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ροής, των κυμαινόμενων δυνάμεων τριβής και της δυναμικής αναδιάταξης που βιώνεται από τέσσερα είδη φυτών του γλυκού νερού σε τυρβώδη ροή ανοιχτού καναλιού. Η μελέτη βασίζεται σε πειράματα που έγιναν σε ένα εργαστηριακό κανάλι με τη χρήση απλών δειγμάτων (μήκους 30cm) από τα είδη *Ranunculus penicillatus*, *fontinalis antipyretica*, *Myriophyllum alterniflorum*, και *Callitriche stagnalis*, καθώς και τεχνητού γρασιδιού (ύψους 3,5 cm) από πολυαιθυλένιο ομοιόμορφα καταναμημένου σε όλο τον πυθμένα του καναλιού. Τα πειράματα έγιναν για 5 παροχές με σταθερό βάθος (15 cm) που επιτεύχθηκε προσαρμόζοντας την κλίση και τον υπερχειλιστή εξόδου. Μια σημαντική συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ των διακυμάνσεων της τριβής, των κινήσεων των φυτών και της ανάντη τύρβης ενώ παρέχονται τεκμηριωμένα στοιχεία για το πώς οι κινήσεις των φυτών συνδέονται με την περιβάλλουσα τύρβη και τις δυνάμεις τριβής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δυναμική ανταπόκριση των φυτών ήταν συνδεδεμένη με την ανάντη ταχύτητα σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα φυτά αντιδρούν σε ορισμένες συχότητες τύρβης μόνο. Τα δεδομένα επίσης αποκάλυψαν ότι τα φυτά γενικά εμφάνισαν χωρική κίνηση σαν πτερύγισμα, με την ταχύτητα διάδοσης των διαταραχών κατά μήκος του φυτού να είναι περίπου σταθερή και συγκρίσιμη με την ταχύτητα ροής ανάντη με αποτέλεσμα να έχουν την μικρότερη δυνατή αντίσταση ροής. Η ανάλυση των στατιστικών μεγεθών των διακυμάνσεων της ταχύτητας των φυτών (Standard deviation ( $\sigma$ ), skewness (S), kurtosis (K)), των φασμάτων, των συσχετίσεων και της συνοχής έδωσαν ισχυρή υποστήριξη στο συμπέρασμα ότι η δυναμική αναδιάταξη επηρεάζει άμεσα την δύναμη τριβής που εξασκείται επί των φυτών, επιπλέον της επίδρασης της ανάντη τύρβης. Η σχέση αυτή φαίνεται να μην προκαλείται από την περιβάλλουσα τύρβη, αλλά να είναι μια γνήσια και άμεση επίπτωση της κίνησης των φυτών. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η δυναμική αναδιάταξη αντιπροσωπεύει έναν σημαντικό μηχανισμό που υιοθετήθηκε από τα φυτά για να επιβιώσουν στο ρέον νερό.

Η μελέτη των Li et al (2014) διερεύνησε τη διακύμανση των χαρακτηριστικών ροής με διαφορετικές πυκνότητες βυθισμένης εύκαμπτης βλάστησης, που προσομοιώθηκε από τεχνητό πλαστικό υλικό, σε ένα ανοιχτό κανάλι χρησιμοποιώντας 3D ADV. Τα κατακόρυφα προφίλ της ροής επηρεάζονται σημαντικά από την παρουσία της βλάστησης και αυτό σχετίζεται με την πυκνότητα και το ύψος της βλάστησης. Το προφίλ ταχύτητας θα μπορούσε να χωριστεί περίπου σε τρία στρώματα. Το προφίλ ταχύτητας ανώτερου επιπέδου ακολουθεί τον λογαριθμικό νόμο που ανέφεραν οι Chen et al. (2011), αλλά δεν ταιριάζει με τον συνήθη νόμο Prandtl (Stephan and Gutknecht, 2002). Συγκρίνοντας τις πειραματικές συνθήκες για διαφορετικές εργασίες, επιβεβαίωσαν ότι οι διαφορές μπορεί να αποδοθούν στις πυκνότητες της βλάστησης. Με αύξηση της πυκνότητας βλάστησης, η ταχύτητα και ο αντίστοιχη παροχή αυξάνονταν στο ανώτερο χωρίς βλάστηση στρώμα και μειώνονταν μέσα στο

ενδιάμεσο στρώμα συστοιχίας και στο κατώτερο στρώμα συστοιχίας. Ο λόγος της μέσης παροχής στο ανώτερο χωρίς βλάστηση στρώμα ( $Q_u$ ) και στα άλλα δύο στρώματα ( $Q_d$ ) με βλάστηση ακολούθησε έναν νόμο εκθετικής συνάρτησης με βάση την πυκνότητα της βλάστησης. Η αναλογία ( $Q_u / Q_d$ ) αυξήθηκε με την πυκνότητα της βλάστησης, υποδηλώνοντας ότι περισσότερο νερό θα μπορούσε να διέλθει από το κανάλι πάνω από την κορυφή της βυθισμένης βλάστησης με την αυξανόμενη πυκνότητα βλάστησης, με αποτέλεσμα λιγότερη διάβρωση του πυθμένα. Οι τάσεις Reynolds και η τύρβη κορυφώθηκαν στην κορυφή της συστοιχίας. Το μέγεθος των τάσεων Reynolds και της τύρβης αυξήθηκε με την πυκνότητα της βλάστησης. Οι τάσεις Reynolds κορυφώθηκαν πάνω από την κορυφή της συστοιχίας ( $z / h = 1.0-1.2$ , εδώ το  $z$  δηλώνει κάθετη συντεταγμένη) και οι εντάσεις τύρβης έφτασαν στο μέγιστο τους σε δύο θέσεις, συμπεριλαμβανομένης του κατώτερου στρώματος ( $z / h = 0,1-0,4$ ) και της κορυφής της συστοιχίας ( $z / h = 1,0-1,6$ ) για όλες τις πυκνότητες βλάστησης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ροής και βλάστησης προκάλεσε αστάθεια, δημιουργώντας στροβιλισμούς και επηρεάζοντας την ανταλλαγή ορμής και τα χαρακτηριστικά τύρβης. Ο συντελεστής Manning συσχετίστηκε σε μεγάλο βαθμό με την πυκνότητα της βλάστησης και την παροχή εισροής και προτάθηκαν νέες εμπειρικές εξισώσεις για να περιγράψουν τις σχέσεις τους. Το προφίλ ταχύτητας ακολούθησε μια αριστερή στρογγυλή αγκύλη "(" με το ελάχιστο σημείο να βρίσκεται στην περιοχή της συστοιχίας ( $0,7h$ , όπου το  $h$  δηλώνει ύψος βλάστησης) μέσα στο μεσαίο στρώμα. Ωστόσο, το προφίλ της ταχύτητας ακολούθησε μια δεξιά στρογγυλή αγκύλη ")" στο κατώτερο στρώμα συστοιχίας με το μέγιστο σημείο να βρίσκεται στη θέση ( $0.2h$ ).

Ο στόχος της εργασίας Valyrakis et al. (2014) είναι να διερευνήσει τις επιπτώσεις της φυσικής και προσομοιωμένης υδρόβιας βλάστησης στο τοπικό πεδίο ροής μέσω μιας συγκριτικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων από μια προκαταρκτική πειραματική μελέτη. Αυτή η εργασία διερευνά την αλληλεπίδραση ροής-δομής για διαφορετικούς τύπους (τεχνητών και φυσικών) στοιχείων βλάστησης που έχουν χρησιμοποιηθεί με την πάροδο των ετών για την αναπαράσταση της αναδυόμενης βλάστησης, συγκεκριμένα τριών τύπων στοιχείων (εύκαμπτα-πορώδη, άκαμπτα-μη πορώδη, άκαμπτα-πορώδη). Χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο κατάλληλα σχεδιασμένων πειραμάτων ανοικτού αγωγού της ίδιας συνολικής έκτασης έμφραξης για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία. Με βάση προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι το μέσο πεδίο ροής και τα επίπεδα τύρβης κατάντη των στοιχείων υδρόβιας βλάστησης τροποποιούνται με ουσιαστικά διαφορετικούς τρόπους σε μια σειρά αποστάσεων ανάλογα με την πορώδη δομή του (πορώδες και γεωμετρία) και την ευελιξία του. Είναι σημαντικό ότι εκτός από την περιοχή αποκλεισμού (μπλοκαρίσματος) του στοιχείου, αυτά τα χαρακτηριστικά λαμβάνονται κατάλληλα υπόψη, προκειμένου να μοντελοποιηθούν αποτελεσματικά οι αλλαγές στο πεδίο ροής και να διερευνηθεί η επίδρασή τους στη δυναμική μεταφοράς ιζημάτων.

Στην εργασία του Christodoulou (2014) παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για ροή σε κεκλιμένο κανάλι 16,5% για διάφορα είδη βυθισμένων τεχνητών

στοιχείων τραχύτητας μεγάλης κλίμακας. Δοκιμάζονται οκτώ διαφορετικά σχήματα εμποδίων, ως εξής: (1) τυπικά μπλοκ οδοντώσεων, (2) κύβοι, (3) μισοί κύβοι, (4) γωνίες, (5) κύλινδροι, (6) κάθετες ράβδοι, (7) ημισφαίρια παράλληλα προς την ροή, και (8) ημισφαίρια κάθετα προς τη ροή. Με βάση τις μετρήσεις βάθους, καθορίζεται ο ενεργός συντελεστής Manning και αξιολογείται η αντίστοιχη τραχύτητα άμμου. Τα αποτελέσματα δίνονται σε αδιαστατους όρους και συγκρίνονται με προηγούμενη έρευνα. Συζητούνται τα αποτελέσματα του σχήματος, του μεγέθους και της πυκνότητας των εμποδίων στην αντίσταση της ροής. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα ελήφθησαν ποσοτικά αποτελέσματα για την ενεργή ισοδύναμη τραχύτητα άμμου λόγω μιας ποικιλίας βυθισμένων εμποδίων. Τα αποτελέσματα συμφωνούν καλά με τα αποτελέσματα των Herbich και Shulits (1964) παρά τη μεγάλη διαφορά κλίσεων των πειραματικών καναλιών.

Στο άρθρο των Tanaka and Ohmoto (2017) εξετάζεται πειραματικά η επίδραση της διαμόρφωσης των διαμήκων ζωνών ασυνεχούς βλάστησης στην αντίσταση ροής και την τυρβώδη δομή σε ένα ανοιχτό κανάλι. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ βάθους ροής και παροχής εξαρτάται σημαντικά από τα μοτίβα διάταξης και ο λόγος θα μπορούσε να εξηγηθεί από τη διαφορά της τυρβώδους δομής και της χωρικής κλίσης της δυναμικής πίεσης. Εστιάζοντας στη ροή σε ένα ανοιχτό κανάλι με μια διαμήκη ασυνεχή σειρά φυτικών συστάδων, αυτή η μελέτη εξέτασε τα αποτελέσματα διαφορετικών μοτίβων συστάδων, όπως κλιμακωτά και παράλληλα, στα χαρακτηριστικά τύρβης της ροής και στους μηχανισμούς ροής, συμπεριλαμβανομένης της χωρικής διαβάθμισης της δυναμικής πίεσης. Τα ευρήματα αυτής της μελέτης παρατίθενται παρακάτω: (1). Η εξέταση της οριζόντιας κατανομής της μέσης ταχύτητας ροής έδειξε ότι στην περίπτωση όπου οι ζώνες βλάστησης ήταν διατεταγμένες σε κλιμακωτό μοτίβο, η ροή έδειξε υψηλότερο βαθμό μαιανδρισμού από ό,τι στην περίπτωση όπου οι ζώνες βλάστησης ήταν διατεταγμένες παράλληλα ή κατά μήκος μιας όχθης μόνο. Αυτό το φαινόμενο πιστεύεται ότι είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει σε μεγαλύτερη αντίσταση ροής στην περίπτωση κλιμακωτής διάταξης από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις διάταξης. (2). Η εξέταση της οριζόντιας κατανομής των τάσεων Reynolds αποκαλύπτει ότι σε όλες τις περιπτώσεις διάταξης, οι τάσεις Reynolds έδειξαν μεγάλες τιμές κοντά στην κύρια ζώνη ροής και στην ζώνη των τοιχωμάτων ενώ η ορμή που προκλήθηκε από την τύρβη μεταφέρεται από την κύρια ζώνη ροής στα τοιχώματα. Στην περίπτωση κλιμακωτής διάταξης, η αντίσταση ροής ήταν υψηλότερη από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις διατάξεων πιθανώς επειδή στην περίπτωση αυτή, οι ακραίες τιμές των τάσεων Reynolds ήταν μεγαλύτερες από ό,τι στην περίπτωση διάταξης βλάστησης στις δύο όχθες και, σε αντίθεση με την περίπτωση διάταξης σε μια όχθη. (3). Όσον αφορά τη χωρική κλίση δυναμικής πίεσης, η κλιμακωτή διάταξη έδειξε μια τάση κατανομής που διαφέρει από τις τάσεις που παρατηρήθηκαν στις άλλες περιπτώσεις διατάξεων και φάνηκε ότι καθώς προωθήθηκε η μαιανδρική ροή, η αντίσταση ροής έγινε υψηλότερη από ό,τι στις άλλες περιπτώσεις διατάξεων. Αποδείχθηκε επίσης ότι η χωρική κλίση της δυναμικής πίεσης διέφερε ανάλογα με τη διάταξη των ζωνών βλάστησης, και τέτοιες

διαφορές επηρέαζαν την αντίσταση ροής και τα χαρακτηριστικά τύρβης.

Το άρθρο της Nikora (2017) ασχολείται με το ζήτημα ανάπτυξης νέων απλών φυσικών σχέσεων που περιγράφουν τα προφίλ τάσεων Reynolds μέσα σε βυθισμένες συστοιχίες βλάστησης και προτείνει μια φυσικά αιτιολογημένη διατύπωση για αυτά εντός της περιοχής συστοιχίας. Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, το στρώμα βλάστησης υποδιαιρείται στις ανώτερες και κατώτερες περιοχές συστοιχίας με σαφώς διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς ορμής και σχηματισμού οπισθέλκουσας. Οι βασικές παράμετροι της προτεινόμενης σχέσης είναι το βάθος διείδυσης  $h_t$  (δηλαδή, η απόσταση από τον πυθμένα έως ένα σημείο όπου η κατακόρυφη προς τα κάτω ροή τύρβης καθίσταται αμελητέα) και ο λόγος των δυνάμεων οπισθέλκουσας που δρουν στις άνω και κάτω περιοχές συστοιχίας. Η σχέση δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας εκτεταμένα εργαστηριακά πειράματα που δείχνουν ότι οι παράμετροι της σχέσης επηρεάζονται τόσο από τις γενικές συνθήκες ροής όσο και από τα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Προτείνεται μια νέα σχέση φυσικής βάσης που περιγράφει τα προφίλ τάσης Reynolds μέσα στην βυθισμένη συστοιχία βλάστησης. Η σχέση συνάγεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση ορμής DANS για σταθερή και ομοιόμορφη ροή ανοιχτού καναλιού 2D μέσα στην συστοιχία της βλάστησης. Στην άνω περιοχή συστοιχίας, η μεταφορά ορμής κυριαρχείται από τη συνολική ροή κάθετης ορμής, ενώ στο κάτω τμήμα συστοιχίας, κυριαρχείται από τη βαρύτητα. Ο λόγος των δυνάμεων οπισθέλκουσας που δρουν στις άνω και κάτω περιοχές συστοιχίας ( $F_{UC}$  και  $F_{LC}$  αντίστοιχα) προσεγγίζεται από μια απλή μη γραμμική σχέση που συνδέει αυτήν την αναλογία με το σχετικό βάθος διείδυσης  $h_t / h_k$  και βύθιση ροής  $H/h_k$ . Όταν το  $h_t / h_k$  πλησιάζει μια σταθερή τιμή πάνω από κάποιο όριο βύθισης ροής, η σχέση  $F_{UC} / F_{LC} = f(H/h_k)$  γίνεται γραμμική. Ο λόγος  $F_{UC} / F_{LC}$  μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα μέτρο των σχετικών συνεισφορών των άνω και κάτω περιοχών συστοιχίας στη συνολική κατακόρυφη ανταλλαγή ορμής που συμβαίνει σε ολόκληρο το στρώμα βλάστησης. Τα πειραματικά δεδομένα υποστήριξαν την προτεινόμενη σχέση αρκετά καλά, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση ότι η συνολική τριβή μέσα στην βυθισμένη συστοιχία βλάστησης είναι περίπου σταθερή τόσο στην άνω όσο και στην κάτω περιοχή συστοιχίας.

Η αντίσταση της ροής λόγω της βλάστησης παρουσιάζει ενδιαφέρον για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών υδραυλικής μηχανικής. Η εργασία των Sonnenwald et al (2019) αξιολογεί διάφορες πρακτικές τεχνικές λειτουργίες για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθέλκουσας ( $C_D$ ) για συστοιχίες άκαμπτων κυλίνδρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως για την αναπαράσταση της αναδυόμενης βλάστησης. Πολλές από τις αξιολογηθείσες συναρτήσεις βασίζονται σε μια έκφραση που σχετίζει το  $C_D$  με δύο συντελεστές, που περιγράφουν επιρροές του ιξώδους και της αδράνειας. Παρουσιάζεται εκ νέου παραμετροποίηση των συντελεστών Ergun με βάση τη διάμετρο του κυλίνδρου ( $d$ ) και το κλάσμα στερεού όγκου ( $\phi$ ). Οι εκτιμήσεις του  $C_D$  συγκρίνονται με μια σειρά πειραματικών δεδομένων από προηγούμενες μελέτες. Οι εκτιμήσεις του  $C_D$  που χρησιμοποιούν την επαναπαραμετροποίηση και που παρουσιάζονται ταιριάζουν καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα από τις εκτιμήσεις



του  $C_D$  που έγιναν χρησιμοποιώντας τις άλλες σχέσεις που αξιολογήθηκαν, ιδιαίτερα σε χαμηλό  $\phi$  και χαμηλό  $Re_d$ . Όλες οι σχέσεις αποδίδουν καλά για χαμηλά κλάσματα στερεού όγκου ( $\phi$ ) και υψηλό αριθμό Reynolds κυλίνδρων ( $Re_d$ ), και γενικά το τυπικό  $C_D \approx 1$  δεν είναι παράλογο. Καθώς μειώνεται το  $Re_d$ , μόνο αυτές οι σχέσεις που περιλαμβάνουν την επίδραση της αντίστασης λόγω ιξώδους παρέχουν λογικά αποτελέσματα. Καθώς αυξάνεται το  $\phi$ , πολλές από τις σχέσεις υποεκτιμούν το  $C_D$ . Η συνάρτηση που περιγράφεται λεπτομερώς σε αυτή τη μελέτη, η οποία περιλαμβάνει επιρροές του ιξώδους,  $\phi$ , και επίσης μια εξάρτηση από τη διάμετρο του κυλίνδρου ( $d$ ), παρέχει βελτιωμένες εκτιμήσεις του  $C_D$ .

Τα αποτελέσματα τριών διαμορφώσεων (ευθυγραμμισμένα, κλιμακωτά και σε ζώνες) της βυθισμένης εύκαμπτης βλάστησης στη δομή ροής διερευνώνται πειραματικά στο εργαστήριο από τους Chen et al (2011). Η μέση ταχύτητα ροής και η συμπεριφορά τύρβης αξιολογούνται σε διαφορετικές θέσεις σε κάθε διαμόρφωση χρησιμοποιώντας ένα 3D ακουστικό ταχύμετρο Doppler (ADV). Σύμφωνα με τα υδροδυναμικά καθεστώτα στα πειραματικά αποτελέσματα, η κατακόρυφη κατανομή της ροής μπορεί να χωριστεί σε τρία στρώματα - το ανώτερο χωρίς βλάστηση στρώμα, το μεσαίο με βλάστηση στρώμα και το κατώτερο στρώμα βάσης. Αυτό το μοντέλο τριών επιπέδων-στρωμάτων, το οποίο σχετίζεται με διαφορετικές λογαριθμικές εξισώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί για να περιγράψει την κατακόρυφη κατανομή της κατά μήκος ταχύτητας της ροής. Η τοπική μέγιστη ταχύτητα εντός της βλάστησης εμφανίζεται στο τμήμα βάσης μιας συστάδας φυτού (0,10-0,15 του ύψους βλάστησης ( $h$ )) όπου το μετωπικό πλάτος είναι ελάχιστο. Οι τυρβώδεις εντάσεις στις κατευθύνσεις ροής ( $u_{rms}$ ) και εγκάρσια ( $v_{rms}$ ) κορυφώνονται στο τμήμα βάσης και στην κατά προσέγγιση κορυφή της συστάδας (0,9-1,2 h). Οι μέγιστες τάσεις Reynolds εμφανίζονται σε ύψος περίπου 0,9-1,2 h, και μπορεί να μετατοπίζονται κατακόρυφα καθώς αυξάνεται το μετωπικό πλάτος της συστάδας φυτών. Το υψηλό μετωπικό πλάτος αυξάνει επίσης την κατά μήκος ταχύτητα της ροής πάνω από τη βλάστηση, οδηγώντας σε αύξηση των μεταβολών στις τάσεις Reynolds γύρω από την κορυφή της συστάδας. Στην κλίμακα κατακόρυφης τυρβώδους ταχύτητας ( $w_{rms}$ ), οι στροβιλισμοί πάνω από μια ακίνητη συστάδα περιστρέφονται γρηγορότερα από εκείνους πάνω από μια κυματοειδή συστάδα. Επομένως, τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το πεδίο ροής μπορεί να ποικίλλει σημαντικά στο τμήμα βάσης και στην κορυφή μιας συστάδας φυτού λόγω αλλαγής της ροής.

Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι όλες οι προηγούμενες εργασίες είναι πειραματικές ή βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Υπάρχει όμως και άλλη κατηγορία εργασιών οι αριθμητικές, που ήταν αποτέλεσμα της προόδου της τεχνολογίας των υπολογιστών με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις της ροής. Για παράδειγμα η εργασία των Erduran and Kutija (2003) παρουσιάζει ένα οιονεί τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο για ροή νερού διαμέσου εύκαμπτης και άκαμπτης, βυθισμένης και μη βυθισμένης βλάστησης, συνδυάζοντας την δισδιάστατη ανάλυση και τις εξισώσεις Navier–Stokes για την κάθετη διανομή της ταχύτητας.

Η εργασία των Anderson et al (2005) περιγράφει ένα νέο δυναμικό μοντέλο που ονομάζεται ROVER (ROughness of VEgetation in Rivers) και υιοθετεί μια φαινομενολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της τραχύτητας της βλάστησης σε ποτάμια. Δηλαδή ο κώδικας δομήθηκε γύρω από εμπειρικές αναπαραστάσεις τριών ιδιοτήτων των φυτών που πιστεύεται ότι είναι οι κύριοι παράγοντες που διέπουν την αντίσταση της βλάστησης. Ονομαζόμενο ως "Πλαίσιο D3", οι ιδιότητες που προσδιορίστηκαν ήταν οι Διαστάσεις (μέγεθος [ύψος, πλάτος, πάχος] και δομή-πυκνότητα-αποστάσεις φυτών), η Δυναμική (ευκαμψία- απόσβεση τραχύτητας με την αλλαγή σχήματος εύκαμπτων φυτών λόγω επίδρασης της ροής) και η Διανομή (μέσα στο κανάλι-μοτίβο βλάστησης) των φυτών. Η εργασία αυτή παρουσιάζει εν συντομία το "Πλαίσιο D3" και παρέχει μια επισκόπηση του μοντέλου ROVER. Η τραχύτητα της βλάστησης είναι ένα σημαντικό, πιθανώς κυρίαρχο, συστατικό της αντίστασης ροής σε ρέματα και ποτάμια, έτσι γίνεται πιο κρίσιμο να προβλέψουμε την υδραυλική επίδραση των καναλιών με βλάστηση κάτι που η εργασία προσπαθεί να απαντήσει.

Στην εργασία των Souliotis and Prinos (2010) διερευνάται αριθμητικά η επίδραση του παράγοντα παρεμπόδισης εγκάρσιας διατομής (το κλάσμα της διατομής το οποίο εμποδίζεται από βλάστηση) στην αντίσταση καναλιού με βλάστηση. Το υπολογιστικό μοντέλο έλαβε υπόψη του τρεις περιπτώσεις βλάστησης-φυτοκάλυψης κατά το πλάτος του αγωγού (με διαστάσεις μήκος=πλάτος=1,2m, ύψος 0,068m και κλίση  $2,24 \cdot 10^{-4}$ ) με τον λόγο του πλάτους της βλάστησης προς το ολικό πλάτος ( $L_{veg}/L$ ) από 0,33 ως 0,66. Χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατοι υπολογισμοί, με βάση τις σταθμισμένες κατά Reynolds εξισώσεις Navier-Stokes (RANS) και δύο μοντέλων τύρβης του τύπου k-ε, με βάση τη δυναμική της βλάστησης και τη προσέγγιση ενός πορώδους μέσου αντίστοιχα. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της θέσης του μπλοκαρισμένου χώρου σε σχέση με την αντίσταση καναλιού. Παρουσιάζονται λεπτομερή υπολογισμένα αποτελέσματα εντός της διατομής του καναλιού και οι ποσότητες (παροχή, ταχύτητα, συντελεστής Manning) συγκρίνονται με ημιεμπειρικές σχέσεις. Η παρουσία της βλάστησης σε ένα κανάλι προκαλεί τη μείωση της παροχетеυτικότητας, της ταχύτητας της ροής και επίσης την υποβάθμιση των τυρβωδών χαρακτηριστικών (μείωση έντασης τύρβης) μέσα στην περιοχή της βλάστησης. Στην περιοχή της διεπιφάνειας, μια σημαντική ή ισχυρή διατμητική τάση αναπτύσσεται εξαιτίας της ανταλλαγής ορμής μεταξύ του ελεύθερου καναλιού και της παρακείμενης περιοχής με βλάστηση και της συνεπαγόμενης διαφοράς ταχύτητας μεταξύ της περιοχής με βλάστηση και του ελεύθερου καναλιού. Η αύξηση της περιοχής βλάστησης και η αντίστοιχη αύξηση του συντελεστή παρεμπόδισης εγκάρσιας διατομής προκαλεί τη μείωση της παροχетеυτικότητας επειδή η ροή περνά από μεγαλύτερες περιοχές υψηλής αντίστασης. Φάνηκε επίσης ότι η συνολική παροχή επηρεάζεται από την θέση της βλάστησης μέσα στο κανάλι, με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται όταν η βλάστηση είναι τμηματικά κατανεμημένη στην εγκάρσια διεύθυνση. Τέλος, ο συντελεστής παρεμπόδισης εγκάρσιας διατομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της μέσης ταχύτητας της ροής στο κανάλι και της αντίστασης του, μέσω του υπολογισμού του

συντελεστή Manning.

Από τους Stamou et al. (2012) πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικοί τρισδιάστατοι υπολογισμοί για να εξεταστεί η επίδραση της βλάστησης στη μέση ροή σε ανοιχτά κανάλια χρησιμοποιώντας το μοντέλο CFD CFX-12.1, εφαρμόζοντας το μοντέλο τύρβης k-ε RANS. Οι υπολογισμένες κατανομές της ταχύτητας ροής συγκρίθηκαν με ένα πείραμα ομοιόμορφης ροής ελεύθερης επιφάνειας σε ένα πειραματικό κανάλι με βλάστηση, γεμάτο με κυλινδρικά βυθισμένα στοιχεία που αντιπροσωπεύουν τη βλάστηση. Αυτά τα στοιχεία ήταν άκαμπτα και διατεταγμένα σε κλιμακωτό μοτίβο. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα αδόμητα αριθμητικά πλέγματα, που κυμαίνονταν από περίπου 9,5 έως 27,5 εκατομμύρια τετραεδρικά στοιχεία. Τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής ήταν (α) ο σχηματισμός μικρών περιοχών ανακυκλοφορίας στα ίχνη των κυλίνδρων και (β) οι σχετικές ομοιόμορφες συνθήκες ροής σε όλο το μήκος του καναλιού. Παρατηρήθηκαν χαμηλές ταχύτητες ροής στην περιοχή με βλάστηση, υποδηλώνοντας την αντίσταση λόγω βλάστησης, και υψηλότερες ταχύτητες κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Η καλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα επιτεύχθηκε για το λεπτότερο πλέγμα που περιελάμβανε επίσης βελτίωση του πλέγματος στην κορυφή των κυλίνδρων.

Το άρθρο των Choi and Kang (2016) αναφέρει μια υπολογιστική διερεύνηση των χαρακτηριστικών της μέσης ροής και των τυρβωδών στατιστικών χαρακτηριστικών για μια ροή με περιορισμένο βάθος με βυθισμένη βλάστηση σε ένα ορθογώνιο κανάλι και βασίστηκε στα εργαστηριακά πειράματα παλαιότερης εργασίας. Για να επιτευχθεί αυτό, οι διπλές μέσες εξισώσεις Navier – Stokes λύθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο closure (κλεισίματος) της τάσης Reynolds (Reynolds stress model). Μια ζώνη με αυξημένη ταχύτητα παρατηρήθηκε στη γωνία μεταξύ του πλευρικού τοιχώματος και της ελεύθερης επιφάνειας, σχηματίζοντας έτσι δύο μέγιστα ταχύτητας, ένα στο κέντρο του καναλιού και ένα στη γωνία. Αυτό συμβαδίζει με προηγούμενες πειραματικές παρατηρήσεις. Η μέγιστη ταχύτητα στη γωνία μπορεί να αποδοθεί στο μεγεθυμένο και μετατοπισμένο στρόβιλο της γωνίας του πυθμένα που προκαλείται από βυθισμένη βλάστηση, ο οποίος μεταφέρει υγρό υψηλής ορμής από το κέντρο έως τη γωνία του καναλιού. Η μέγιστη ταχύτητα στη γωνία βρέθηκε να συμβαίνει στη ροή με βυθισμένη βλάστηση ανεξάρτητα από την πυκνότητα της και τη σχετική βύθιση. Η μέγιστη ταχύτητα στη γωνία επηρεάζει τη μέση ροή, αλλά έχει αμελητέα επίδραση στα τυρβώδη στατιστικά (παραμέτρους τύρβης).

Η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας ροής διατομής σε ανοιχτά κανάλια με βυθισμένη βλάστηση είναι ένα σημαντικό θέμα στη μηχανική του ποταμού. Στο στρώμα βλάστησης, η εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων παρέχει το υπόβαθρο της εκτίμησης. Προηγούμενες μελέτες έχουν εφαρμόσει διάφορους τύπους για τη μέση ταχύτητα ροής σε ανοιχτά κανάλια με βυθισμένη βλάστηση που συνάγονται με διαφορετικές θεωρητικές εκτιμήσεις. Στη μελέτη των Shi et al. (2019), χρησιμοποιείται γενετικός προγραμματισμός (GP) με τη συμβατική προσέγγιση δύο στρωμάτων για τη δημιουργία των μαθηματικών συσχετίσεων μεταξύ ενός συντελεστή  $f_s$  (παρόμοιος με

των συντελεστή απωλειών  $f$ ) και των σχετικών διαστάσεων χωρίς μεταβλητές. Ο αλγόριθμος μέγιστης ανισότητας (αλγόριθμος ομαδοποίησης δεδομένων) χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των υπαρχόντων συνόλων δεδομένων στην ομάδα εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμών για την τροφοδοσία αλγορίθμου GP. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το  $f_s$  για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του επιφανειακού στρώματος και, τέλος, της μέσης ταχύτητας ολόκληρης της διατομής. Αυτό το νέο μοντέλο έχει σχετικά ισχυρό φυσικό υπόβαθρο και η ακρίβειά του έχει χαμηλότερες σχετικές αποκλίσεις από αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Επομένως, η εξίσωση που λαμβάνεται από το GP παρέχει μια νέα δυνατότητα διευκόλυνσης της μελλοντικής θεωρητικής διερεύνησης της μέσης ταχύτητας σε ανοιχτά κανάλια με βυθισμένη βλάστηση.

Τέλος πρέπει να αναφερθούν και κάποιες γενικές εργασίες οι οποίες παραθέτουν μια επισκόπηση πλήθους συναφών εργασιών, καταλήγοντας σε πιο γενικευμένα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Tsihrintzis and Madiedo (2000), επανεξετάζονται επιλεγμένες προηγούμενες θεωρητικές, εργαστηριακές και επιτόπιες μελέτες για υδροτόπους και υδραυλικά κανάλια με βλάστηση, και τα υπάρχοντα δεδομένα από αυτές τις μελέτες εξάγονται και συγκεντρώνονται σε μια κοινή βάση δεδομένων. Η αποκατάσταση των υποβαθμισμένων και η δημιουργία δομημένων υδροτόπων απαιτούν κατάλληλο υδραυλικό σχεδιασμό. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο ακριβής προσδιορισμός των συντελεστών αντίστασης ροής και η σωστή χρήση των εξισώσεων αντίστασης, κάτι απαραίτητο για τον υπολογισμό βασικών υδραυλικών παραμέτρων, όπως το βάθος και την ταχύτητα, και για τη μοντελοποίηση της υδροδυναμικής του συστήματος. Συζητούνται επίσης οι παράμετροι καθορισμού της αντίστασης και τα αποτελέσματα συνοψίζονται και παρουσιάζονται, με στόχο τη διατύπωση νόμων που διέπουν τη ροή και την εξαγωγή τιμών για τους παράγοντες τριβής κάτω από διάφορα σενάρια ροής. Παρουσιάζονται γραφήματα των συντελεστών Darcy-Weisbach  $f$  και Manning's  $n$  έναντι των κατάλληλων υδραυλικών παραμέτρων. Παρουσιάζεται επίσης ένα τροποποιημένο γράφημα  $n$ -VR, κατάλληλο για προκαταρκτικές υδραυλικές αναλύσεις και σχεδιασμό ελών. Αυτά τα γραφήματα υποδεικνύουν επίσης πληροφορίες που λείπουν και μπορούν να οδηγήσουν σε μελλοντική έρευνα.

Ο Tsihrintzis (2001) σε συζήτηση προηγούμενης εργασίας (Fu-Chun et al. (1999) με πειραματικά δεδομένα ροής διάμεσου μη βυθισμένης βλάστησης, παρουσιάζει επιπλέον πειραματικά δεδομένα για την περίπτωση μη βυθισμένης βλάστησης. Οι τιμές του συντελεστή τριβής  $C_D$  φαίνονται να μειώνονται με την αύξηση των τιμών του αριθμού Reynolds ( $R$ ) όμοια με το συμπέρασμα των συγγραφέων,  $C_D \sim R^{-k}$  (όπου  $k$  συντελεστής παλινδρόμησης ξεχωριστός για κάθε μελέτη). Συμπερασματικά, δόθηκε μια μέθοδος για την εκτίμηση της τιμής  $k$ , η οποία φαίνεται να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της βλάστησης αλλά όχι από την πυκνότητά της.

Η εργασία της Nepf (2012b) αναδεικνύει ορισμένες πρόσφατες τάσεις στην υδροδυναμική της βλάστησης, με έμφαση στις συνθήκες μέσα στα κανάλια και στις

χωρικές κλίμακες που εκτείνονται από τα μεμονωμένα φύλλα χόρτου, στις συστοιχίες ή στις μεμονωμένες επιφάνειες βλάστησης και στο μήκος του καναλιού. Στην κλίμακα φύλλου, το οριακό στρώμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια του φυτού παίζει έναν ρόλο στον έλεγχο της απορρόφησης ή πρόσληψης θρεπτικών συστατικών. Η αντίσταση ροής και η διαθεσιμότητα φωτός επηρεάζονται επίσης από τον ανασχηματισμό των εύκαμπτων φύλλων. Στην κλίμακα συστοιχίας, υπάρχουν δύο περιοχές ροής: Για αραιές συστοιχίες, η ροή μοιάζει με ένα τραχύ οριακό στρώμα, ενώ για πυκνές συστοιχίες, η ροή μοιάζει με ένα στρώμα ανάμιξης. Στην κλίμακα του καναλιού, η αντίσταση ροής είναι πιο στενά συνδεδεμένη με την κατανομή της βλάστησης σε κλίμακα μεμονωμένων επιφανειών, που περιγράφεται από τον συντελεστή μπλοκαρίσματος, παρά με την γεωμετρία των μεμονωμένων φυτών. Η εργασία αυτή ασχολείται ακόμα με τις διαδικασίες στην κλίμακα μεμονωμένων φύλλων, την ομοιόμορφη έκταση βυθισμένης βλάστησης, τις αναδυόμενες συστοιχίες πεπερασμένου μήκους και πλάτους, με την μεταφορά ιζήματος και την μορφοδυναμική του καναλιού. Συμπεραίνεται ότι η υδροδυναμική της βλάστησης παίζει μεγάλο ρόλο στην περιβαλλοντική αποκατάσταση, στην διαχείριση πόρων και στον κύκλο του άνθρακα. Η επίδραση της κατανομής της βλάστησης στην κίνηση των ιζημάτων συζητείται επίσης, δίνοντας προσοχή στις μεθόδους για την εκτίμηση της διατμητικής τάσης του πυθμένα εντός των περιοχών της βλάστησης. Αναδεικνύονται τέλος, οι βασικές προκλήσεις της έρευνας της υδροδυναμικής των καναλιών με βλάστηση.

Η επισκόπηση της Nepf (2012a) περιγράφει τη μέση και τυρβώδη ροή και μεταφορά μάζας παρουσία υδρόβιας βλάστησης η οποία αλλάζει το πεδίο ροής. Εντός των αναδυόμενων συστοιχιών, οι κλίμακες μήκους τύρβης καθορίζονται από τη διάμετρο του μίσχου και την μεταξύ τους απόσταση, και η μέση ροή προσδιορίζεται από τη διανομή της μετωπικής επιφάνειας της συστοιχίας. Κοντά σε αραιές βυθισμένες συστοιχίες, η τραχύτητα του πυθμένα και η τύρβη κοντά στον πυθμένα ενισχύονται, αλλά το προφίλ της ταχύτητας παραμένει λογαριθμικό. Για πυκνές βυθισμένες συστοιχίες το προφίλ της ταχύτητας δείχνει ένα στρώμα μίξης που υποδηλώνει δυο κλίμακες τύρβης: κλίμακα συστοιχίας- βλάστησης και κλίμακα μίσχων. Η ασυνέχεια της τριβής στην κορυφή της συστοιχίας δημιουργεί ένα στρώμα διάτμησης, το οποίο περιέχει στροβιλισμούς κλίμακας συστοιχίας που ελέγχουν την ανταλλαγή της μάζας και της ορμής ανάμεσα στη συστοιχία και την ροή πάνω από αυτή. Οι στροβιλισμοί κλίμακας συστοιχίας διεισδύουν σε μια πεπερασμένη απόσταση μέσα στη συστοιχία, δε, που καθορίζεται από την τριβή της συστοιχίας και επηρεάζει το ύψος απόκλισης και αλλοιώνει την ροή μέσα στη βλάστηση. Αυτή η κλίμακα μήκους διαχωρίζει την συστοιχία σε δύο περιοχές: Στο ανώτερο τμήμα της συστοιχίας πραγματοποιείται ενεργητική κάθετη τυρβώδη μεταφορά, που ελέγχεται από τους στροβιλισμούς κλίμακας συστοιχίας οι οποίοι προκαλούν μεγάλη τυρβώδη διάχυση, ενώ στο κατώτερο τμήμα της συστοιχίας πραγματοποιείται μειωμένη μεταφορά, που σχετίζονται με τη μικρότερη τύρβη κλίμακας μίσχου. Οι στροβιλισμοί κλίμακας συστοιχίας προκαλούν μια κυματιστή κίνηση στα εύκαμπτα φύλλα, που ονομάζεται

monami.

Προηγούμενες μελέτες έχουν εξετάσει την αντίσταση βλάστησης σε διαφορετικές κλίμακες, την κλίμακα φύλλου, την κλίμακα συστοιχίας, και την κλίμακα καναλιού, αλλά λίγες μελέτες έχουν εξετάσει τη σχέση μεταξύ αυτών των κλιμάκων. Στην εργασία των Luhar and Nepf (2012), αναπτύσσονται απλά μοντέλα βασισμένα στην φυσική που συνδέουν τις διαδικασίες που επηρεάζουν την αντίσταση που δημιουργείται από την υδρόβια βλάστηση στη κλίμακα φύλλου και συστοιχίας με την υδραυλική αντίσταση που παράγεται από τη βλάστηση στην κλίμακα καναλιού. Αυτό δεν είναι πρακτικό επειδή οι τεχνικές παρατήρησης/μέτρησης εξ αποστάσεως δεν είναι πρακτικές και ακριβείς στην χαρτογράφηση της βλάστησης του καναλιού με ακρίβεια μέτρου. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση διαχείρισης καναλιού με βλάστηση η οποία κόβεται περιοδικά για την μείωση της υδραυλικής αντίστασης. Για πλήρως ανεπτυγμένη ροή διαμέσου βυθισμένων συστοιχιών βλάστησης, οι ταχύτητες μπορούν επιτυχώς να προβλεφθούν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δύο στρωμάτων στο οποίο η μεταφορά ορμής από την ανεμπόδιστη ροή προς τη συστοιχία βλάστησης εκφράζεται χρησιμοποιώντας ένα σταθερό συντελεστή τριβής. Για να ληφθεί υπόψη η ευκαμψία της βλάστησης σε αυτό το μοντέλο δύο στρωμάτων, αναπτύχθηκε μια επαναληπτική διαδικασία που υπολογίζει τη μείωση στο ύψος του φυτού και της τριβής για μια δεδομένη ταχύτητα ροής με βάση τις ιδιότητες του υλικού των φυτών, και ανατροφοδοτεί με αυτές τις πληροφορίες το ισοζύγιο ορμής. Αυτή η απλή επανάληψη προβλέπει με ακρίβεια το ύψος της βλάστησης και τις ταχύτητες για εύκαμπτη βυθισμένη βλάστηση. Τέλος, εξετάζεται η επίδραση των διαφόρων μοτίβων κατανομής βλάστησης επεκτείνοντας το μοντέλο δύο στρωμάτων για να εξηγηθούν πιο πολύπλοκες γεωμετρίες καναλιού και συστοιχίας. Η συνολική υδραυλική αντίσταση που παράγεται από τη βλάστηση εξαρτάται κυρίως από τον παράγοντα μπλοκαρίσματος, δηλαδή το κλάσμα της διατομής του καναλιού που εμποδίζεται από τη βλάστηση. Για ένα σταθερό συντελεστή μπλοκαρίσματος, η ειδική κατανομή της βλάστησης μπορεί επίσης να διαδραματίσει ένα ρόλο, με ένα μεγάλο αριθμό από μικρές συστοιχίες να παράγει περισσότερη αντίσταση από μια ενιαία μεγάλη συστοιχία. Με την εξέταση μοντέλων με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, παρέχονται προτάσεις για το τι μετρήσεις πεδίου απαιτούνται για να προωθηθεί η πρόβλεψη της αντίστασης του καναλιού.

Η εργασία των Aberle and Järvelä (2013) συνοψίζει τις τρέχουσες πρακτικές για την εκτίμηση της αντίστασης της ροής που προκαλείται από τη βλάστηση όταν είναι αναδυόμενη στην κοίτη πλημμυρών. Το τρέχον επίπεδο της επιστήμης για την παραμετροποίηση της τριβής λόγω σχήματος της βλάστησης και της σχετικής αντίστασης ροής διερευνήθηκαν με σκοπό την πρακτική εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η ανόμοια συμπεριφορά αντίστασης των απλού σχήματος άκαμπτων στοιχείων και της φυλλώδους φυσικής βλάστησης τονίστηκε με τη συγκέντρωση και την ανάλυση των δεδομένων που δημοσιεύτηκαν από ομάδες έρευνας των συγγραφέων, καθώς και από άλλες. Συμπερασματικά, αποδείχθηκε ότι η περιγραφή των βασικών υδραυλικών ιδιοτήτων των φυτών, της γεωμετρίας και της ευκαμψίας, με τις παραμέτρους που

είναι ειδικές για κάθε είδος βλάστησης είναι ανώτερη από την αναλογία άκαμπτου κυλίνδρου που χρησιμοποιείται συνήθως στην πρακτική της υδραυλικής μηχανικής. Η συζήτηση σχετικά με τους περιορισμούς των πολλών υφιστάμενων προσεγγίσεων για τον προσδιορισμό της αντίστασης ροής λόγω βλάστησης έχει ως στόχο να προωθήσει τη χρήση των σύγχρονων πρακτικών, όπως η παραμετροποίηση της πυκνότητας βλάστησης με το δείκτη επιφάνειας φύλλων, μια παράμετρος που μπορεί να προκύψει με τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης. Αξιοπίστη μοντελοποίηση της αντίστασης ροής απαιτεί προσεγγίσεις που ενσωματώνουν άμεσα το φύλλωμα και την ευκαμψία και όχι απλοϊκά χρησιμοποιώντας τη πυκνότητα, τη χαρακτηριστική διάμετρο και τον αυθαίρετα εκλεγμένο χοντρικό συντελεστή τριβής. Επίσης, γίνονται πολλές προτάσεις για μελλοντικές έρευνες σχετικά με τα θέματα που αναλύει η εργασία ενώ τέλος προτάσσεται η ανάγκη για μια διεπιστημονική έρευνα που να περιλαμβάνει ειδικούς από σχετιζόμενους κλάδους για την ανάπτυξη κατάλληλων προσεγγίσεων για την παραμετροποίηση διαφορετικών ειδών βλάστησης.

Τα τελευταία χρόνια η διαχείριση και ο σχεδιασμός των ποταμών έχει μετατοπιστεί σε μια πιο οικολογική προσέγγιση με στόχο την προστασία και την αποκατάσταση της βλάστησης, λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη της για το φυσικό περιβάλλον. Ως εκ τούτου, πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην αλληλεπίδραση μεταξύ βλάστησης και ροής νερού. Όπως φαίνεται από την προηγηθείσα επισκόπηση, αρκετές μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το κατακόρυφο προφίλ της ταχύτητας έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα S και η κατανομή πάνω από την συστάδα της βλάστησης ακολουθεί έναν λογαριθμικό νόμο. Αναλυτικές εκφράσεις αυτών των κατανομών έχουν προταθεί, μεταξύ άλλων, από τους Carollo et al. (2002), Stephan and Gutkecht (2002) και Li et al. (2014). Οι περισσότεροι από αυτούς τους τύπους αναφέρονται σε πυκνές συστάδες βλάστησης. Η Nepf (2012a) παρατήρησε τη διαφορά μεταξύ αραιών και πυκνών συστάδων και ανέφερε ότι στην πρώτη περίπτωση η κατανομή της ταχύτητας είναι σχεδόν λογαριθμική σε όλο το βάθος του νερού. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να διερευνήσει περαιτέρω τη διαφορά των προφίλ ταχύτητας πάνω από δύο διαφορετικές πυκνότητες βλάστησης λαμβάνοντας επίσης υπόψη τη γεωμετρία των στοιχείων βλάστησης. Επιπλέον, καθώς αναπτύσσονται πιο περίπλοκα αριθμητικά εργαλεία για τη μοντελοποίηση των πολύπλοκων διαδικασιών αλληλεπίδρασης ροής-βλάστησης, η ανάγκη για λεπτομερή πειραματικά δεδομένα γίνεται όλο και πιο σημαντική, τόσο για την καλύτερη κατανόηση των υποκείμενων φαινομένων όσο και για σύγκριση και επαλήθευση. Τα διαθέσιμα δεδομένα στη βιβλιογραφία για τα χαρακτηριστικά ταχύτητας και τύρβης αναφέρονται κυρίως σε έναν μεμονωμένο τύπο στοιχείου, όπως άκαμπτα κυλινδρικά στοιχεία ή ένα συγκεκριμένο φυσικό φυτό, και συχνά αναφέρονται ως χωρικοί μέσοι όροι σε διάφορες τοποθεσίες εντός της βλάστησης (π.χ. Dunn et al. 1996, Wilson et al. 2003), ή σε μια μεμονωμένη θέση, όπως ο άξονας του καναλιού (π.χ. Li et al. 2014). Έτσι, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι παραλλαγές που σχετίζονται με διαφορές στη γεωμετρία των στοιχείων ή τη θέση εντός της συστοιχίας βλάστησης. Η παρούσα εργασία στοχεύει να συμβάλει στην κάλυψη αυτού του κενού παρέχοντας λεπτομερείς μετρήσεις και ολοκληρωμένη

σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών του πεδίου ροής, δηλαδή τα προφίλ ταχύτητας, τις τυρβώδεις εντάσεις και τις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις, για τρεις τύπους τεχνητών στοιχείων βλάστησης με διαφορετική γεωμετρία και χαρακτηριστικά όπως ακαμψία και πορώδες (δύο άκαμπτα και ένα ημιάκαμπτο), όλα με παρόμοιες πυκνότητες. Αποτελέσματα αυτής της μελέτης έχουν παρουσιαστεί σταδιακά κατά την πρόοδο της διατριβής σε δημοσιεύσεις που αναφέρονται στο τέλος της παρούσας.



### 3) Θεωρητικό υπόβαθρο

#### 3.1. Τυρβώδης ροή

Οι περισσότερες ροές στη φύση, αλλά και εν προκειμένω με παρουσία βλάστησης, είναι τυρβώδεις. Αν και είναι δύσκολο να δοθεί ακριβής ορισμός της τύρβης μπορούν να αναφερθούν μερικά από τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής για να γίνει η περιγραφή της. Βασικά χαρακτηριστικά (Νουτσόπουλος και Χριστοδούλου 1996) είναι: (α) η αταξία ή τυχαιότητα της κίνησης των ρευστών σωματιδίων και άρα η συνεχής μεταβολή της ταχύτητας σε κάθε σημείο του χώρου. Αυτό κάνει αδύνατη την αιτιοκρατική προσέγγιση των τυρβωδών προβλημάτων και έτσι βασιζόμαστε σε στατιστικές μεθόδους. (β) Η διάχυση της τύρβης που προκαλεί την ταχεία ανάμιξη και την αύξηση της μεταφοράς ορμής, μάζας και θερμότητας. (γ) Οι υψηλοί αριθμοί Reynolds: Η τύρβη συνήθως προέρχεται από αστάθεια της ροής κοντά σε στερεά όρια ή σε περιοχές μεγάλων κλίσεων ταχυτήτων όταν ο αριθμός Reynolds υπερβεί κάποιο όριο. Αυτές οι αστάθειες συνδέονται με την αλληλεπίδραση των όρων συνεκτικότητας με τους όρους μη γραμμικής αδράνειας στις εξισώσεις κίνησης. (δ) Τα υψηλά επίπεδα διακύμανσης της στροβιλότητας και γι αυτό το λόγο η δυναμική της στροβιλότητας παίζει ουσιώδη ρόλο στην περιγραφή των τυρβωδών ροών. Η τύρβη δεν είναι ένα χαρακτηριστικό των ρευστών αλλά των ρεόντων ρευστών. Η δυναμική της τύρβης είναι ίδια για όλα τα ρευστά είτε υγρά είτε αέρια εάν ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά μεγάλος. Τα χαρακτηριστικά των τυρβωδών ροών δεν ελέγχονται από τις μοριακές ιδιότητες των ρευστών, αλλά από τη γεωμετρία του χώρου όπου πραγματοποιείται η ροή και από τις αρχικές και οριακές συνθήκες που καθορίζουν το συγκεκριμένο μοτίβο ροής. Ως συνέπεια των ιδιαιτεροτήτων αυτών καμία γενική λύση των εξισώσεων της τυρβώδους ροής δεν είναι διαθέσιμη.

#### 3.2. Στατιστική ανάλυση τυρβωδών μεγεθών

Δεδομένου ότι η τύρβη χαρακτηρίζεται από τυχαίες διακυμάνσεις της ταχύτητας, η περιγραφή της αντιμετωπίζεται με στατιστικές μεθόδους. Η στατιστική ανάλυση χαρακτηρίζεται από μια απλή αποσύνθεση των μεγεθών σε μέσες τιμές και διακυμάνσεις με μηδενικές μέσες τιμές. Όλες οι μέσες τιμές αναφέρονται σε χρονικά μέσες τιμές, δηλαδή από μια χρονοσειρά δεδομένων ταχύτητας προκύπτει η χρονικά μέση τιμή της. Συγκεκριμένα, με την ανάλυση Reynolds η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας  $u$  αποτελείται από την μέση τιμή  $\bar{u}$  (mean  $u$ ) και την διακύμανση  $u'$  (χρονικά κυμαινόμενη τιμή). Η ίδια ανάλυση (Στάμου 2011) ισχύει για όλα τα στιγμιαία μεγέθη της τυρβώδους ροής ( $u$ ,  $v$ ,  $w$  και  $p$ ). Αναλυτικά:

$$u = \bar{u} + u' \quad v = \bar{v} + v' \quad w = \bar{w} + w' \quad p = \bar{p} + p' \quad (3-1)$$

Η χρήση χρονικά μέσων τιμών ανταποκρίνεται στις τυπικές εργαστηριακές συνθήκες

όπου πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις σε μια στατιστικά μόνιμη αλλά συχνά ανομοιόμορφη ροή. Σε μια τέτοια ροή, μια χρονική μέση τιμή  $\bar{u}$  είναι συνάρτηση της θέσης και αν είναι ανεξάρτητη του χρόνου η μέση ροή θεωρείται μόνιμη. Βέβαια η χρονική διάρκεια συλλογής των στιγμιαίων τιμών ενός μεγέθους επηρεάζει την ακρίβεια της μέσης τιμής για αυτό πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή του χρόνου δειγματοληψίας των πειραμάτων ώστε να είναι επαρκής.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η περιγραφή της τυρβώδους ροής σε όλα τα σημεία του χώρου και του χρόνου δεν είναι εφικτή. Όμως με την ανάλυση Reynolds μπορούν να προκύψουν οι εξισώσεις της τυρβώδους ροής, δηλαδή η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης, βασισμένες στα μέσα μεγέθη ( $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\bar{p}$ ). Αναλυτικά αυτές είναι (Στάμου, 2011):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

Δεδομένου ότι η ολική παράγωγος (επιτάχυνση) για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας είναι:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{u}}{dt} &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \\ \frac{d\bar{v}}{dt} &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ \frac{d\bar{w}}{dt} &= \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \end{aligned} \quad (3-3)$$

τότε οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης γράφονται:

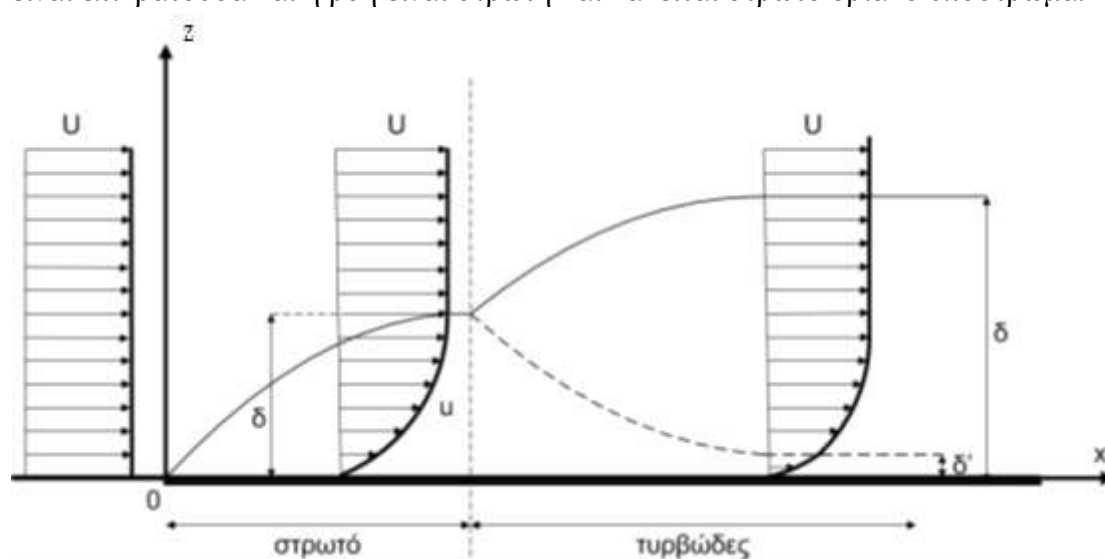
$$\begin{aligned} \frac{d\bar{u}}{dt} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u'w'} \right) \right] \\ \frac{d\bar{v}}{dt} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \overline{\rho v'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \overline{\rho v'w'} \right) \right] \\ \frac{d\bar{w}}{dt} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \overline{\rho w'u'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \overline{\rho w'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \overline{\rho w'^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3-4)$$

Οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης (3-4) περιέχουν τις δυνάμεις (ανά μονάδα μάζας) που εξασκούνται στο ρευστό σωματίδιο και είναι οι δυνάμεις από το πεδίο βαρύτητας  $g$ , οι δυνάμεις από τις πιέσεις  $p$ , και οι δυνάμεις από τις διατμητικές τάσεις (τριβές). Οι τελευταίες χωρίζονται σε διατμητικές τάσεις λόγω συνεκτικότητας, όπως μαρτυρά ο συντελεστής  $\mu$  και στις τυρβώδεις τάσεις ή τάσεις Reynolds που οφείλονται στην ύπαρξη της τύρβης, δηλαδή η παρουσία της τύρβης εισάγει επιπλέον τάσεις και τριβές στη ροή με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ανάμιξη της ροής και την πιο ομοιόμορφη κατανομή των ταχυτήτων ροής. Οι όροι με το τετράγωνο των διακυμάνσεων αποτελούν τις τυρβώδεις ορθές τάσεις ενώ οι όροι με τα γινόμενα διαφορετικών διακυμάνσεων αντιστοιχούν στις τυρβώδεις διατμητικές τάσεις. Οι

ορθές τάσεις συνεισφέρουν πολύ λίγο στην μεταφορά ορμής σε πολλές ροές ενώ οι διατμητικές τάσεις παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην μεταφορά ορμής από την τυρβώδη κίνηση. Επειδή στις εξισώσεις τυρβώδους ροής υπάρχουν πολλοί περισσότεροι άγνωστοι όροι σε σχέση με το συνολικό αριθμό εξισώσεων προκύπτει το πρόβλημα κλεισίματος της τύρβης, που επιχειρείται να αντιμετωπιστεί με διάφορα μοντέλα τύρβης, κάτι στο οποίο η παρούσα διατριβή δεν επεκτείνεται.

### 3.3. Οριακό στρώμα πυθμένα

Οι ροές σε ανοιχτούς αγωγούς επηρεάζονται έντονα από το στερεό όριο του πυθμένα δημιουργώντας μια περιοχή κοντά σε αυτό που ονομάζεται οριακό στρώμα. Αυτό συμβαίνει διότι επιβάλλεται ο μηδενισμός της ταχύτητας στο όριο αυτό σαν φυσική οριακή συνθήκη και επομένως κοντά στο όριο το ρευστό επιβραδύνεται εξαιτίας των τριβών. Χαρακτηριστικό μέγεθος του οριακού στρώματος είναι το πάχος του  $\delta$ , που ορίζεται ως η απόσταση από το στερεό όριο μέχρις ότου η ταχύτητα να γίνει περίπου ίση με την ταχύτητα ροής έξω από αυτό. Η τελευταία θεωρείται ομοιόμορφη καθ' ύψος. Επιπλέον το οριακό στρώμα χωρίζεται σε υποπεριοχές σύμφωνα με τον Prandtl. Συγκεκριμένα μέχρι το 15% του  $\delta$  (εσωτερική περιοχή) κυριαρχεί η συνεκτικότητα και αναπτύσσεται η κυρία αντίσταση στη ροή ενώ στο υπόλοιπο 85% η συνεκτικότητα μπορεί να αμεληθεί και το ρευστό να θεωρηθεί ιδεατό. Επίσης μέσα στην εσωτερική περιοχή υπάρχει μια ζώνη πάχους  $\delta'$  (~2% $\delta$ ) όπου η συνεκτικότητα είναι επικρατούσα και η ροή είναι στρωτή και καλείται στρωτό οριακό υπόστρωμα.



**Εικόνα 3.1.** Σκαρίφημα του οριακού στρώματος και προσεγγιστικές κατανομές των ταχυτήτων ροής (πηγή: Στάμου, 2011)

Με βάση αυτή τη διαστρωμάτωση, ο Prandtl κατάφερε μέσω διαστατικής ανάλυσης και πειραμάτων να καταλήξει σε διάφορες εξισώσεις (εξωτερικός και εσωτερικός νόμος) για την κατανομή της ταχύτητας πάνω από επίπεδη λεία πλάκα. Συγκεκριμένα, εκτός από το στρωτό οριακό υπόστρωμα η παρακάτω συνάρτηση ισχύει για ολόκληρη την περιοχή του τυρβώδους οριακού στρώματος

$$\frac{U-\bar{u}}{u_*} = f\left(\frac{z}{\delta}\right) \quad (3-5)$$

όπου  $U$  η εξωτερική ταχύτητα,  $\bar{u}$  η (χρονικά μέση) ταχύτητα σε απόσταση  $z$  από το όριο και  $u^*$  η ταχύτητα τριβής  $(\tau_0/\rho)^{1/2}$ . Έτσι ο εξωτερικός και ο εσωτερικός νόμος αλληλοκαλύπτονται για την περιοχή αυτή. Όλες οι σχέσεις που περιγράφουν την κατανομή της ταχύτητας μέσα στις υποπεριοχές του οριακού στρώματος συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Παπανικολάου, 2010):

**Πίνακας 3.1.** Εξωτερικός και εσωτερικός νόμος οριακού στρώματος

| Διανομή ταχύτητας  | Περιοχή ισχύος                                       | Παρατηρήσεις            |                  |
|--|--|-------------------------|------------------|
| $\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{zu_*}{\nu}$                   | $0 < \frac{zu_*}{\nu} < 4$                           | Στρωτό οριακό υπόστρωμα | Εσωτερικός νόμος |
| $\frac{\bar{u}}{u_*} = 5.6 \log \frac{zu_*}{\nu} + 4.9$    | $\frac{zu_*}{\nu} > 30 \sim 70$<br>$z/\delta < 0.15$ | Εσωτερική τυρβώδης ζώνη |                  |
| $\frac{U-\bar{u}}{u_*} = -5.6 \log \frac{z}{\delta} + 2.5$ | $\frac{zu_*}{\nu} > 30 \sim 70$<br>$z/\delta < 0.15$ | Εσωτερική τυρβώδης ζώνη | Εξωτερικός νόμος |
| $\frac{U-\bar{u}}{u_*} = -8.6 \log \frac{z}{\delta}$       | $z/\delta > 0.15$                                    | Εξωτερική ζώνη          |                  |

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί η έννοια της τραχύτητας  $k$  και ισοδύναμης τραχύτητας  $k_s$ . Ουσιαστικά η τραχύτητα αναφέρεται στις προεξοχές της επιφάνειας του στερεού ορίου (σε μονάδες μήκους) ενώ όταν το  $k \leq \delta'$  (δηλαδή μέσα στο στρωτό οριακό υπόστρωμα), η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υδραυλικά λεία. Αντίστοιχα, η ισοδύναμη τραχύτητα αναφέρεται στην τραχύτητα χρησιμοποιώντας ως βάση τους κόκκους της άμμου. Μάλιστα ο Nikuradse έδειξε μια σχέση μεταξύ της ισοδύναμης τραχύτητας και του συντελεστή Manning  $n$  :

$$n = 0.0318k_s^{1/6} \quad (3-6)$$

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η κατανομή της ταχύτητας πάνω από λεία επίπεδη πλάκα δίδεται από την σχέση (2-4), όπου  $H$  είναι το βάθος της ροής στη διατομή που μετράμε,  $z$  η απόσταση από το τοίχωμα,  $U$  η μέγιστη ταχύτητα,  $u=u(z)$  η μέση ταχύτητα σε απόσταση  $z$  από την πλάκα,  $u_*=(\tau_0/\rho)^{1/2}$  η ταχύτητα διάτμησης στο τοίχωμα και  $k \approx 0.40$  η σταθερά του von Karman. Βασική προϋπόθεση αυτής της σχέσης είναι το πάχος  $\delta$  του τυρβώδους οριακού στρώματος να έχει φτάσει στην ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή όπως λέγεται να έχει αναπτυχθεί πλήρως. Αυτός ήταν και ένας από τους λόγους επιλογής της θέσης μετρήσεων αρκετά κατάντη της αρχής της βλάστησης για να είναι όσο το δυνατόν πιο σίγουρο ότι έχει πραγματοποιηθεί αυτό και η ροή να είναι πραγματικά μόνιμη και να έχει αποκτηθεί ισορροπία/ομοιομορφία.

Τα παραπάνω θεωρητικά στοιχεία επεκτείνονται και για τις περιπτώσεις με τραχιές επιφάνειες και αυτή ήταν η κεντρική ιδέα όλων των ερευνητών που ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της βλάστησης σε ροή ανοιχτού αγωγού, δηλαδή η ενσωμάτωση της στην τραχύτητα του καναλιού είτε μέσω των συντελεστών τριβής και αντίστασης (πχ συντελεστής Manning  $n$ ), είτε της ταχύτητας διάτμησης ( $u_*$ ). Όπως απορρέει από τα προηγούμενα, η αντίσταση ροής μιας τραχιάς επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά το προφίλ ταχύτητας και επομένως για να καθοριστεί είναι απαραίτητο να περιγραφεί το προφίλ ταχύτητας του πεδίου ροής πάνω από την τραχιά επιφάνεια. Άρα εκτιμώντας τα προφίλ ταχύτητας μέσω πειραματικών μετρήσεων είναι δυνατό να προσδιοριστεί και να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της βλάστησης στο πεδίο ταχυτήτων. Αυτή ήταν η κεντρική μεθοδολογική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή.

Σύμφωνα με τους Stephan and Gutknecht (2002) στην περίπτωση πλήρως ανεπτυγμένης τυρβώδους ροής σε τραχύ ανοιχτό κανάλι, το κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας ακολουθεί τον λογαριθμικό νόμο του Prandtl όπως τροποποιήθηκε από τον Nikuradse (1933):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left( \frac{z}{k_s} \right) + C \quad (3-7)$$

όπου  $u$  είναι η χρονική μέση ταχύτητα ροής,  $u_*$  είναι η ταχύτητα διάτμησης,  $\kappa$  είναι η σταθερά von Karman,  $z$  είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη,  $C$  είναι η σταθερά ολοκλήρωσης,  $k_s$  είναι η ισοδύναμη τραχύτητα της άμμου. με άγνωστες παραμέτρους τις  $\kappa$ ,  $k_s$  και  $C$ . Για να ποσοτικοποιηθεί η τραχύτητα, προτείνεται μια διαδικασία να διατηρηθεί η σταθερά ολοκλήρωσης  $C$  ίση με 8,5 (σύμφωνα με τον Nikuradse (1933) και η καθολική σταθερά του von Karman ίση με 0,4 μεταβάλλοντας τη χαρακτηριστική παράμετρο τραχύτητας  $k_s$  (ισοδύναμη τραχύτητα άμμου) έως ότου το μετρούμενο προφίλ συμμορφώνεται καλύτερα με τον λογαριθμικό νόμο. Έτσι, οι επιπτώσεις της τραχύτητας στο συνολικό πεδίο ροής δεν ορίζονται αυθαίρετα, αλλά υπολογίζονται από το πραγματικό προφίλ ταχύτητας και περιγράφονται μέσω της ισοδύναμης τραχύτητας της άμμου.

Στην ίδια εργασία (Stephan & Gutknecht 2002) γίνεται εκτενής αναφορά σε πολλές παραλλαγές των εξισώσεων των νόμων (εσωτερικός και εξωτερικός) από διάφορους ερευνητές που επιχείρησαν να εκφράσουν την επίδραση της βλάστησης στην κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας μέσω των εξισώσεων αυτών. Η πιο επικρατούσα παραλλαγή είναι αυτή της μορφής (2-6) που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και έχει χρησιμοποιηθεί από ένα πλήθος μελετητών, όπως Raupach (1994), Klopstra et al. (1997), Shi and Hughes (2002), Okamoto and Nezu (2010), Nepf (2012b) κλπ. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις γίνεται η θεώρηση του στρώματος της βλάστησης ως ένας επιπλέον ιδεατός πυθμένας πάνω από τον οποίο γίνεται πρακτικά η ροή, με τη βλάστηση να θεωρείται ως «τραχύτητα» ώστε να έχουν εφαρμογή τα παραπάνω με κάποιες συγκεκριμένες διαφορές. Έτσι η κατανομή

ταχυτήτων πάνω από αυτόν τον θεωρούμενο πυθμένα είναι της μορφής (2-6) όπου παρουσιάζονται τα μεγέθη  $z_0$  που είναι ο παράγοντας της τραχύτητας και ονομάζεται ύψος τραχύτητας με διαστάσεις μήκους και το  $d$  που είναι η απόσταση από την κορυφή της βλάστησης και προς το εσωτερικό της όπου η ταχύτητα πρακτικά μηδενίζεται ή γίνεται αμελητέα και αυτό γίνεται για  $z-d=z_0$ . Προφανώς η εξίσωση ισχύει για  $z-d>z_0$ . Ουσιαστικά η φυσική σημασία του παράγοντα  $d$  είναι πως η οριακή συνθήκη μηδενικής ταχύτητας ενός στερεού ορίου για τη ροή στο στρώμα πάνω από τη βλάστηση μετατοπίζεται εσωτερικά του στρώματος βλάστησης. Παρότι η λογαριθμική κατανομή της ταχύτητας πάνω από στρώμα βλάστησης έχει επιβεβαιωθεί από πλήθος ερευνητών, η κατανομή της ταχύτητας μέσα στο στρώμα της βλάστησης δεν έχει διευκρινιστεί αρκετά λόγω της πολυπλοκότητας της ροής σε αυτό.

### 3.4. Διαστρωμάτωση της ροής παρουσία βλάστησης

Η εξέλιξη και η κατανομή του πεδίου ροής σε περιπτώσεις ανοιχτών αγωγών όπου αναπτύσσεται βλάστηση έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες καθώς έχει άμεση σχέση με τα ποτάμια συστήματα και την διαχείριση τους όπως επίσης την πρόβλεψη και προστασία από πλημμύρες, λαμβάνοντας υπόψιν τους σύγχρονους περιβαλλοντικούς όρους για την προστασία του φυτικού και ζωικού οικοσυστήματος οι οποίοι προωθούν την βελτίωση της ποιότητας των υδατικών πόρων. Συγκεκριμένα, στην παρούσα διατριβή γίνεται χρήση βυθισμένης βλάστησης που είναι είτε ομοιόμορφα είτε κλιμακωτά κατανεμημένη στο πυθμένα του εργαστηριακού καναλιού σε όλο το μήκος και πλάτος της περιοχής βλάστησης χωρίς να δημιουργούνται τμήματα ανομοιογένειας στην περιοχή αυτή ενώ τα στοιχεία βλάστησης ποικίλουν από την απλή γεωμετρία κυλίνδρου σε πιο σύνθετες με συνδυασμό κυλίνδρου-σφαίρας και κυλίνδρου-συστάδας εύκαμπτων ακίδων.

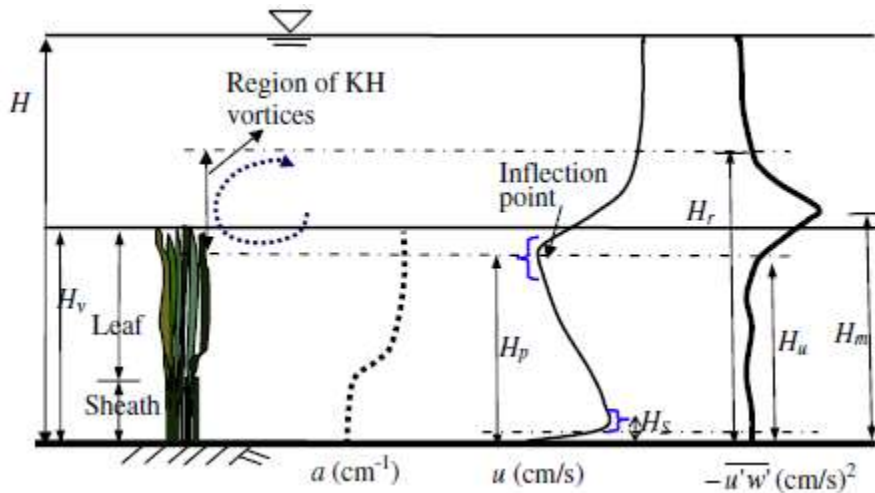
Μια πρώτη παρατήρηση της κατακόρυφης τομής ενός ανοιχτού αγωγού με βυθισμένη βλάστηση οδηγεί στον διαχωρισμό της ροής σε δύο τμήματα/στρώματα, ένα που περιέχει την βλάστηση και το δεύτερο πάνω από αυτό μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Σε αντιστοίχιση με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με την βιβλιογραφική επισκόπηση, τέτοια θεώρηση έγινε σε εργασίες όπως Klopstra et al. (1997), Huthoff et al. (2007), Righetti και Armanini (2002), Huai et al. (2013) κλπ. Βέβαια, το δεύτερο στρώμα δεν υπάρχει στην περίπτωση που η βλάστηση είναι τόσο υψηλή που βγαίνει έξω από την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και τότε η ροή γίνεται σε ένα στρώμα, αυτό εντός βλάστησης. Τέτοιες περιπτώσεις συναντάμε σε εργασίες όπως Aberle και Järvelä (2013), Chen et al. (2011), Mulahasan και Stoesser (2017) κλπ, αλλά δεν εξετάζεται στην παρούσα διατριβή. Στην περίπτωση της βυθισμένης βλάστησης η κατανομή της ταχύτητας σχετίζεται άμεσα με την διαστρωμάτωση του πεδίου ροής και κατ' επέκταση με τα διατμητικά στρώματα που αναπτύσσονται, τα οποία είναι ζώνες ισχυρής διάτμησης που οφείλονται στην έντονη μεταβολή της ταχύτητας. Εξ ορισμού ένα στρώμα διάτμησης είναι ένα στρώμα ροής

όπου υπάρχει διάτμηση ή κλίση της ταχύτητας. Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα διατμητικού στρώματος προκύπτει όταν ένα ρευστό περνά πάνω από ένα στερεό όριο για να σχηματίσει αυτό που ονομάζεται οριακό στρώμα και αναλύθηκε προηγουμένως (Εικόνα 3.1). Γενικότερα ένα στρώμα διάτμησης (διατμητικό στρώμα) δημιουργείται όταν υπάρχει ασυνέχεια ή κλίση της κατανομής ταχυτήτων από διάφορα αίτια όπως οριακές συνθήκες, εμπόδια στην ροή κλπ.

Σύμφωνα με τους Ghisalberti και Nepf (2002) μια ισχυρή ένδειξη παρουσίας διατμητικού στρώματος είναι η ύπαρξη ενός σημείου καμπής στο κατακόρυφο προφίλ της κατανομής της ταχύτητας. Δηλαδή θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αυτή η κατανομή αποτελείται από δύο περιοχές περίπου σταθερής ταχύτητας που χωρίζονται από μια περιορισμένη περιοχή διάτμησης που περιέχει το σημείο καμπής, ένα στρώμα ελεύθερης διάτμησης. Η προσέγγιση αυτή είναι πιο κοντά στην περίπτωση ενός στρώματος ανάμειξης, όπου αλληλεπιδρούν δυο ρευστά με διαφορετικές ταχύτητες και πιθανώς διαφορετικές πυκνότητες. Πρόκειται λοιπόν για μια διαφορετική θεώρηση της ροής με βυθισμένη βλάστηση που παρουσιάζεται στην ίδια εργασία για να υποστηριχθεί η κατανομή της ταχύτητας σε τρία στρώματα. Το προφίλ ταχύτητας ενός στρώματος ανάμειξης προσεγγίζει αυτό μιας υπερβολικής εφαιπτομένης ενώ άλλα κοινά χαρακτηριστικά εκτός του σημείου καμπής στο προφίλ ταχύτητας είναι η αυξημένη συσχέτιση μεταξύ οριζόντιων και κατακόρυφων τυρβωδών διακυμάνσεων και η δομή της μεταφοράς ορμής.

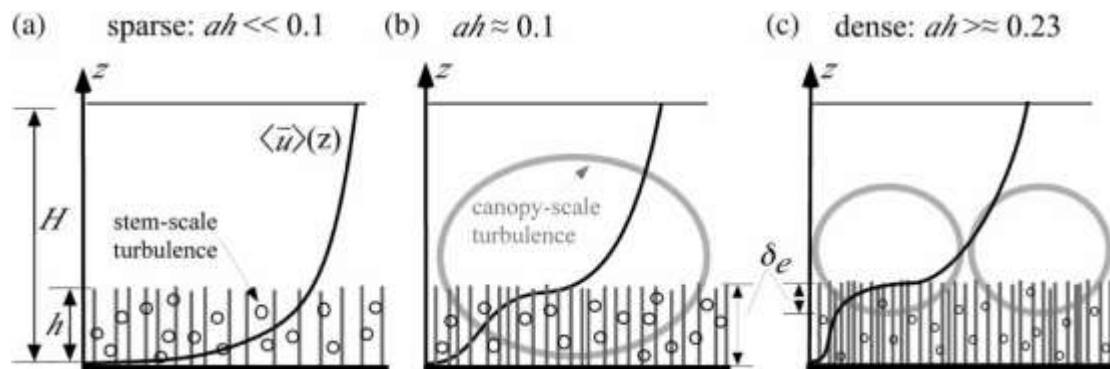
Κατ' επέκταση των προηγουμένων υπάρχουν θεωρήσεις πολλαπλών στρωμάτων ροής όπως διαπιστώνεται σε εργασίες όπως Shi και Hughes (2002), Ghisalberti και Nepf (2002), Carollo et al. (2002), Huai et al. (2009), Chen et al. (2011), Li et al. (2014) κλπ. Στα πειραματικά προφίλ ταχύτητας αυτών των εργασιών διακρίνονται λοιπόν τρία στρώματα: ένα στρώμα ουσιαστικά σταθερής χαμηλής ταχύτητας μέσα στη συστοιχία βλάστησης κοντά στον πυθμένα, στο οποίο η ταχύτητα μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη με την ταχύτητα διάτμησης  $u_*$ , ένα στρώμα ταχέως αυξανόμενης ταχύτητας στο πάνω μέρος των στοιχείων βλάστησης και ένα στρώμα με λιγότερο γρήγορα αυξανόμενη ταχύτητα από πάνω στο ανεμπόδιο τμήμα ροής που φτάνει την ελεύθερη επιφάνεια. Εδώ πρέπει επισημανθεί ότι το ενδιάμεσο στρώμα μπορεί να έχει πιο περίπλοκη δομή, δηλαδή να περιλαμβάνει επιμέρους υπο-στρώματα με μείωση ταχύτητας σε ορισμένα από αυτά, εξαρτώμενα από τη μορφή και την γεωμετρία της βλάστησης. Πιο συγκεκριμένα, στις περισσότερες από αυτές τις εργασίες εντός του στρώματος βλάστησης και λίγο κάτω από την κορυφή της παρατηρείται ένα τοπικό ελάχιστο της ταχύτητας ενώ το σχήμα της κατανομής φαίνεται να επηρεάζεται άμεσα από την γεωμετρία του στοιχείου βλάστησης αλλά και από την πυκνότητα της. Επιπλέον σε βαθύτερο σημείο λίγο πάνω από τον πυθμένα παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο της ταχύτητας που οφείλεται στην διάτμηση από το οριακό στρώμα του πυθμένα. Αυτή η αδρή μορφή παρατηρήθηκε σε κάποιες μελέτες με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα να είναι αυτή των Li et al. (2014) όπου τα τοπικά ακρότατα παρομοιάζονται σαν αριστερή και δεξιά παρένθεση «(, )». Η

παραπάνω μορφή της κατανομής ταχύτητας φαίνεται παραστατικά στην Εικόνα 3.2. Αυτή η κατανομή ταχύτητας είναι ενδεικτική και δεν είναι σίγουρο ότι θα έχει την ίδια μορφή σε όλες τις περιπτώσεις καθώς εξαρτάται από την γεωμετρία και την πυκνότητα βλάστησης, παράγοντες οι οποίοι τροποποιούν την κατανομή ταχύτητας αλλάζοντας θέση στα σημεία καμψής αλλά και τον αριθμό αυτών, ενώ δεν αποκλείεται και η διαφοροποίηση από θέση σε θέση μέσα στη βλάστηση. Επομένως κάθε περίπτωση ροής με παρουσία βλάστησης, αν και παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με τις υπόλοιπες, θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά για να γίνει ο εντοπισμός των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της.



**Εικόνα 3.2.** Σκαρίφημα κατανομής ταχύτητας και διατμητικής τάσης σε ανοιχτό αγωγό με βυθισμένη βλάστηση [πηγή: Chen et al. (2011), doi:10.1016/j.jhydrol.2010.12.018]

Η Nepf (2012b) αναφέρει χαρακτηριστικά ότι το προφίλ ταχύτητας σε αραιή βλάστηση ακολουθεί την λογαριθμική μορφή σε όλη σχεδόν την κατακόρυφο από τον πυθμένα (μέσα στη βλάστηση) μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Μόνο όταν η βλάστηση γίνει αρκετά πυκνή δημιουργείται η προαναφερόμενη διαστρωμάτωση. Ενδεικτική είναι μια εικόνα στην ίδια εργασία η οποία συνοψίζει αυτά και παρατίθεται ακολούθως στην Εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3.** Σκαρίφημα κατανομής ταχύτητας ανάλογα την πυκνότητα βλάστησης [πηγή: Nepf (2012b), <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>]



Οι Kouwen et al. (1969) παρουσίασαν προφίλ ταχύτητας που παρατηρήθηκαν σε εργαστηριακό κανάλι στον οποίο τοποθετήθηκε τεχνητή εύκαμπτη βλάστηση και βρέθηκε ότι το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας όπως φαίνεται από την εξίσωση (2-5) αντιπροσωπεύει επαρκώς τις συνθήκες ροής πάνω από ένα εύκαμπτο πλαστικό κάλυμμα (βλάστηση). Πολλές εργασίες καθώς και η παρούσα επιβεβαιώνουν αυτό το συμπέρασμα. Οι διαφορές προκύπτουν στην έκφραση της λογαριθμικής σχέσης που προτείνεται κάθε φορά. Στην παρούσα διατριβή ακολουθήθηκε η προσέγγιση της απλής τροποποίησης της (2-4) ώστε να μπορεί να γίνει προσδιορισμός της ταχύτητας διάτμησης. Από θεωρητικής άποψης, το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας εφαρμόζεται πάνω από μια απόσταση αναφοράς που θα ήταν το επίπεδο όπου αυτό συναρμόζεται με το προφίλ εντός της βλάστησης. Αυτό το επίπεδο αναφοράς θα μπορούσε να είναι εντός του στρώματος με βλάστηση ή στην κορυφή της βλάστησης ανάλογα με το καθεστώς ροής. Για πρακτικές εφαρμογές οι Kouwen and Unny (1973) πρότειναν ένα επίπεδο αναφοράς ίσο με το ύψος της λυγισμένης βλάστησης όταν αυτή είναι εύκαμπτη (Carollo et al 2002).

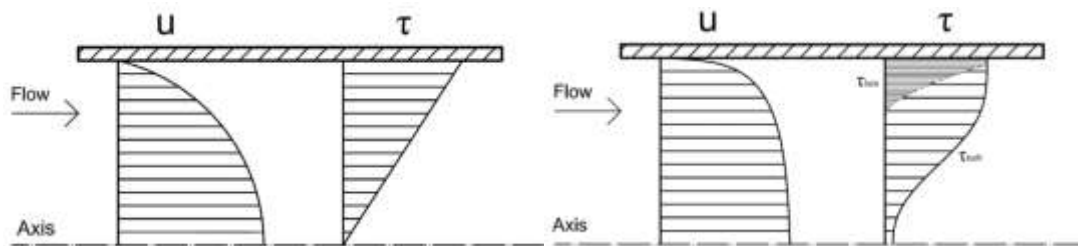
Σύμφωνα με τα παραπάνω, το πεδίο ταχυτήτων και τύρβης αποκτά μοναδικά χαρακτηριστικά στην περίπτωση βυθισμένης βλάστησης, τα οποία επιδιώκει να διερευνήσει και η παρούσα πειραματική εργασία. Συγκεκριμένα, κύριος στόχος είναι η συσχέτιση της γεωμετρίας, του είδους και της πυκνότητας της βλάστησης με τα κατακόρυφα προφίλ των ταχυτήτων και των τυρβωδών τάσεων και εντάσεων. Προτείνεται μια σχέση λογαριθμική για την κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας πάνω από το στρώμα βλάστησης σε κάθε περίπτωση και γίνεται προσπάθεια να περιγραφεί η κατανομή ταχυτήτων στο εσωτερικό του στρώματος βλάστησης, λαμβάνοντας υπόψη τα παρόντα πειραματικά αποτελέσματα και τα πορίσματα προηγούμενων ερευνών.

### 3.5. Διατμητικές τάσεις

Για τυρβώδη ροή πάνω από στερεό όριο η έκφραση της συνολικής διατμητικής τάσης αποτελείται από τη στρωτή διατμητική τάση και από τη τυρβώδη διατμητική τάση.

$$\tau_{tot} = \tau_l + \tau_t = \mu \frac{d\bar{u}}{dz} - \overline{\rho u' w'} \quad (3-8)$$

Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στο κατακόρυφο επίπεδο xz, όπου x είναι η κύρια κατεύθυνση της ροής στο εργαστηριακό κανάλι. Η διάτμηση λοιπόν προκαλείται από την κατακόρυφη διαφοροποίηση της ταχύτητας όπως μαρτυρά ο όρος  $du/dz$  καθώς στο στερεό όριο η ταχύτητα μηδενίζεται ενώ το γινόμενο των διακυμάνσεων αφορά της επιρροή της τύρβης στην διάτμηση. Στην Εικόνα 3.4 παρατίθεται σκαρίφημα κατανομής ταχύτητας και συνολικής διατμητικής τάσης κοντά σε στερεό όριο.



**Εικόνα 3.4.** Σκαρίφημα κατανομής ταχύτητας και συνολικής διατμητικής τάσης κοντά σε στερεό όριο για στρωτή ροή (αριστερά) και τυρβώδη ροή (δεξιά) (πηγή: Csuka and Olšiak(2016), <https://doi.org/10.1063/1.4963054>)

Στην περίπτωση που εξετάζει η παρούσα διατριβή, η ζώνη βλάστησης θα εισάγει μια απότομη μείωση της ταχύτητας κάτι που συνεπακόλουθα επιφέρει κορύφωση της διατμητικής τάσης κοντά στην διεπιφάνεια νερού- βλάστησης. Πράγματι, ερευνητές όπως οι Dunn et al. (1996) και Nepf και Vivoni (2000) έδειξαν ότι στα μετρούμενα προφίλ των τάσεων Reynolds (τυρβωδών διακυμάνσεων) οι τιμές φτάνουν στο μέγιστο κοντά στην κορυφή της συστάδας και καταστέλλονται σημαντικά μέσα σε αυτή. Ερευνητές όπως οι Nepf και Vivoni (2000) και Nikora (2017) διαπίστωσαν ότι η κατακόρυφη κατανομή της τάσης Reynolds εντός της συστάδας επηρεάζεται από παραμέτρους βλάστησης (π.χ. μορφολογία φυτών, πυκνότητα και ευκαμψία) και τα χαρακτηριστικά ροής (π.χ. σχετική βύθιση). Γενικά, το κατακόρυφο προφίλ της τάσης Reynolds μέσα σε μια βυθισμένη συστάδα βλάστησης αντανακλά την πολύπλοκη μηχανική των αλληλεπιδράσεων μεταξύ ροής και βλάστησης. Τέλος, αντίστοιχες παρατηρήσεις με τις διατμητικές τάσεις έγιναν από ερευνητές όπως οι Dunn et al. (1996) και για την ένταση της τύρβης, οι τιμές της οποίας φτάνουν στο μέγιστο κοντά στην κορυφή της συστάδας και καταστέλλονται σημαντικά μέσα σε αυτή.

## 4) Πειράματα

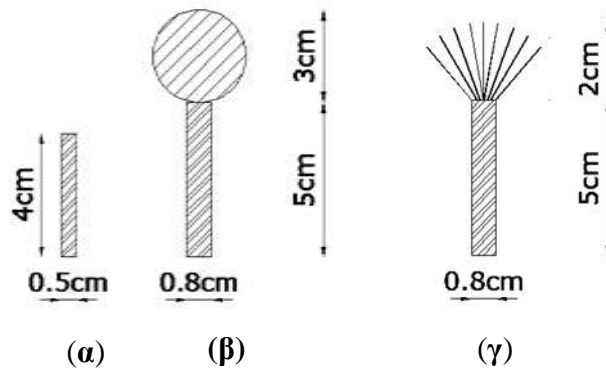
### 4.1. Πειραματική διάταξη

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ορθογωνική διώρυγα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής μήκους 16 m και πλάτους 0,50 m με κλίση 0,001. Στην είσοδο του καναλιού που είναι η δεξαμενή τροφοδοσίας της ροής τοποθετήθηκε διάταξη από πυκνή στρώση πεπλεγμένου σύρματος για την απομείωση της κινητικής ενέργειας εισαγωγής στην πειραματική διάταξη και την απόσβεση των διαταραχών της ροής. Τα στοιχεία βλάστησης τοποθετήθηκαν στο μεσαίο τμήμα του καναλιού, σε διατηρημένο ψευδο-πυθμένα μήκους 8 μέτρων που εκτείνεται 5 m από την αρχή του καναλιού μέχρι 3 m από το τέλος του. Ανάντη και κατάντη του διάτρητου αυτού του πυθμένα προσαρμόστηκαν κανονικοί μη διάτρητοι πυθμένες ώστε να προκύψει ένας ενιαίος (Εικόνα 4.1). Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι στοιχείων, που μιμούνται βυθισμένα μικρά φυτά με άκαμπτους μίσχους και πυκνό (άκαμπτο) ή αραιό (ημι-εύκαμπτο) φύλλωμα ή χωρίς φύλλωμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2: (α) Απλές ράβδοι διαμέτρου 0,5 cm και ύψους 4 cm, β) Σύνθετα στοιχεία αποτελούμενα από πλαστικές σφαίρες διαμέτρου 3,0 cm που στερεώνονται πάνω από λεπτές ράβδους διαμέτρου 0,8 cm και ύψους 5 cm, γ) Σύνθετα στοιχεία που αποτελούνται από εύκαμπτες (πλαστικές) βελόνες διατεταγμένες αξονο-συμμετρικά πάνω από τις ίδιες ράβδους. Για όλους τους τύπους στοιχείων, δοκιμάστηκαν δύο διατάξεις τοποθέτησης, σε παράλληλο και κλιμακωτό πλέγμα 10x10 cm, αποδίδοντας αντίστοιχες πυκνότητες 100 και 200 στελεχών/m<sup>2</sup> (Εικόνα 4.3).

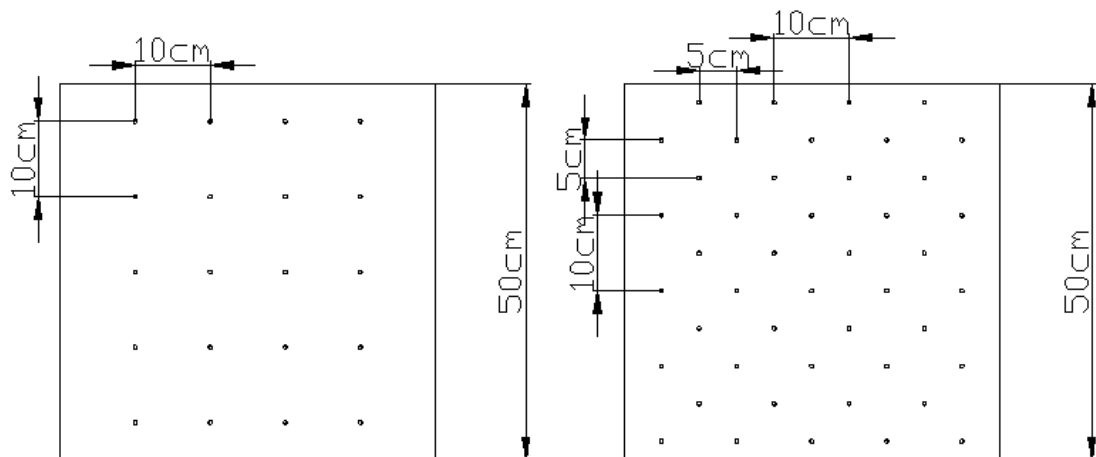
Η παροχή μετρήθηκε μέσω μετρητή Venturi και διαφορικού μανόμετρου εγκατεστημένου στη γραμμή τροφοδοσίας του Εργαστηρίου με ακρίβεια  $\pm 0,5$  l/s, ενώ το βάθος ροής καταγράφηκε με σταθμήμετρο κατά μήκος του άξονα του καναλιού με ακρίβεια  $\pm 0,2$  cm. Το βάθος ελέγχονταν από ένα θυρόφραγμα που βρίσκεται στο τέλος του καναλιού σε απόσταση περίπου 3 m από την αρχή της βλάστησης έτσι ώστε να παραμένει σταθερό πάνω από την περιοχή των μετρήσεων, που ήταν σε απόσταση περίπου 6 m ανάντη του θυροφράγματος. Η παροχή  $Q = 41$  l/s και το βάθος ροής  $H = 25$  cm ήταν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ένα πείραμα χωρίς βλάστηση για την ίδια παροχή και βάθος πραγματοποιήθηκε επίσης για λόγους σύγκρισης. Αναλυτικός πίνακας όπου συγκεντρώνονται τα τελικά πειράματα θα παρατεθεί σε επόμενη ενότητα.



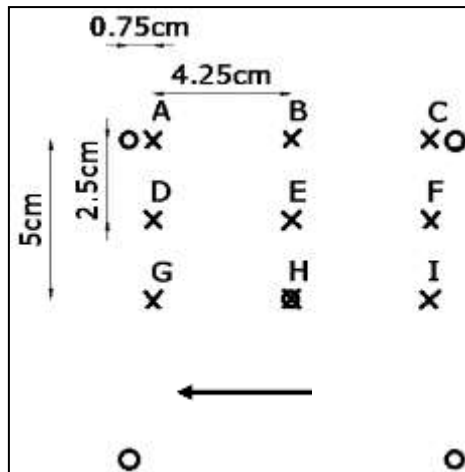
**Εικόνα 4.1.** Σκαρίφημα μηκοτομής του καναλιού



**Εικόνα 4.2.** Στοιχεία βλάστησης σε σειρά: α) απλή ράβδος, β) σύνθετη άκαμπτη, γ) σύνθετη ημι-εύκαμπτη (τα δ,ε είναι φωτογραφίες των σύνθετων στοιχείων)



**Εικόνα 4.3.** Διατάξεις (μοτίβα) στοιχείων βλάστησης: παράλληλη με 100 stems/m<sup>2</sup> (αριστερά), κλιμακωτή με 200 stems/m<sup>2</sup> (δεξιά)



**Εικόνα 4.4.** Θέσεις μέτρησης (x) μέσα στην συστοιχία βλάστησης (οι κύκλοι υποδηλώνουν τη θέση των στοιχείων, το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση ροής)

Στις Εικόνες 4.5 έως 4.8 παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό από διάφορες διατάξεις βλάστησης μέσα στο εργαστηριακό κανάλι.



(α)

(β)

**Εικόνα 4.5.** Πανοραμική όψη διατάξεων για την περίπτωση της σύνθετης ημι-εύκαμπτης βλάστησης: (α) παράλληλη διάταξη και (β) κλιμακωτή διάταξη

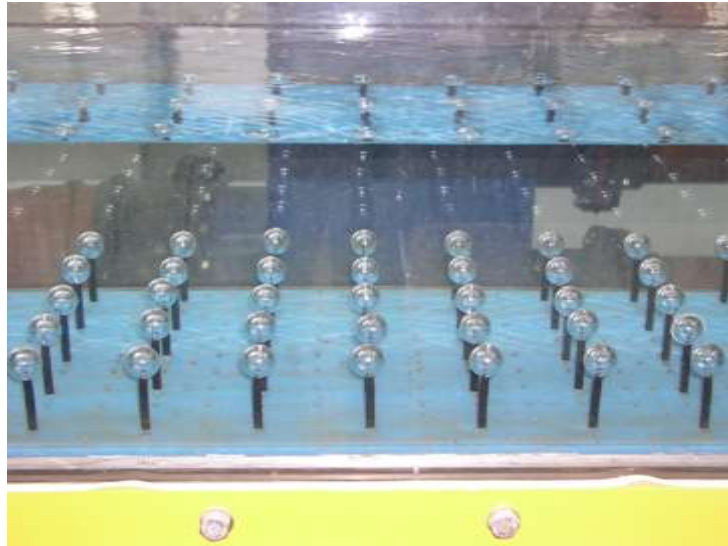


**Εικόνα 4.6.** Πλευρική όψη κλιμακωτής διάταξης για την περίπτωση της σύνθετης ημι-εύκαμπτης βλάστησης κατά την διάρκεια μέτρησης



**Εικόνα 4.7.** Πανοραμική όψη παράλληλης διάταξης για την περίπτωση της σύνθετης άκαμπτης βλάστησης





**Εικόνα 4.8.** Πλευρική όψη παράλληλης διάταξης για την περίπτωση της σύνθετης άκαμπτης βλάστησης

Στο παραπάνω εργαστηριακό κανάλι όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα η ροή είναι έντονα μονοδιάστατη. Δηλαδή από της συνιστώσες της ταχύτητας μόνο η  $u$  έχει σημαντικές τιμές ενώ οι άλλες δύο είναι στην συντριπτική τους πλειοψηφία κοντά στο μηδέν όπως φαίνεται και από τις πειραματικές μετρήσεις. Στα πειράματα γίνεται μέτρηση και καταγραφή των στιγμιαίων τιμών της ταχύτητας σε μια συγκεκριμένη θέση και για ένα επαρκές χρονικό διάστημα όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Για κάθε σημείο μέτρησης παράγονται χρονοσειρές στιγμιαίων τιμών της ταχύτητας για τις τρεις διαστάσεις. Από τις μετρήσεις υπολογίζουμε με χρήση του λογισμικού Microsoft Excel την μέση τιμή τους και συνεπακόλουθα από τους ορισμούς (3-1) προσδιορίζονται οι διακυμάνσεις για κάθε συνιστώσα. Έτσι μπορούν να προσδιοριστούν όλες οι τυρβώδεις τάσεις, εκ των οποίων η πιο σημαντική σε μονοδιάστατες ροές είναι η διατμητική τάση σε κατακόρυφο επίπεδο παράλληλο προς την κύρια διεύθυνση της ροής:

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u'w'} \quad (4-1)$$

Επομένως είναι πλέον εφικτό να κατασκευαστεί η κατακόρυφη κατανομή των ταχυτήτων, των τάσεων και των εντάσεων της τύρβης. Στην παρούσα εργασία ένταση τύρβης ορίζεται ο λόγος των RMS (Root Mean Square) διακυμάνσεων  $\overline{u'^2}^{1/2}$  (εναλλακτικός συμβολισμός  $u_{RMS}$ ) της διαμήκουσ ταχύτητας προς την αντίστοιχη (χρονικά) μέση ταχύτητα  $u$  στην ίδια κατακόρυφη θέση ( $z$ ) και εκφράζει το εύρος της διακύμανσης της ταχύτητας στην θέση αυτή.

#### 4.2. Όργανο μέτρησης ταχυτήτων και περιορισμοί πειραμάτων

Οι μετρήσεις ταχύτητας ελήφθησαν μέσω ενός τρισδιάστατου οργάνου ADV με ακρίβεια  $\pm 0,01$  cm/s, σε κατακόρυφες γραμμές σε επιλεγμένες θέσεις εντός της

συστοιχίας βλάστησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Το Acoustic Doppler Velocimeter (ADV LabVer. 2.7 Probe N0187 Nortec AS) είναι όργανο μέτρησης (ταχύμετρο) και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας και αποτελείται από τρία μέρη: καλώδιο, αποκωδικοποιητής σήματος και αισθητήρας μέτρησης, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.9 και 4.10. 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. Όπως φαίνεται από το όνομά του, το όργανο κάνει χρήση του φαινομένου Doppler για να υπολογίσει τη ταχύτητα βασιζόμενο στη σκέδαση του ήχου από μικροσωματίδια ή φυσαλίδες αέρα που μεταφέρει το νερό. Όσο περισσότερα είναι αυτά τα σωματίδια, τόσο πιο ποιοτικές είναι οι μετρήσεις (η ποιότητα εκτιμάται από το ίδιο το όργανο και αποδίδεται από το συντελεστή SNR-sound to noise ratio). Εξαιτίας του χαρακτηριστικού του να μετράει μόνο νερό με σωματίδια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο αλλά και στο πεδίο. Τα πειραματικά δεδομένα λαμβάνονται από τρία κανάλια και οδηγούνται στον υπολογιστή για καταγραφή με ρυθμό 25 Hz. Ο όγκος δειγματοληψίας (sampling volume) έχει διαστάσεις 9 mm ύψος και 3 mm πάχος και απέχει από τον αισθητήρα περίπου 5 cm για να εξασφαλίσει την μη διατάραξη του πεδίου ροής.

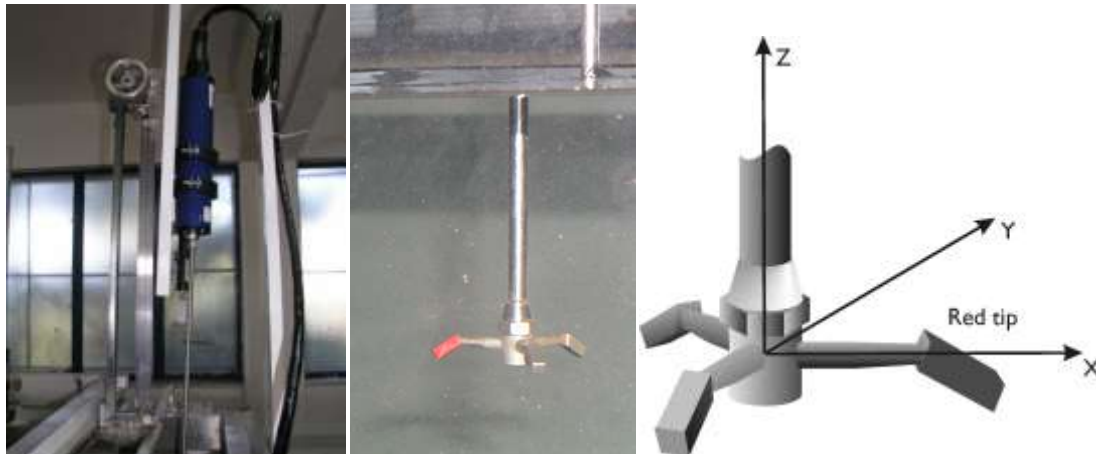
Η διάρκεια κάθε μέτρησης επιλέχθηκε να είναι δύο λεπτά ύστερα από δοκιμαστικές πειραματικές μετρήσεις και στατιστική επεξεργασία τους, όπου έγινε καταφανές ότι ο ελάχιστος χρόνος για την συγκομιδή επαρκών πειραματικών δεδομένων πέραν του οποίου επιπλέον πειραματικά δεδομένα επιφέρουν αμελητέα μεταβολή στους μέσους όρους των ταχυτήτων για τη συχνότητα δειγματοληψίας 25Hz ήταν μεταξύ 0.5 και 1.0 min. Οπότε για λόγους ασφάλειας στην επάρκεια των δεδομένων και χωρίς να δημιουργεί προβλήματα σπατάλης χρόνου στην πειραματική διαδικασία κρίθηκε κάθε μέτρηση να διαρκεί 2.0 min. Σε αυτήν την χρονική διάρκεια συλλέγονταν περίπου 3000 στιγμιαίες τιμές τοπικής ταχύτητας με τις οποίες κάνοντας χρήση περιβάλλοντος Office Excel και σύμφωνα με την θεωρία του προηγούμενου κεφαλαίου υπολογίστηκαν όλες οι μέσες τιμές των ταχυτήτων, τυρβωδών τάσεων και τυρβωδών εντάσεων και η διαγραμματική κατανομή αυτών.

Οι θέσεις μετρήσεων επιλέχθηκαν ύστερα από την βιβλιογραφική επισκόπηση και σύμφωνα με την εμπειρία προηγούμενων πειραματικών ερευνών. Ο κάρναβος των σημείων αυτών φαίνεται στην Εικόνα 4.4. Κατ' αρχήν επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές θέσεις σε σειρά με τα στοιχεία βλάστησης ευρισκόμενα μέσα στα απόνερα τους ουσιαστικά σε αυτήν την σειρά: δηλαδή, η θέση B στο μέσον της απόστασης των διαδοχικών στοιχείων και οι θέσεις A, C σε απόσταση μιας διαμέτρου 0.5 cm ανάντη και κατάντη των στοιχείων για να μετρηθεί η επίδραση τους όσο πιο κοντά γίνεται στην περιοχή τους. Οι υπόλοιπες θέσεις προκύπτουν με παράλληλη μετατόπιση των παραπάνω θέσεων εγκάρσια κατά το  $\frac{1}{4}$  και το  $\frac{1}{2}$  της απόστασης των στοιχείων ώστε να εξεταστεί η εξέλιξη της επίδρασης των στοιχείων βλάστησης και εγκάρσια. Επίσης έγιναν μετρήσεις σε μια ακόμα θέση (θέση J στο μέσον δύο διαδοχικών στοιχείων κατά την εγκάρσια διεύθυνση) αλλά δεν παρουσιάζονται εδώ

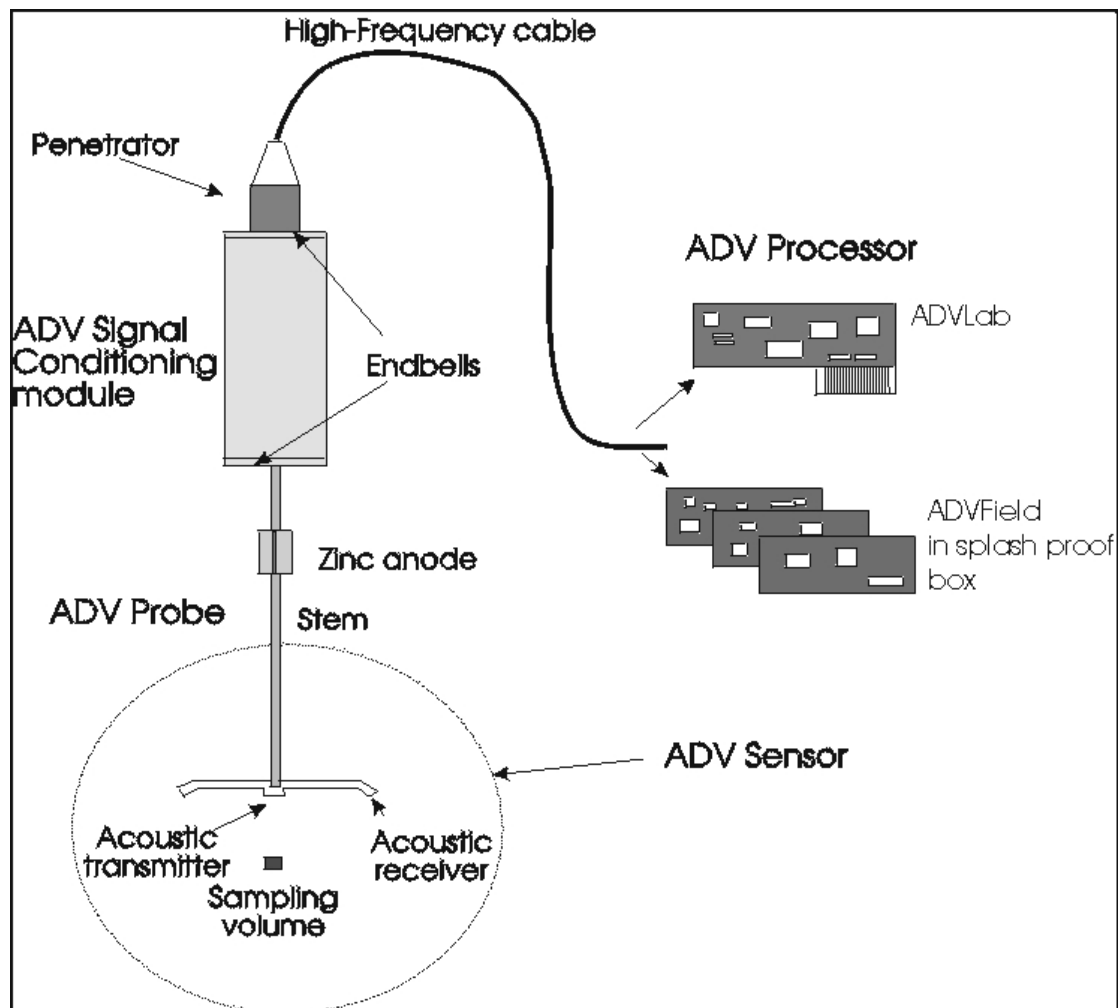


γιατί λόγω εγγύτητας τα αποτελέσματα στη θέση J σχεδόν ταυτίζονται με της θέσης I. Όλα τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση παράλληλης διάταξης της βλάστησης ενώ για την περίπτωση της κλιμακωτής προκύπτει μοναδική αλλαγή στην θέση H όπου καταργείται η θέση μέτρησης καθώς καταλαμβάνεται από στοιχείο βλάστησης. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι για τα πειράματα με τα πιο πολύπλοκα στοιχεία βλάστησης καταργήθηκαν οι θέσεις A, C διότι ήταν πρακτικά αδύνατη η μέτρηση τους λόγω της γεωμετρίας των στοιχείων που εμπόδιζε την προσέγγιση του οργάνου μέτρησης.

Από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του οργάνου που αναφέρθηκαν παραπάνω γίνονται αντιληπτοί και επιπλέον περιορισμοί με βασικότερη την αδυναμία μέτρησης της ταχύτητας σε μια ζώνη πλάτους 5cm από την ελεύθερη επιφάνεια καθώς το όργανο θα έβγαινε εκτός νερού κάτι που θα έκανε την λειτουργία του αδύνατη. Ακόμα, από τις διαστάσεις του όγκου δειγματοληψίας γίνεται επίσης εμφανές ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέτρηση κοντά στον πυθμένα αλλά σε απόσταση τουλάχιστον 0.5 cm από αυτόν. Με βάση τα παραπάνω διαμορφώθηκε η κατακόρυφη κατανομή των σημείων μέτρησης η οποία εκκινούσε από 0.5 cm απόσταση από τον πυθμένα με βήμα πυκνώσης 0.5 cm μέχρι τα 12.0 cm και 1.0 cm στο υπόλοιπο. Εδώ πρέπει να ειπωθεί ότι με βάση τους προαναφερθέντες περιορισμούς, αλλά και τα πορίσματα των προκαταρκτικών πειραμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφ. 4.3, έγινε η τελική επιλογή του βάθους ροής στην περιοχή μέτρησης στα 25.0 cm ώστε να είναι επαρκές για την πραγματοποίηση μετρήσεων σε ικανό ύψος πάνω από τη βλάστηση προκειμένου να είναι εφικτή η μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής στο στρώμα πάνω από αυτήν.



**Εικόνα 4.9.** Acoustic Doppler Velocimeter (δεξιά: Ο ακουστικός αισθητήρας που αποτελείται από έναν πομπό και τρεις δέκτες)



Εικόνα 4.10. Acoustic Doppler Velocimeter (σκαρίφημα συνόλου που συναποτελούν το ταχύμετρο ADV)

### 4.3. Προκαταρκτικά πειράματα

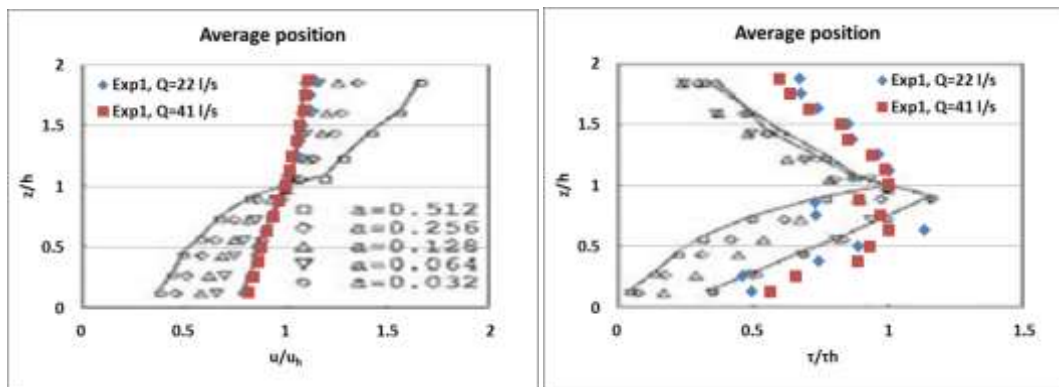
Η αρχική σύλληψη της διατριβής διαμορφώθηκε κατά την πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας του συγγραφέα (Μαυρομμάτης 2011). Σε αυτήν την εργασία έγινε η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της στάθμης του ανοιχτού αγωγού και της παροχής μέσα από πείραμα με διατάξεις που αντιστοιχούν σε διάφορες περιπτώσεις πυκνότητας βλάστησης προσομοιωμένης με απλές ράβδους αλλά και για διάφορες κλίσεις του αγωγού. Τα κύρια συμπεράσματά της είναι ότι (α) με την αύξηση της παροχής και συνεπακόλουθα του βάθους ροής, ο συντελεστής Manning  $n$  μειώνεται γιατί η βλάστηση έχει όλο και μικρότερη επίδραση στην ροή, (β) για σταθερή κλίση, αύξηση της πυκνότητας βλάστησης οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή  $n$ , (γ) για σταθερή πυκνότητα βλάστησης, αύξηση της κλίσης οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή  $n$ .

Στην παρούσα μελέτη επιδιώχθηκε να γίνει χρήση του ταχύμετρου ADV για να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση διαφόρων μορφών και κατανομής βλάστησης στο πεδίο

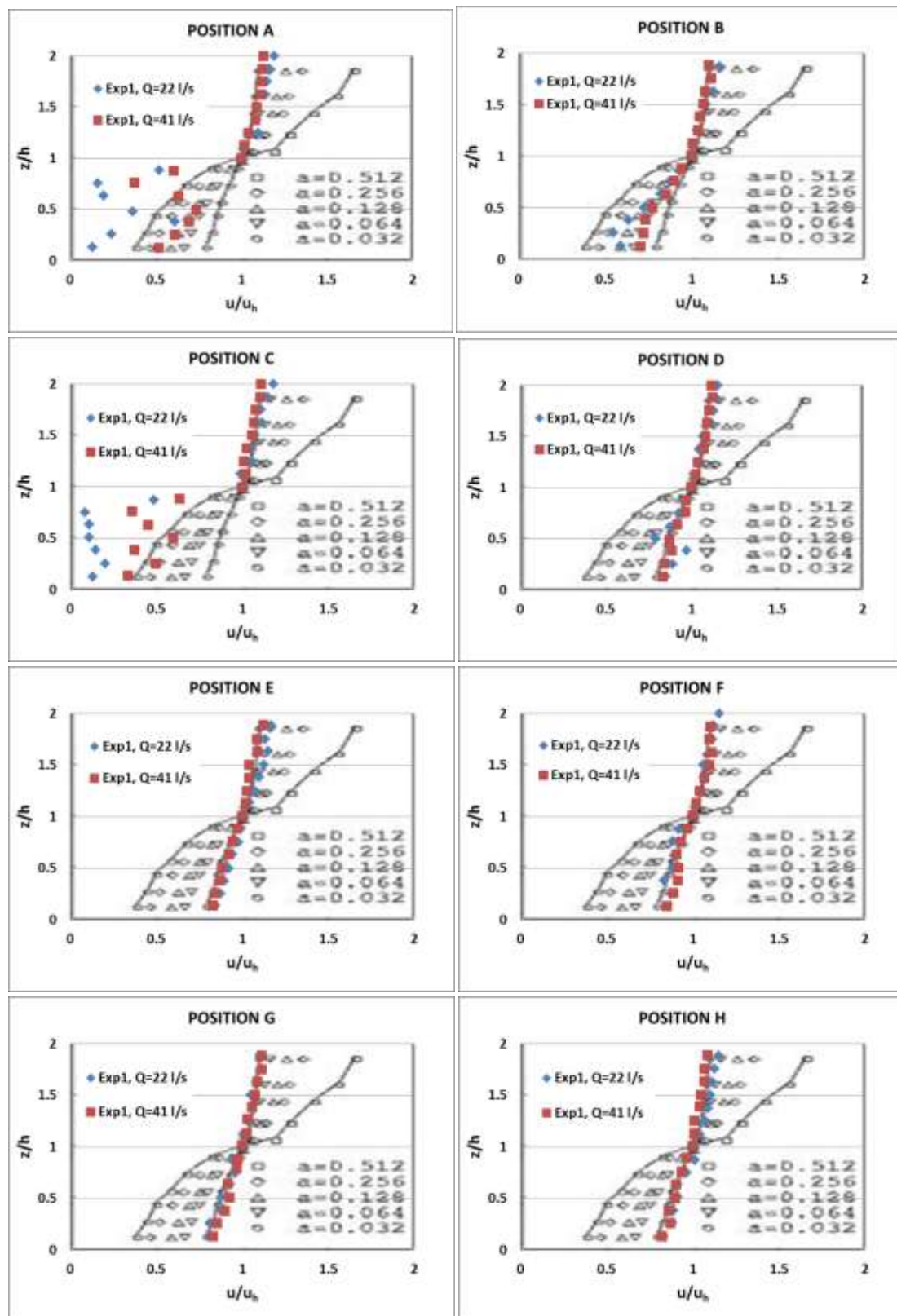
ταχυτήτων. Έτσι αρχικά προτάθηκαν ποικίλοι συνδυασμοί για διάφορες συνθήκες ροής και βλάστησης. Συγκεκριμένα σχεδιάζονταν να γίνουν πειράματα για δύο διαφορετικές τιμές παροχής, δύο διαφορετικές τιμές βάθους ροής, τριών τύπων στοιχείων βλάστησης και για τρεις διαφορετικές πυκνότητες βλάστησης. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική σειρά πειραμάτων όπου έγινε χρήση των σύνθετων στοιχείων βλάστησης που αποτελούνταν από τα σφαιρίδια σε παράλληλη διάταξη. Έτσι, οι συνθήκες ροής χαρακτηρίζονταν από 4 συνδυασμούς βάθους και παροχής. Τα δύο βάθη επιλέχθηκαν να είναι 15.4 cm και 25 cm ενώ οι παροχές ήταν 22.4 και 40.9 l/s. Τα αποτελέσματα για το μικρότερο βάθος δεν θα παρατεθούν γιατί η ροή ήταν ασταθής, δηλαδή το υπερκείμενο στρώμα ανεμπόδιστης ροής δεν είχε αρκετό πάχος ώστε να μην επηρεάζεται από τον ακίνητο ατμοσφαιρικό αέρα και η ροή να εξελίσσεται με τρόπο αναμενόμενο και ομαλό. Έτσι οι μετρήσεις δεν μπορούν να θεωρηθούν έγκυρες ενώ ο συγκεκριμένος περιορισμός επιβεβαιώθηκε από την βιβλιογραφία που παρατίθεται ακολούθως. Σε αυτήν επισημαίνεται ότι το βάθος νερού πρέπει να είναι αρκετό ώστε να αναπτύσσεται η υπερκείμενη ροή καθώς η αλληλεπίδραση με την επιφάνεια του νερού μειώνει τη δύναμη και το μέγεθος των στροβίλων σε κλίμακα της συστάδας [Nepf (2012b)]. Πιο συγκεκριμένα, οι Nepf and Vivoni (2000) έδειξαν με τα πειράματά τους ότι το βάθος διείσδυσης των στροβίλων σταθεροποιείται για σχετική βύθιση μεγαλύτερη του 2 ( $H/h > 2$ ) οπότε για βάθος  $H = 15.4$  cm και ύψος συστάδας  $h = 8$  cm η σχετική βύθιση είναι  $H/h = 1.93$ , δηλαδή οριακά δεν έχει σταθεροποιηθεί η υπερκείμενη ροή. Επίσης, οι Nepf and Vivoni (2000) αναφέρουν ότι για  $H/h > 2$  το στρώμα διάτμησης που αναπτύσσεται στην κορυφή της συστάδας τείνει να συμπεριφέρεται όπως στην περίπτωση απεριόριστης βύθισης ( $H/h \rightarrow \infty$ ).

Σε συνέχεια των προηγούμενων παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών πειραμάτων για τις δύο παροχές και βάθος 25cm, αρχικά με το Σχήμα 4.1, όπου φαίνεται το προφίλ των χωρικά μέσων τιμών των ταχυτήτων και των διατμητικών τάσεων, αδιαστατοποιημένων με τις αντίστοιχες τιμές στην κορυφή της συστάδας, με φόντο τα πειράματα των Roggi et al. (2004), όπου επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι χωρικά μέσες τιμές των μεγεθών και για αυτό το λόγο ακολουθήθηκε περίπου η ίδια διαδικασία ώστε να γίνεται καλύτερα η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Οι χωρικά μέσες τιμές προκύπτουν από την επιρροή που ασκεί κάθε θέση σε σχέση με τις υπόλοιπες με βάση το τμήμα του εμβαδού για το οποίο θεωρούνται αντιπροσωπευτικές. Τα τμήματα αυτά προκύπτουν γεωμετρικά από τον χωρισμό του συνολικού εμβαδού που περιέχει τις θέσεις μετρήσεων από ευθείες γραμμές που διέρχονται από τα μέσα των αποστάσεων τους. Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 παρατίθενται ενδεικτικά τα ίδια πειράματα για ορισμένες θέσεις ξεχωριστά ώστε να φανεί η διαφοροποίηση των ταχυτήτων από θέση σε θέση. Με το μπλε χρώμα αναφερόμαστε στα πειράματα με βάθος 25.0 cm και παροχή 22.4 l/s και με κόκκινο για παροχή 40.9 l/s. Γίνεται εμφανές ότι οι διαφορές μεταξύ των δυο παροχών είναι ελάχιστες έως αμελητέες και είναι παρατηρήσιμες μόνο σχετικά κοντά στα στοιχεία βλάστησης. Παραπλήσιες παρατηρήσεις μπορούν να επισημανθούν για

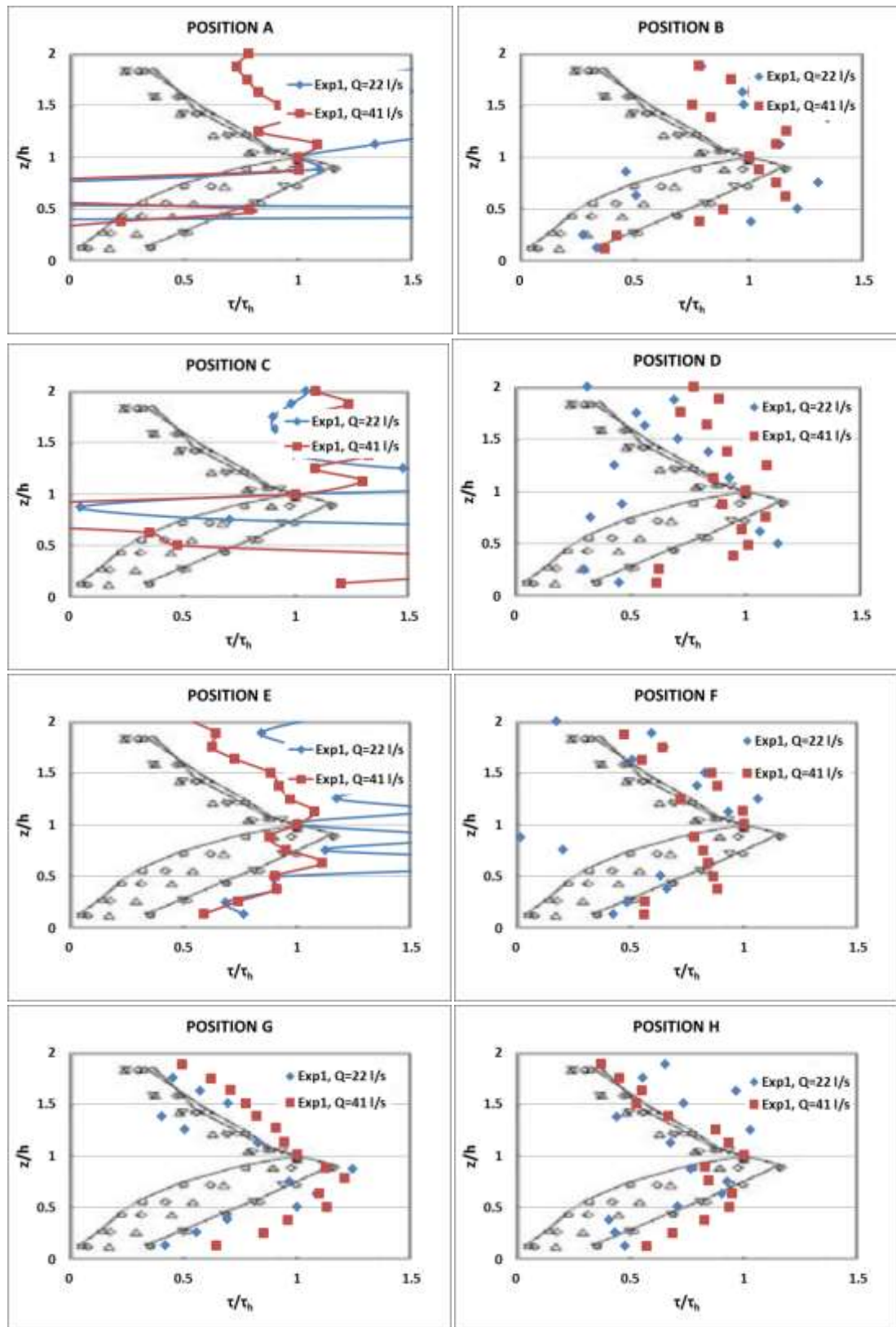
τις διατμητικές τάσεις. Έτσι πάρθηκε η απόφαση να διατηρηθεί μόνο ένα καθεστώς ροής (παροχή, βάθος) ώστε να απλοποιηθούν και να επιταχυνθούν οι πειραματικές διαδικασίες. Διαπιστώνεται ότι υπάρχει εξαιρετική συσχέτιση, σχεδόν ταύτιση, με τα αποτελέσματα των Roggi et al. (2004) για τις πιο αραιές διατάξεις τους, δηλαδή για μικρούς αριθμούς  $\alpha$  (Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3). Ο αριθμός  $\alpha$  (frontal area index) είναι ο δείκτης της μετωπικής επιφάνειας και προκύπτει ως ο λόγος της επιφάνειας της προβολής του στοιχείου βλάστησης στο μέτωπο της ροής προς την μονάδα εδαφικής επιφάνειας που αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο. Στα προαναφερόμενα προκαταρκτικά πειράματα ο αριθμός  $\alpha$  είναι περίπου 0.111.



**Σχήμα 4.1.** Συγκριτικά διαγράμματα μέσω χωρικών και χρονικών τιμών ( $\alpha$ ) της ταχύτητας και ( $\beta$ ) των διατμητικών τάσεων με φόντο τα δεδομένα Roggi et al. (2004)



**Σχήμα 4.2.** Συγκριτικά διαγράμματα μέσω χρονικών τιμών της ταχύτητας σε κάθε θέση (A- H) με φόντο τα δεδομένα Poggi et al. (2004)



**Σχήμα 4.3.** Συγκριτικά διαγράμματα μέσω χρονικών τιμών των διαμηθικών τάσεων σε κάθε θέση (A- H) με φόντο τα δεδομένα Roggi et al. (2004)

## 5) Αποτελέσματα

Ύστερα από τα προκαταρκτικά πειράματα που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, διαμορφώθηκαν οι τελικές σειρές των πειραμάτων, οι βασικές παράμετροι των οποίων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1. Κάθε πείραμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συνθήκες ροής και βλάστησης. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα τα υδραυλικά μεγέθη ήταν σταθερά σε όλα τα πειράματα ( $Q=41$  l/s,  $H=25$  cm), όμως τα χαρακτηριστικά της βλάστησης είχαν σημαντικές διαφορές στη μορφή, στη διάταξη και πυκνότητα τοποθέτησης των στοιχείων (αριθμός ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα), στο ύψος του στοιχείου βλάστησης ( $h$ ) και στην μετωπική πυκνότητα της βλάστησης ( $\lambda$ ), δηλαδή τον λόγο της επιφάνειας που προκύπτει από την προβολή της σε ένα επίπεδο κάθετο στον πυθμένα προς την επιφάνεια πυθμένα που καταλαμβάνουν τα αντίστοιχα στοιχεία στην κάτοψη. Στον πίνακα παρουσιάζεται επίσης η σχετική βύθιση ( $H/h$ ) που είναι ο λόγος του βάθους ροής προς το ύψος της βλάστησης, και όπως φαίνεται είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος του 2. Έτσι το πείραμα 1 (ή Expr1) αντιστοιχεί σε βλάστηση πυκνότητας  $100$  stems/m<sup>2</sup> με παράλληλο μοτίβο για απλές ράβδους ύψους 4 cm με μετωπική επιφάνεια  $\lambda=0.02$  και σχετική βύθιση 6.25, ενώ στο πείραμα 2 (ή Expr2) αλλάζει η πυκνότητα που γίνεται  $200$  stems/m<sup>2</sup> και το μοτίβο κλιμακωτό με συνεπακόλουθη αλλαγή στην μετωπική επιφάνεια  $\lambda$ , τα υπόλοιπα μεγέθη είναι ίδια με το πείραμα 1. Στα Expr3 και Expr4 η βλάστηση αποτελείται από ράβδους με φύλλωμα από βελόνες, ενώ στα Expr5 και Expr6 από ράβδους με προσαρμοσμένες σφαίρες (βλ. Εικόνα 4.2). Το Expr0 αναφέρεται στην πειραματική σειρά χωρίς βλάστηση που πραγματοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης. Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται αναλυτικά και διαγραμματικά όλα τα μεγέθη της ροής που μετρήθηκαν στα πειράματα του Πίνακα 5.1.

**Πίνακα 5.1.** Χαρακτηριστικά πειραμάτων

| Πείραμα | Διατάξη βλάστησης | Τύπος βλάστησης        | Πυκνότητα στοιχείων (stems/m <sup>2</sup> ) | Ύψος στοιχείου h (cm) | Μετωπική πυκνότητα $\lambda$ | Σχετική βύθιση H/h |
|---------|-------------------|------------------------|---|-----------------------|------------------------------|--------------------|
| Expr0   | χωρίς βλάστηση    |                        |   |                       |                              |                    |
| Expr1   | παράλληλη         | απλός άκαμπτος         | 100   | 4                     | 0.020                        | 6.250              |
| Expr2   | κλιμακωτή         | απλός άκαμπτος         | 200   | 4                     | 0.040                        | 6.250              |
| Expr3   | παράλληλη         | σύνθετος ημι-εύκαμπτος | 100   | 7                     | 0.071                        | 3.571              |
| Expr4   | κλιμακωτή         | σύνθετος ημι-εύκαμπτος | 200   | 7                     | 0.142                        | 3.571              |
| Expr5   | παράλληλη         | σύνθετος άκαμπτος      | 100   | 8                     | 0.111                        | 3.125              |
| Expr6   | κλιμακωτή         | σύνθετος άκαμπτος      | 200   | 8                     | 0.222                        | 3.125              |

### 5.1. Προφίλ ταχύτητας

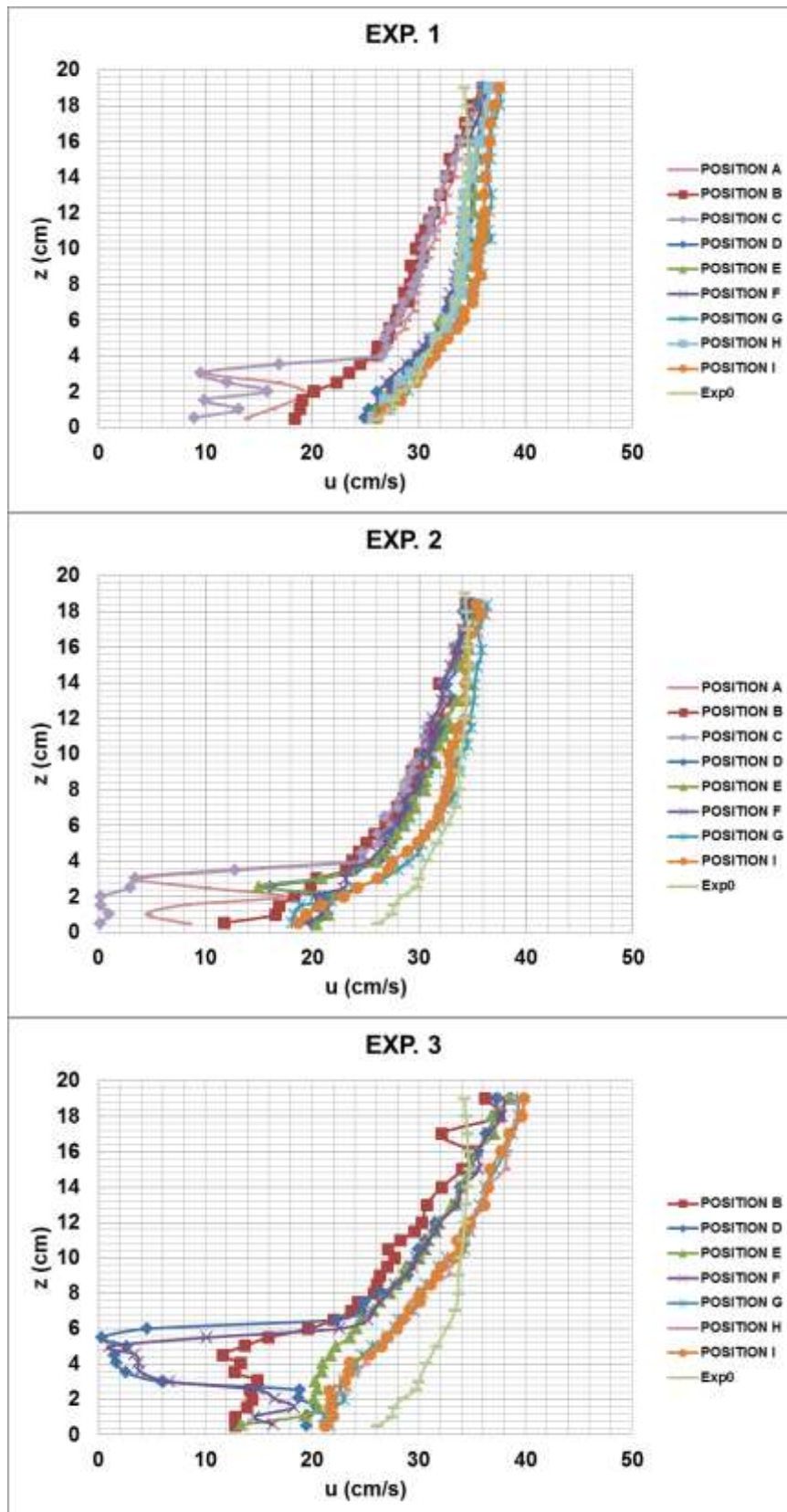
Κατακόρυφα προφίλ των (χρονικά μέσων) ταχυτήτων  $u$  κατά την κύρια διεύθυνση της ροής σε όλες τις θέσεις μέτρησης (A, B, C, D, E, F, G, H, I) για κάθε πείραμα φαίνονται στο Σχήμα 5.1 ενώ στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των κατανομών για όλα τα πειράματα ανά θέση. Φαίνεται ότι



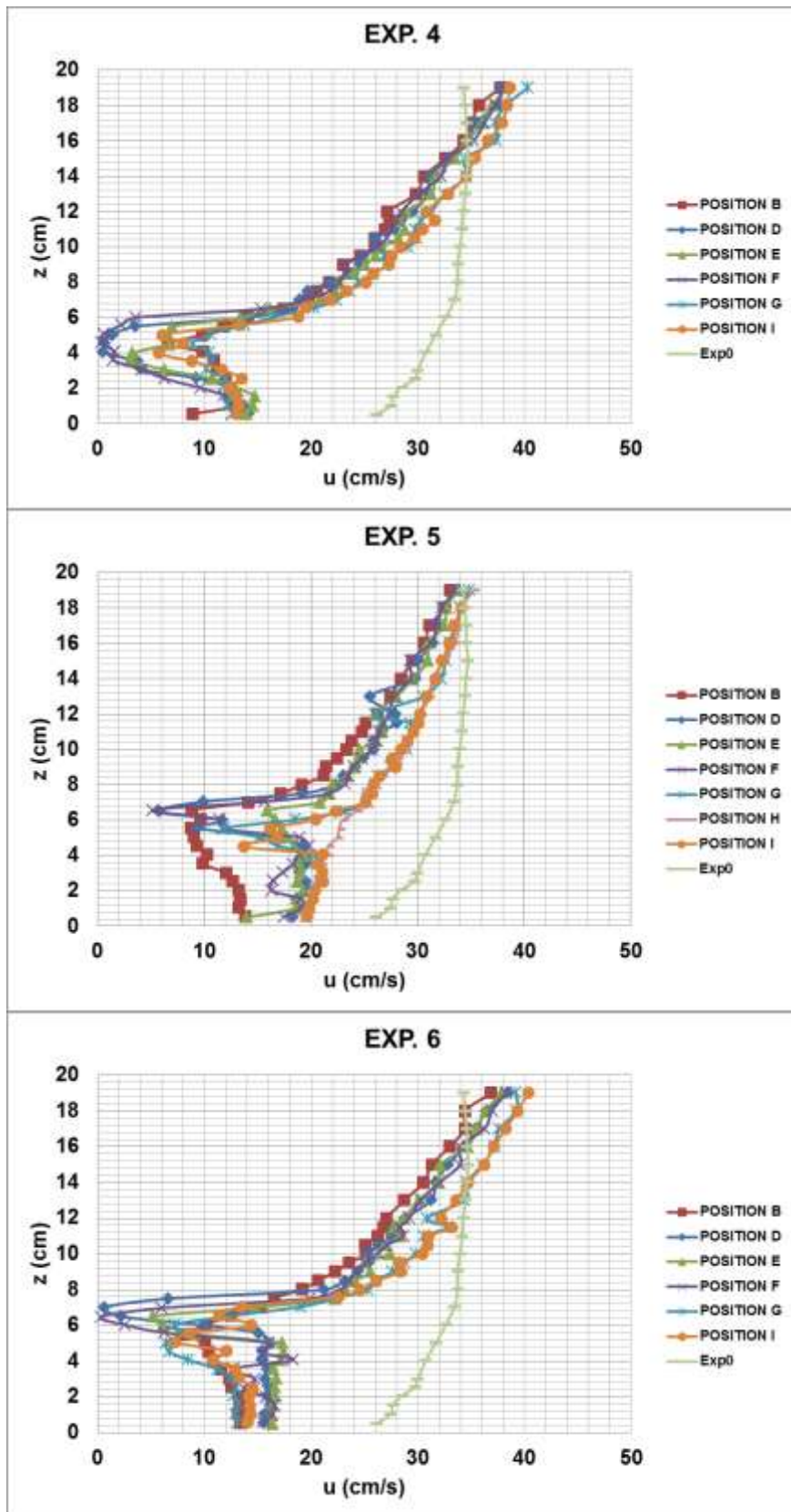
εμφανίζεται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μια σημαντική μείωση της ταχύτητας (σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση, Expr0) και εκτείνεται αρκετά πάνω από την κορυφή των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, στην παράλληλη διάταξη απλών ράβδων (Πείραμα 1) παρατηρείται σημαντική μείωση της ταχύτητας κοντά στα στοιχεία (θέσεις A, C) και δευτερευόντως στη θέση B και ιδιαίτερα μέχρι το ύψος αυτών (4 cm), ενώ στις θέσεις D, E, F, δηλαδή εκτός της ευθυγράμμισης των στοιχείων δεν φαίνεται αισθητή διαφοροποίηση από το Πείραμα 0 (χωρίς βλάστηση). Αντίθετα στις θέσεις G, H, I παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση δείχνοντας την τάση της ροής να αντισταθμίσει την απώλεια ταχύτητας στις θέσεις κοντά στην ευθυγράμμιση των στοιχείων. Στην κλιμακωτή διάταξη απλών ράβδων (Expr2), όπου η πυκνότητα είναι διπλάσια, η μείωση της ταχύτητας στις θέσεις A,C,B είναι μεγαλύτερη, αλλά επηρεάζονται επίσης σε μικρότερο βαθμό και οι άλλες θέσεις. Ωστόσο, στη θέση B (δηλαδή μεταξύ των στοιχείων κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής) η μείωση της ταχύτητας παρατηρείται ότι είναι παρόμοια και για τα δύο μοτίβα/πυκνότητες απλών ράβδων (Expr 1 και Expr 2). Η μείωση της ταχύτητας είναι σαφώς πιο έντονη στις περιπτώσεις των σύνθετων στοιχείων. Οι ελάχιστες ταχύτητες παρατηρούνται στο επίπεδο του ανώτερου (πιο ογκώδους) μέρους των στοιχείων και τείνουν στο μηδέν για τους σύνθετους τύπους στοιχείων και αμφότερες τις πυκνότητες στις θέσεις D και F. Η μείωση της ταχύτητας είναι μικρότερη στη θέση B σε σύγκριση με τις άλλες θέσεις. Παρατηρείται επίσης ότι στο B τα τέσσερα προφίλ για τα σύνθετα στοιχεία είναι αρκετά παρόμοια, ανεξάρτητα από το μοτίβο, την πυκνότητα και τον τύπο του στοιχείου. Στη θέση E υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της κλιμακωτής και της παράλληλης διάταξης, με την πρώτη να οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας. Γενικά, οι ελάχιστες ταχύτητες εμφανίζονται κάπως υψηλότερα στα πειράματα με το άκαμπτο φύλλωμα (περίπου στο επίπεδο του κέντρου της σφαίρας), ενώ στα πειράματα με τα ημιάκαμπτα στοιχεία βρίσκονται περίπου στη βάση του εύκαμπτου φυλλώματος.

Για παράδειγμα στο πείραμα 5, παρατηρείται μια πολύ έντονη μείωση της ταχύτητας στις περισσότερες θέσεις εντός της βλάστησης. Συγκεκριμένα, καθώς κινούμαστε κατά μήκος του άξονα του καναλιού, φαίνεται έντονη επίδραση της βλάστησης στο σημείο B, δηλαδή στο μέσο σημείο μεταξύ των στοιχείων στην κατεύθυνση ροής, όπου η μείωση της ταχύτητας εκτείνεται πολύ κάτω από το σφαιρικό τμήμα του στοιχείου. Σημαντική μείωση ταχύτητας παρατηρείται επίσης στο σημείο E, αλλά πιο περιορισμένη κατακόρυφα, περίπου στο επίπεδο της σφαίρας. Η μικρότερη απόκλιση από το προφίλ ταχύτητας χωρίς βλάστηση εμφανίζεται στο σημείο H (κέντρο του κελιού 10x10). Όσον αφορά στη μέση απόσταση μεταξύ των στοιχείων εγκαρσίως, παρατηρείται σχεδόν το ίδιο προφίλ ταχύτητας στα G και I, με απότομη μείωση της ταχύτητας στο επίπεδο του πυθμένα της σφαίρας. Είναι αξιοσημείωτο ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μείωση της παρατηρούμενης ταχύτητας μέσα στη διάταξη της βλάστησης φαίνεται να αντισταθμίζεται στην περιοχή πάνω από τα στοιχεία.

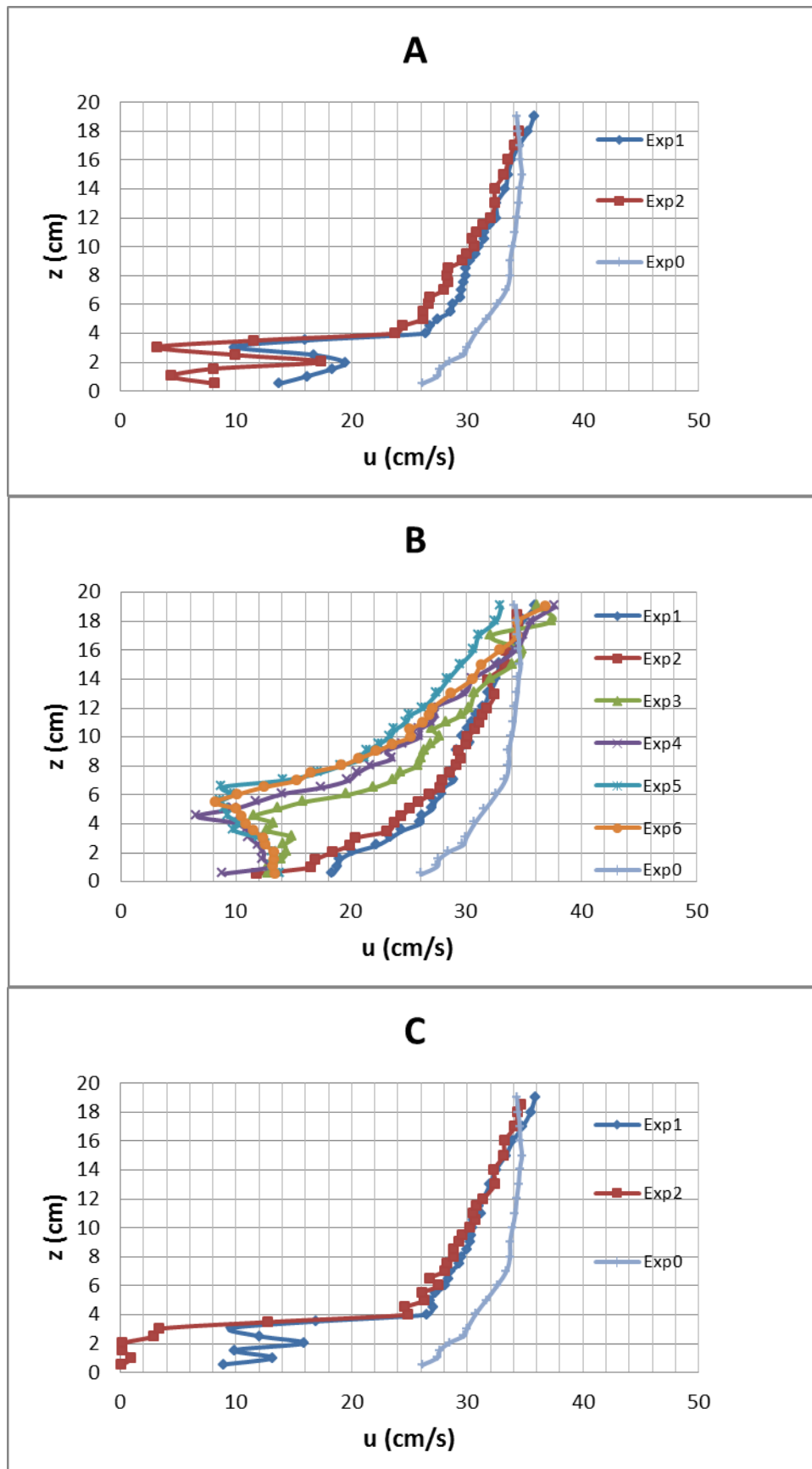




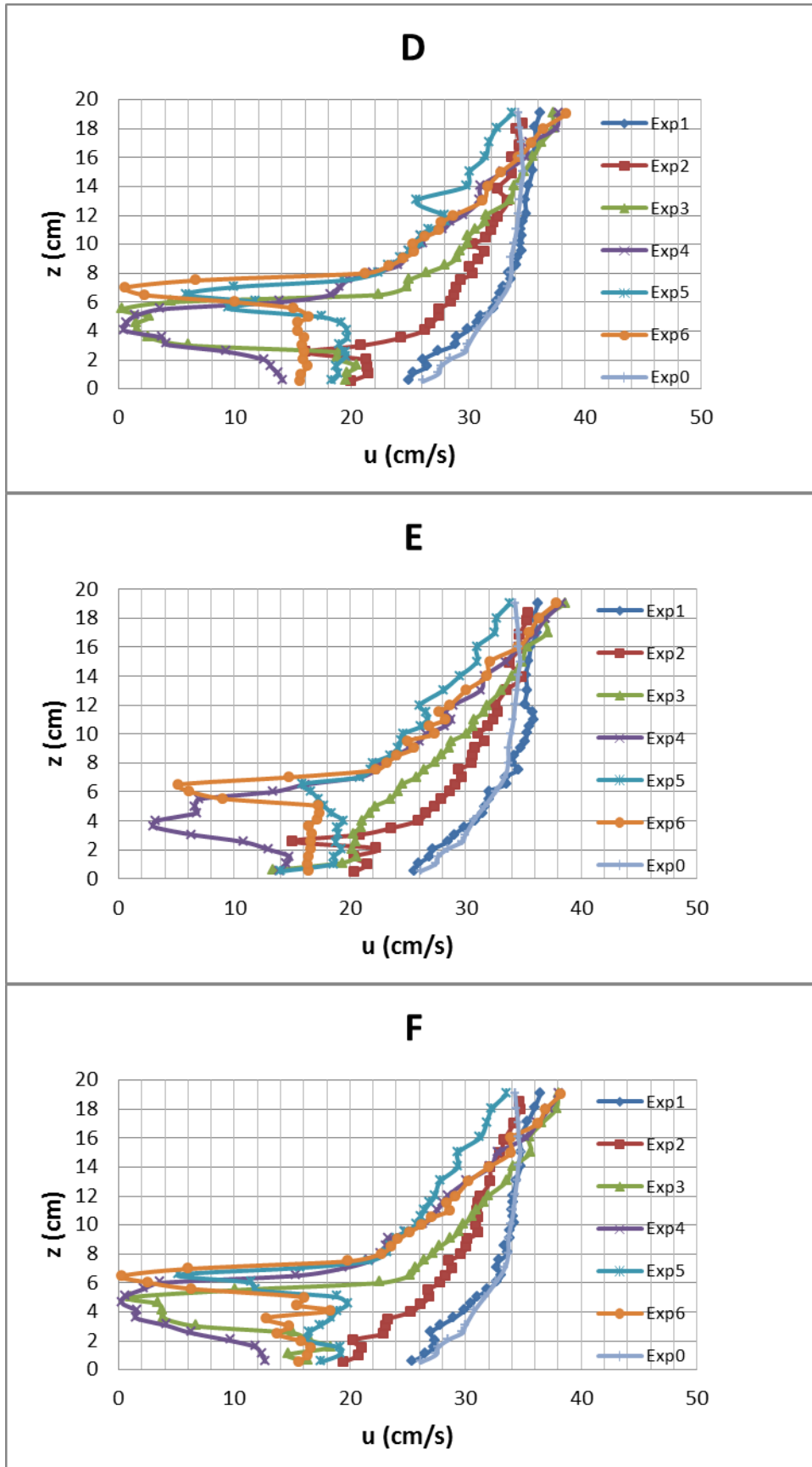
Σχήμα 5.1α. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα



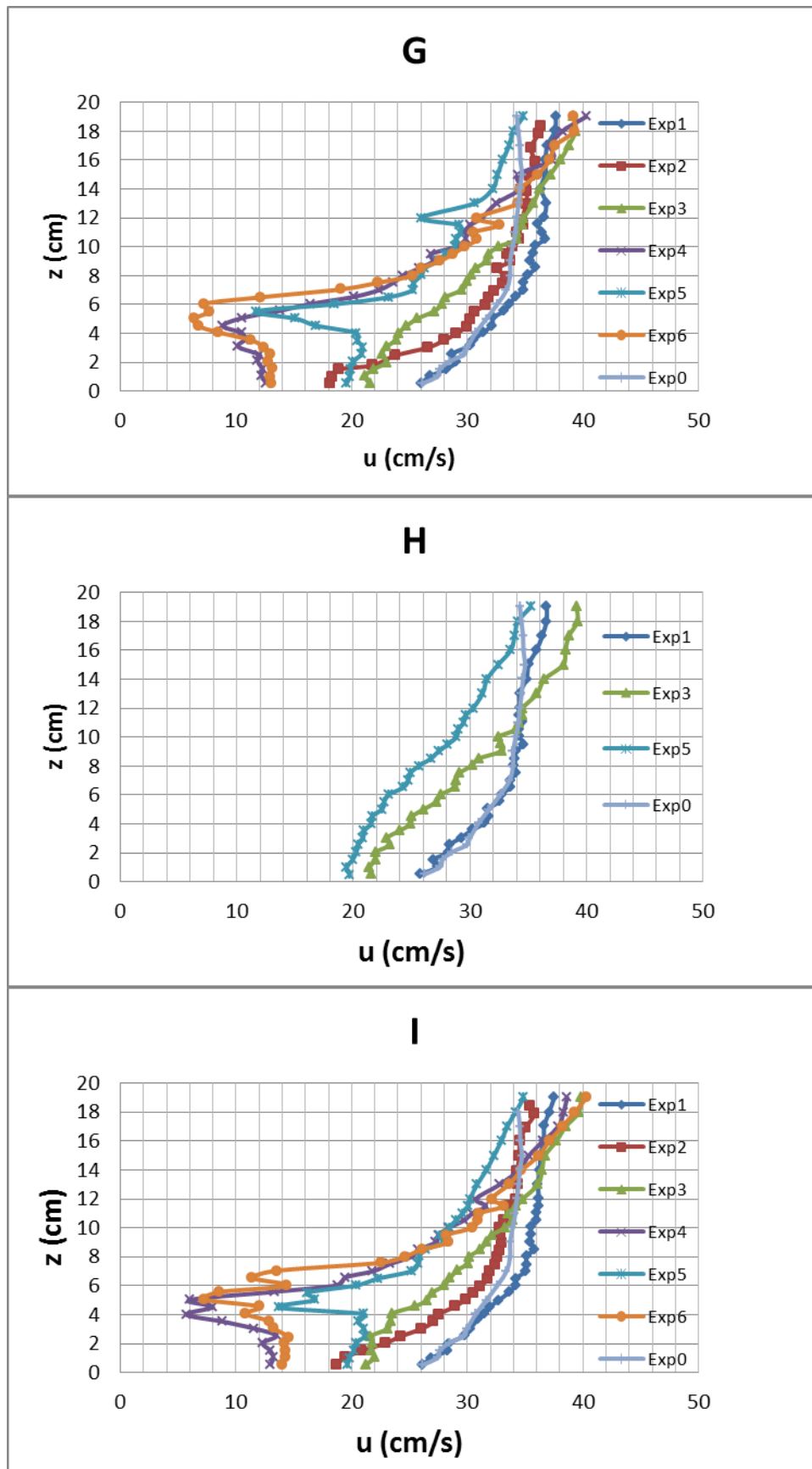
Σχήμα 5.1β. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα



Σχήμα 5.2α. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση

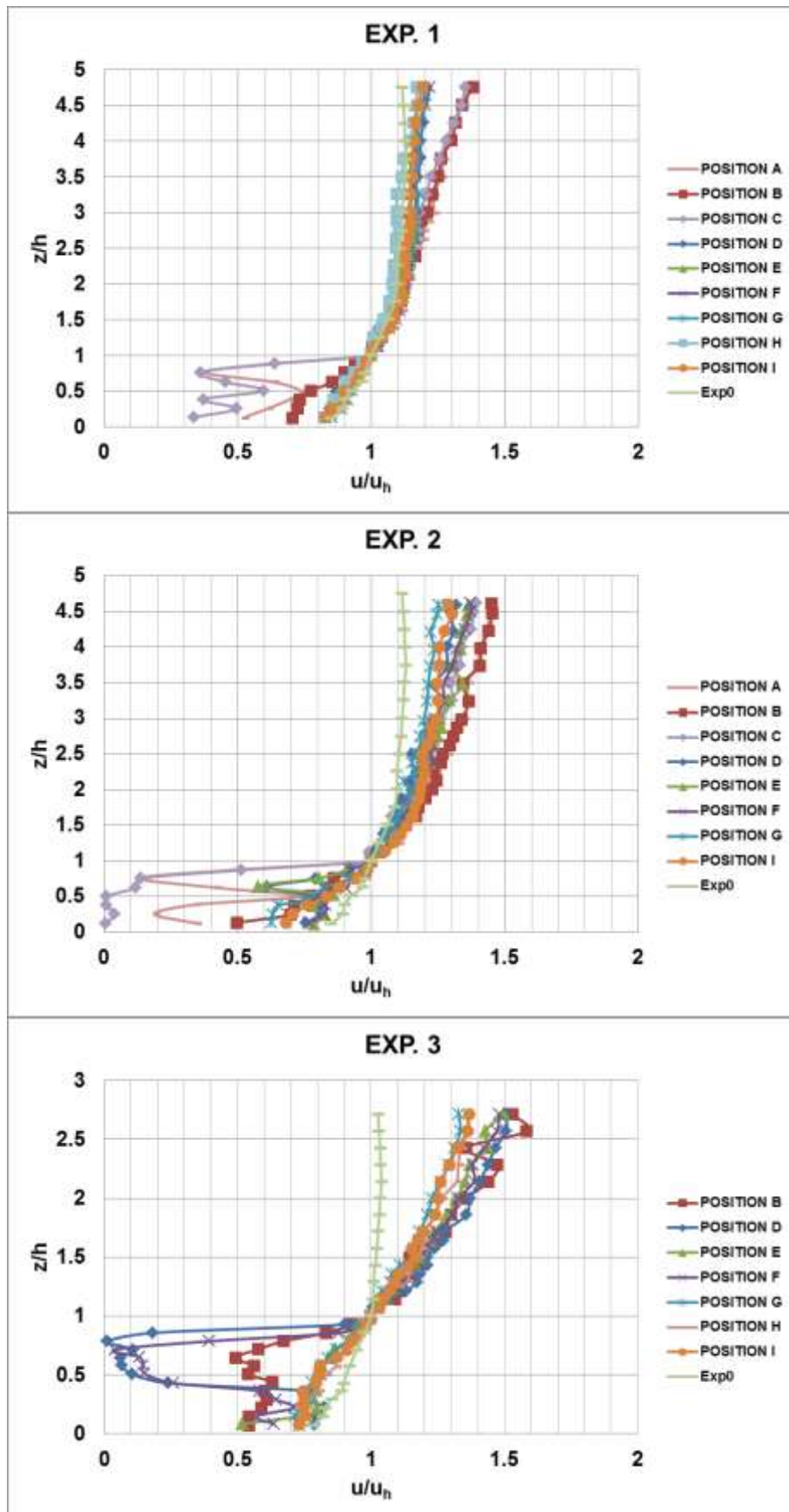


Σχήμα 5.2β. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση



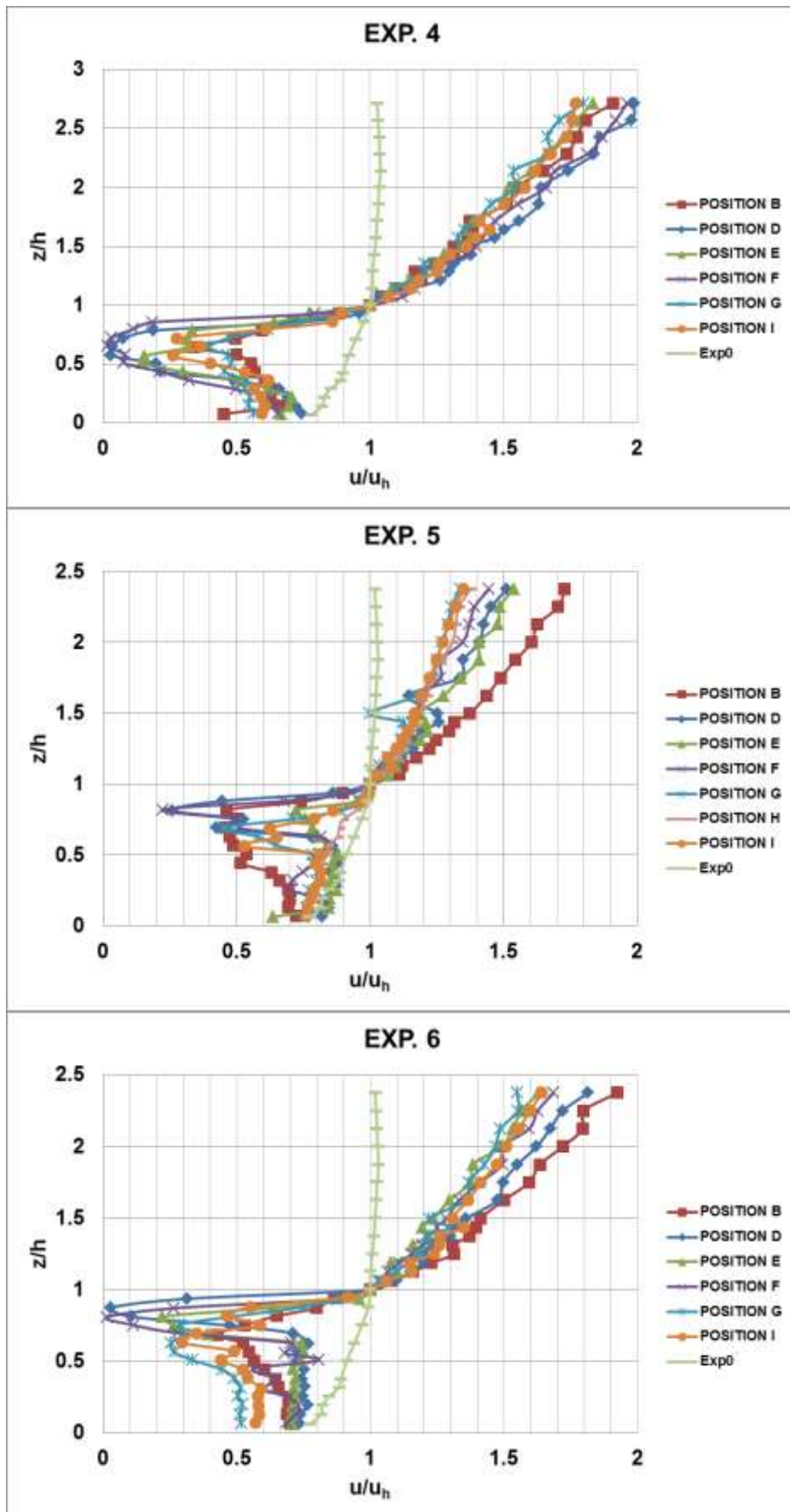
Σχήμα 5.2γ. Κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση

Τα αδιάστατα προφίλ ταχύτητας παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3, απεικονίζοντας για κάθε πείραμα τις διαφορές μεταξύ των τοποθεσιών μέτρησης και στο Σχήμα 5.4 συγκρίνονται όλα τα πειράματα σε κάθε θέση. Η κατακόρυφη θέση αδιαστατοποιείται με το ύψος του στοιχείου  $h$  (το οποίο είναι διαφορετικό στους τρεις τύπους στοιχείων), ενώ οι ταχύτητες αδιαστατοποιούνται με την αντίστοιχη τιμή ταχύτητας στην κορυφή του στοιχείου. Γενικά, πάνω από τα στοιχεία, οι διαφορές μεταξύ των τοποθεσιών είναι μικρές. Παρατηρείται έντονη μείωση της ταχύτητας κάτω από την κορυφή του στοιχείου, ενώ πάνω από αυτήν η αύξηση είναι ομαλή και τείνει να αναπληρώσει το εντός της συστάδας έλλειμμα. Μέσα στη συστοιχία, για τα πειράματα με απλές ράβδους (Exp 1 και 2), οι ελάχιστες ταχύτητες παρατηρούνται στις θέσεις A και C που είναι πολύ κοντά στο στοιχείο (μπροστά ή πίσω) και είναι μικρότερες στο κλιμακωτό (πιο πυκνό) μοτίβο. Αυτές οι θέσεις ήταν απρόσιτες στα άλλα πειράματα. Εξαιρουμένων αυτών των θέσεων, οι ταχύτητες στα πειράματα με απλές ράβδους μειώνονται βαθμιαία εντός της βλάστησης. Αντίθετα, στα υπόλοιπα πειράματα με τα σύνθετα στοιχεία οι κατανομές μέσα στη βλάστηση έχουν ως επί των πλείστον έντονη ανομοιομορφία, με ελάχιστες τιμές στο ύψος του πιο ογκώδους τμήματος (φύλλωμα). Οι απολύτως ελάχιστες ταχύτητες εμφανίζονται στις θέσεις D και F και τείνουν προς το μηδέν στα Exp3, 4 και 6. Παρατηρείται ακόμη ότι στο Exp3 (παράλληλο/λιγότερο πυκνό μοτίβο με ημιεύκαμπτο σύνθετο στοιχείο) υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των θέσεων στα προφίλ κάτω από την κορυφή του στοιχείου, οι οποίες είναι μικρότερες για το άκαμπτο σύνθετο στοιχείο στο ίδιο μοτίβο (Exp 5). Αντίθετα, οι αδιαστατοποιημένες κατανομές στις ίδιες θέσεις για τα κλιμακωτά μοτίβα των σύνθετων τύπων στοιχείων (Exp4 και Exp6) είναι αρκετά παρόμοιες, περισσότερο από ότι για τις παράλληλες. Γενικά φαίνεται ότι όσο πιο απομακρυσμένη από το εμπόδιο είναι η θέση τόσο πιο ομαλό είναι το προφίλ της ταχύτητας. Όμως είναι σαφής η διαφοροποίηση της κατανομής από θέση σε θέση, επομένως η χρήση μέσης χωρικά κατανομής δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική.



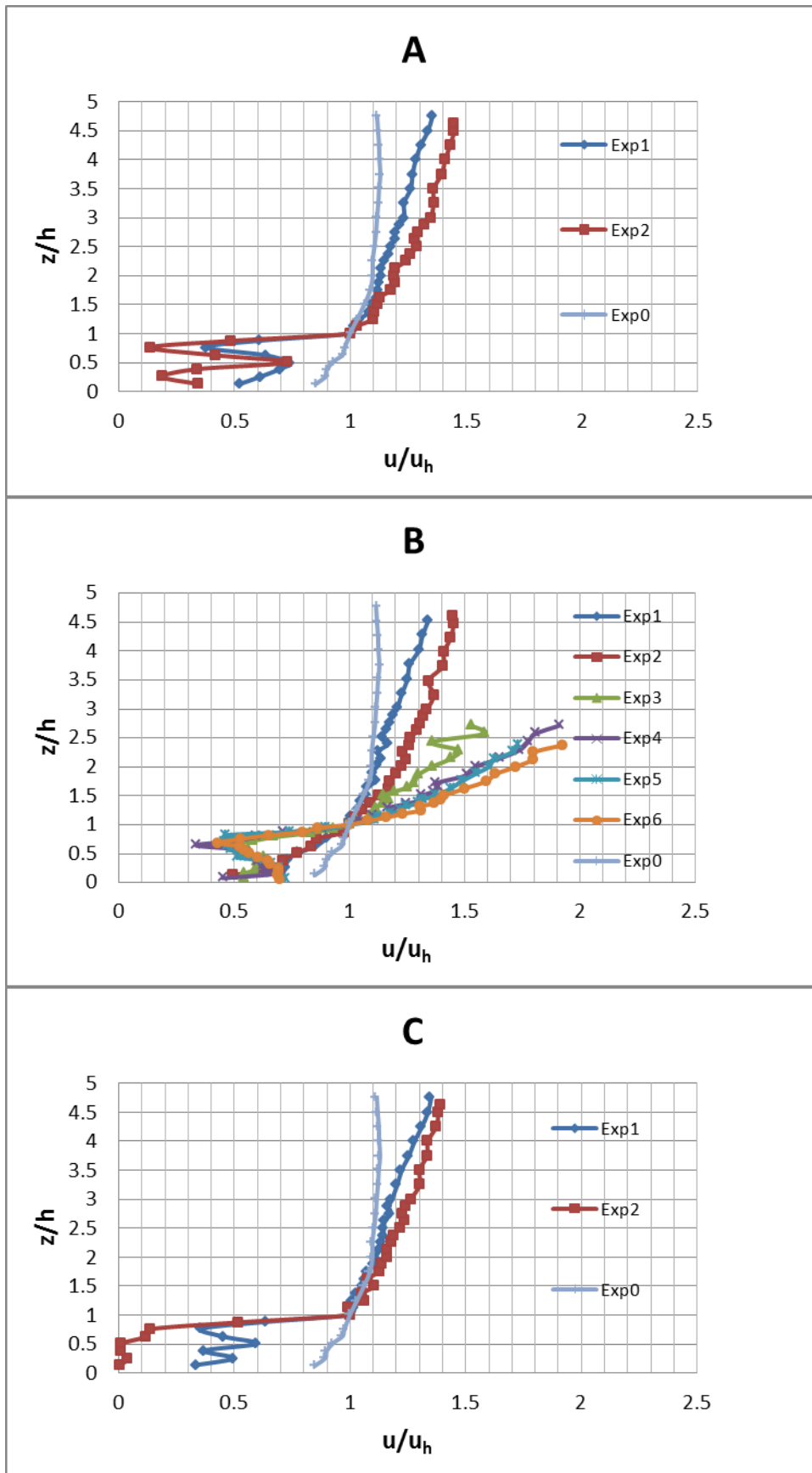
Σχήμα 5.3α. Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα



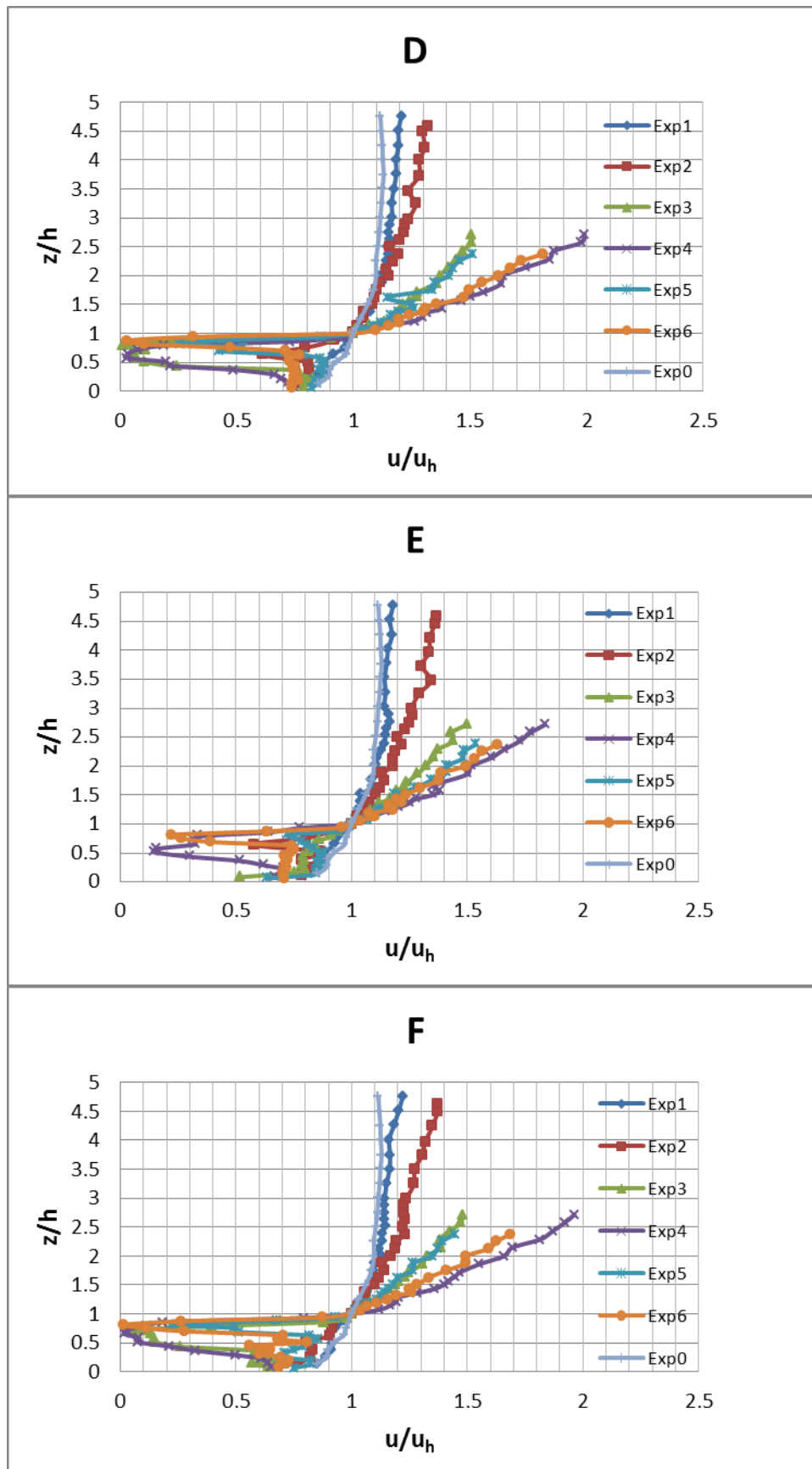


Σχήμα 5.3β. Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα

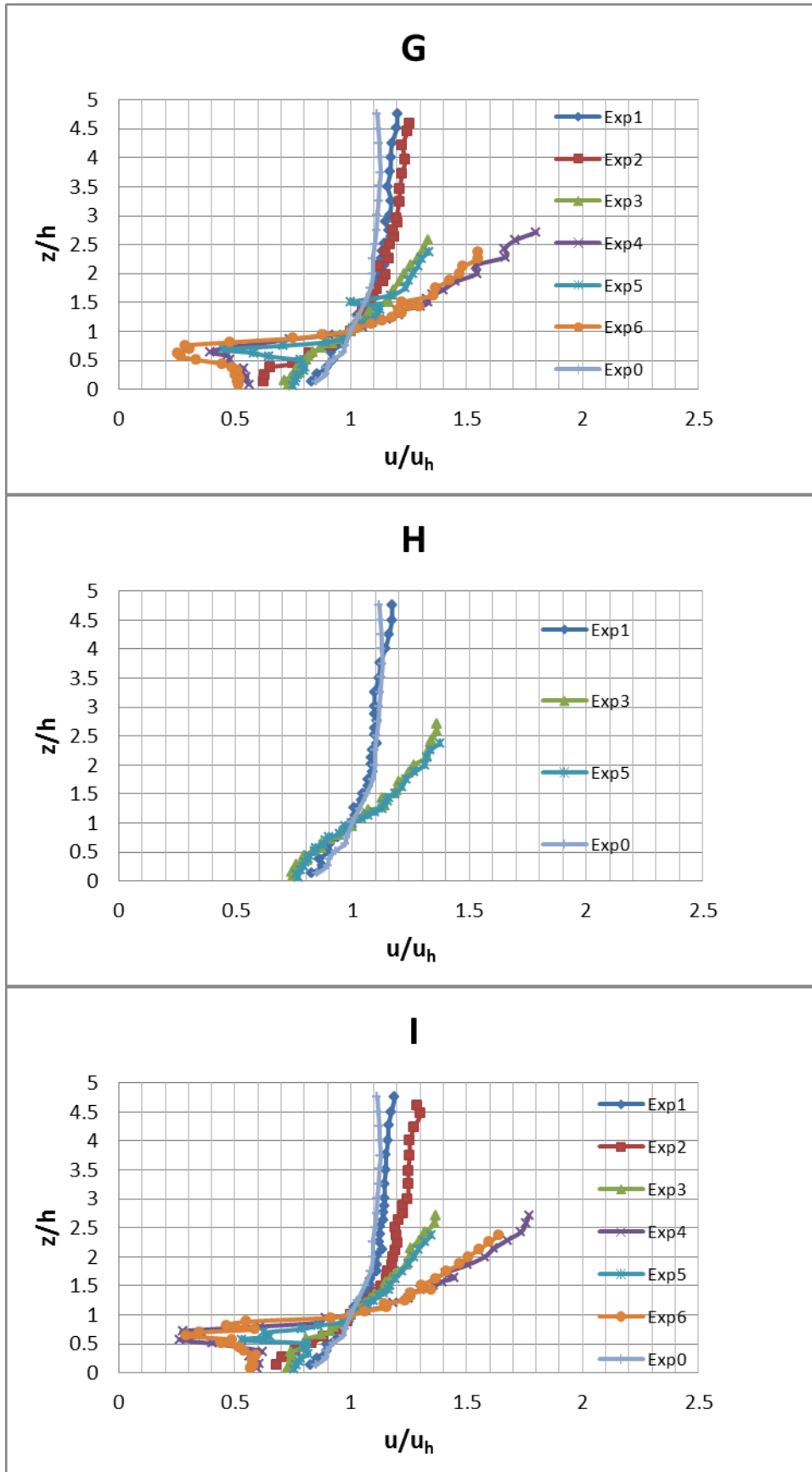




Σχήμα 5.4α. Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση



Σχήμα 5.4β. Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση

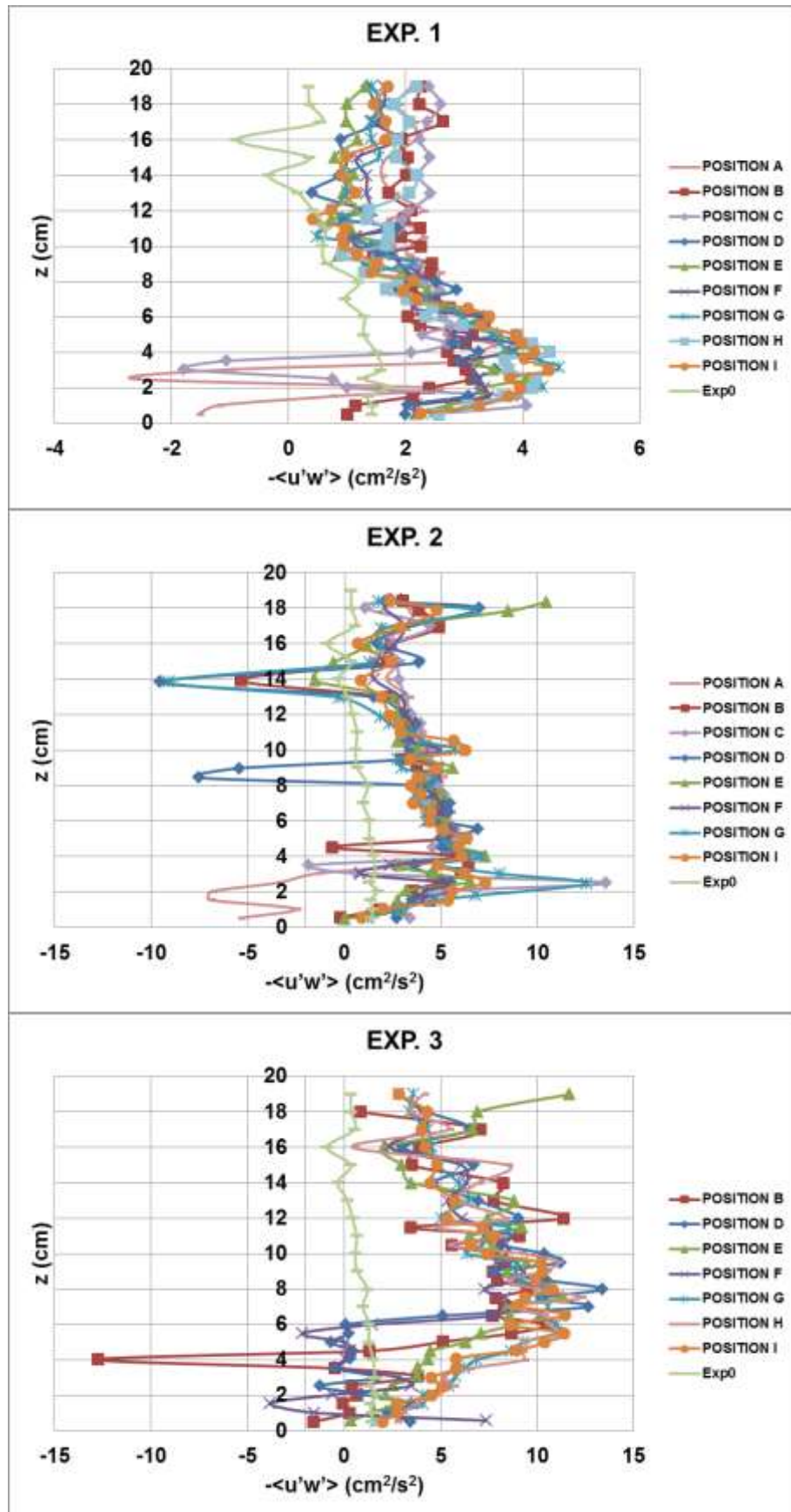


Σχήμα 5.4γ. Αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση

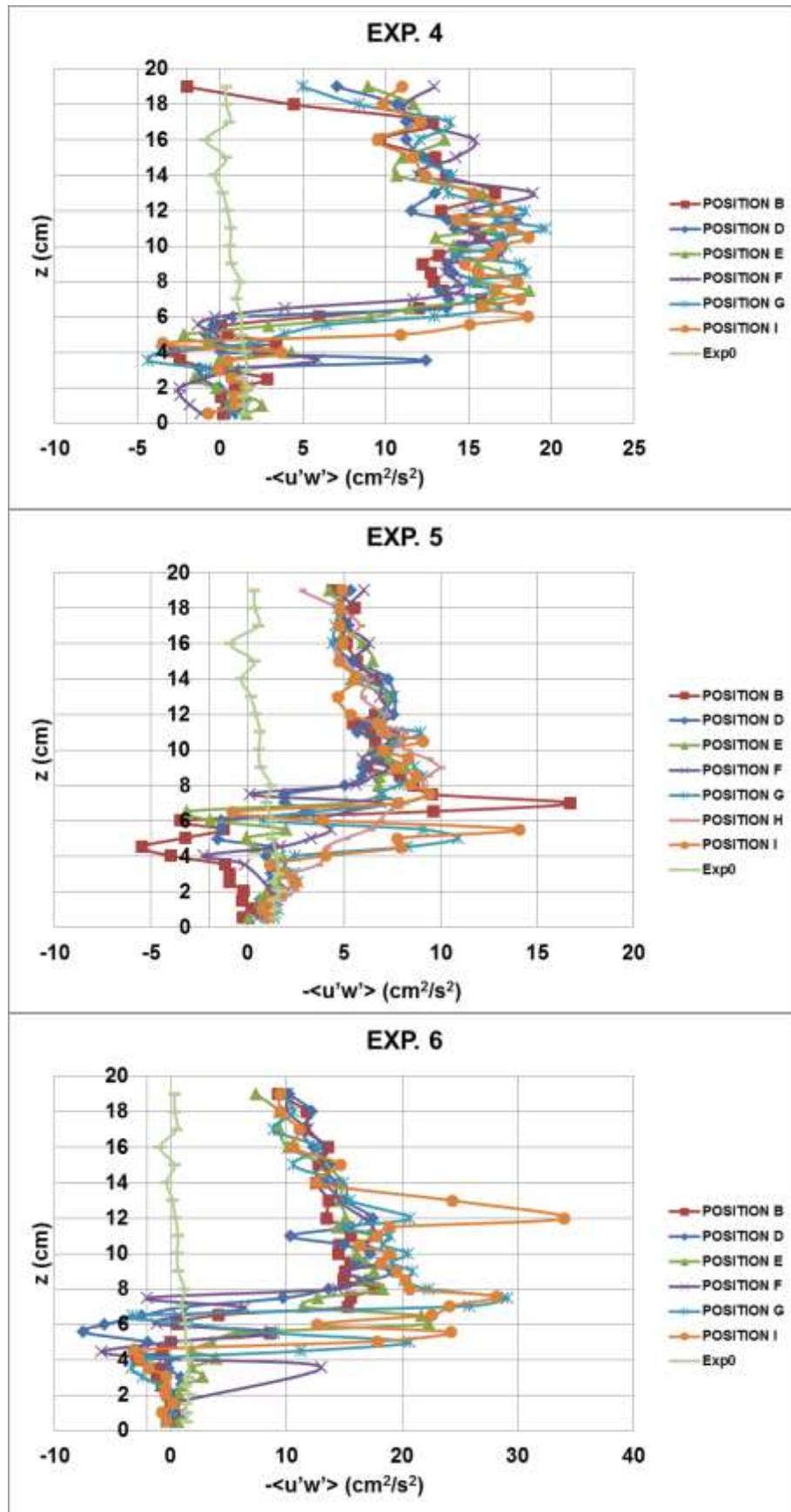
## 5.2. Διατμητικές τάσεις

Οι κατανομές των τυρβωδών διατμητικών τάσεων, εκφρασμένες ως  $\tau_{xz}/\rho = -\langle u'w' \rangle$  ( $\tau_{xz}/\rho = -\overline{u'w'}$ ) παρουσιάζονται στα σχήματα 5.5 (για κάθε πείραμα) και 5.6 (για κάθε θέση). Παρατηρούνται πολύ υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση, αυξάνοντας γενικά προς τα πάνω αλλά έχοντας και μια σταθεροποιητική τάση στο πολύ ανώτερο τμήμα της ροής. Ιδιαίτερης προσοχής είναι η εξαιρετικά ανομοιόμορφη κατανομή που εμφανίζεται στις περισσότερες θέσεις μέτρησης εντός της συστοιχίας βλάστησης, υποδηλώνοντας την ανάπτυξη έντονων στρωμάτων διάτμησης. Ωστόσο, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές, στις κατανομές διατμητικών τάσεων μεταξύ των θέσεων μέτρησης σε κάθε πείραμα. Παρατηρείται έντονη διακύμανση μέσα έως και πάνω από την κορυφή της συστάδας, η οποία εξομαλύνεται στην πιο απομακρυσμένη θέση Η. Αξιοσημείωτη είναι η αλλαγή πρόσημου λίγο κάτω από την κορυφή της συστάδας στα Πειράματα 5 και 6 όπως και στους Dunn et al (1996). Η επίδραση των στοιχείων της βλάστησης φαίνεται να εκτείνεται και αρκετά πάνω από την κορυφή της συστάδας, και μάλιστα στα πειράματα με τα σύνθετα στοιχεία παρατηρείται ότι οι τάσεις είναι υψηλότερες πάνω από την κορυφή της συστοιχίας σε σύγκριση με τις τιμές εντός αυτής. Παρόμοιο εύρημα έχει αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες, τόσο πειραματικές (π.χ. Dunn et al. 1996; Fairbanks 1998) όσο και υπολογιστικές (π.χ. Souliotis and Prinos 2008). Προφανώς, η διαταραχή που δημιουργείται λόγω της ασυνέχειας στην κορυφή της συστοιχίας κάνει σε κάποιο βαθμό απόσβεση εντός της συστοιχίας βλάστησης αλλά παραμένει υψηλή στο ανώτερο στρώμα χωρίς βλάστηση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι λιγότερο έντονο στα πειράματα με απλούς μίσχους (Exp 1 και 2). Εξάλλου, σε αυτά τα πειράματα οι τάσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με εκείνες με τα σύνθετα στοιχεία. Παρατηρείται επίσης ότι οι τιμές διατμητικής τάσης για τα κλιμακωτά (πιο πυκνά) μοτίβα και για τους δύο τύπους σύνθετων στοιχείων είναι περίπου διπλάσιες από εκείνες των παράλληλων μοτίβων πάνω από την κορυφή της συστοιχίας, ενώ δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά εντός της συστοιχίας.

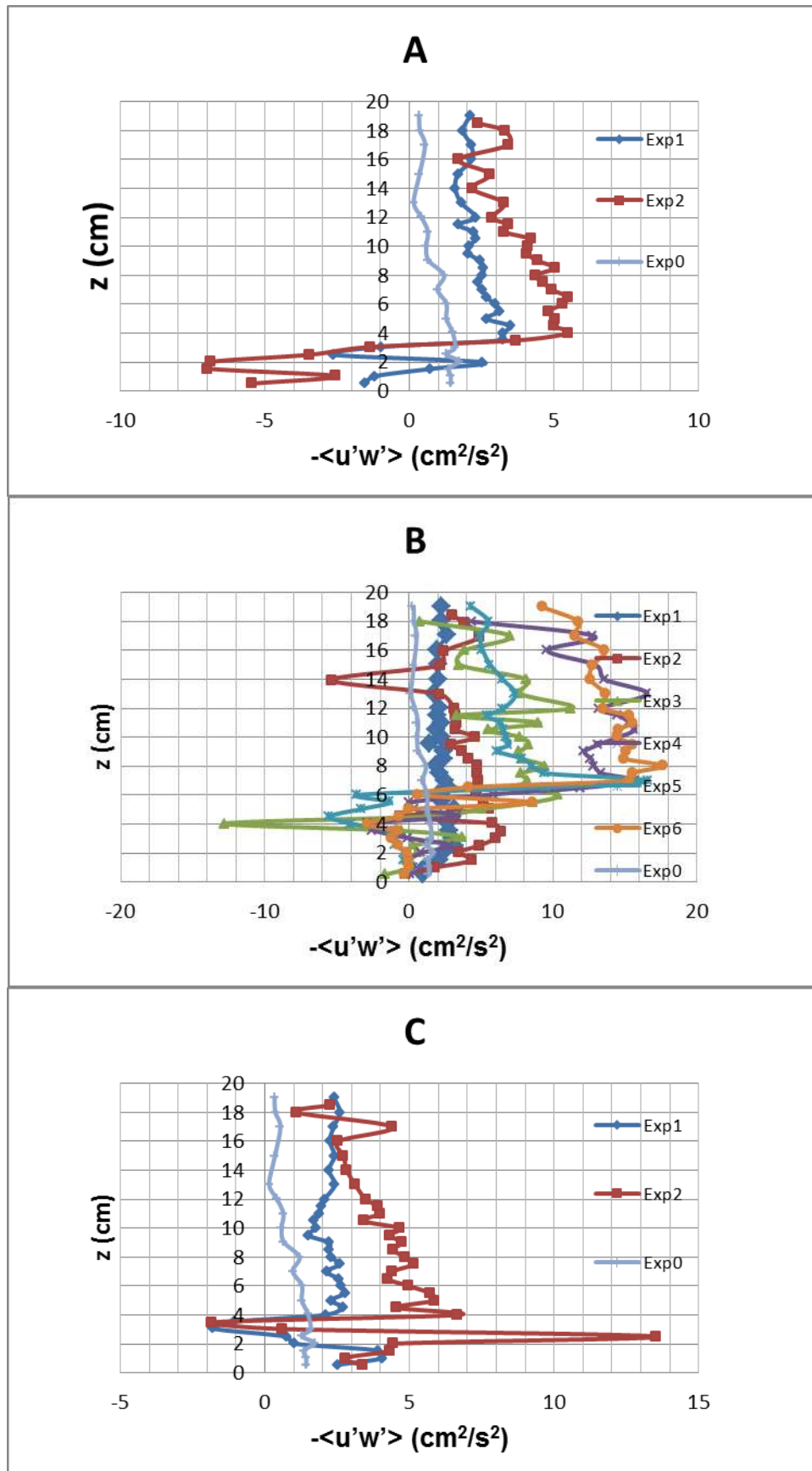
Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 φαίνονται οι αδιαστατοποιημένες κατανομές τυρβώδους διατμητικής τάσης για κάθε πείραμα και για κάθε θέση αντίστοιχα. Και πάλι, η κατακόρυφη θέση αδιαστατοποιείται με το ύψος του στοιχείου (h) ενώ οι διατμητικές τάσεις αδιαστατοποιούνται με την αντίστοιχη τιμή στην κορυφή του στοιχείου ( $\tau_h$ ). Παρατηρείται ότι η τάση των κατανομών είναι περίπου ίδια για όλες τις θέσεις. Οι διατμητικές τάσεις τείνουν να επιτυγχάνουν τη μέγιστη τιμή τους κυρίως κοντά στην κορυφή της συστοιχίας και αργά μειώνονται με το ύψος πάνω από την κορυφή. Ορισμένες απροσδόκητες κορυφές σε  $z/h = 2$  και 3,5 στο Exp2 πιθανότατα προκαλούνται από ανεπαρκή αριθμό σωματιδίων σκόνης στο νερό που χρησιμοποιήθηκε, καθώς δεν υπήρχε επιπλέον προσθήκη. Οι τάσεις κάτω από την κορυφή είναι γενικά μικρότερες. Αυτή η συμπεριφορά είναι αντίθετη με την περίπτωση της ροής χωρίς βλάστηση, όπου οι διατμητικές τάσεις είναι μεγαλύτερες κοντά στον πυθμένα και σταδιακά μειώνονται με το ύψος.



Σχήμα 5.5α. Προφίλ των  $-\langle u'w' \rangle$  (ή  $-\overline{u'w'}$ ) ανά πείραμα

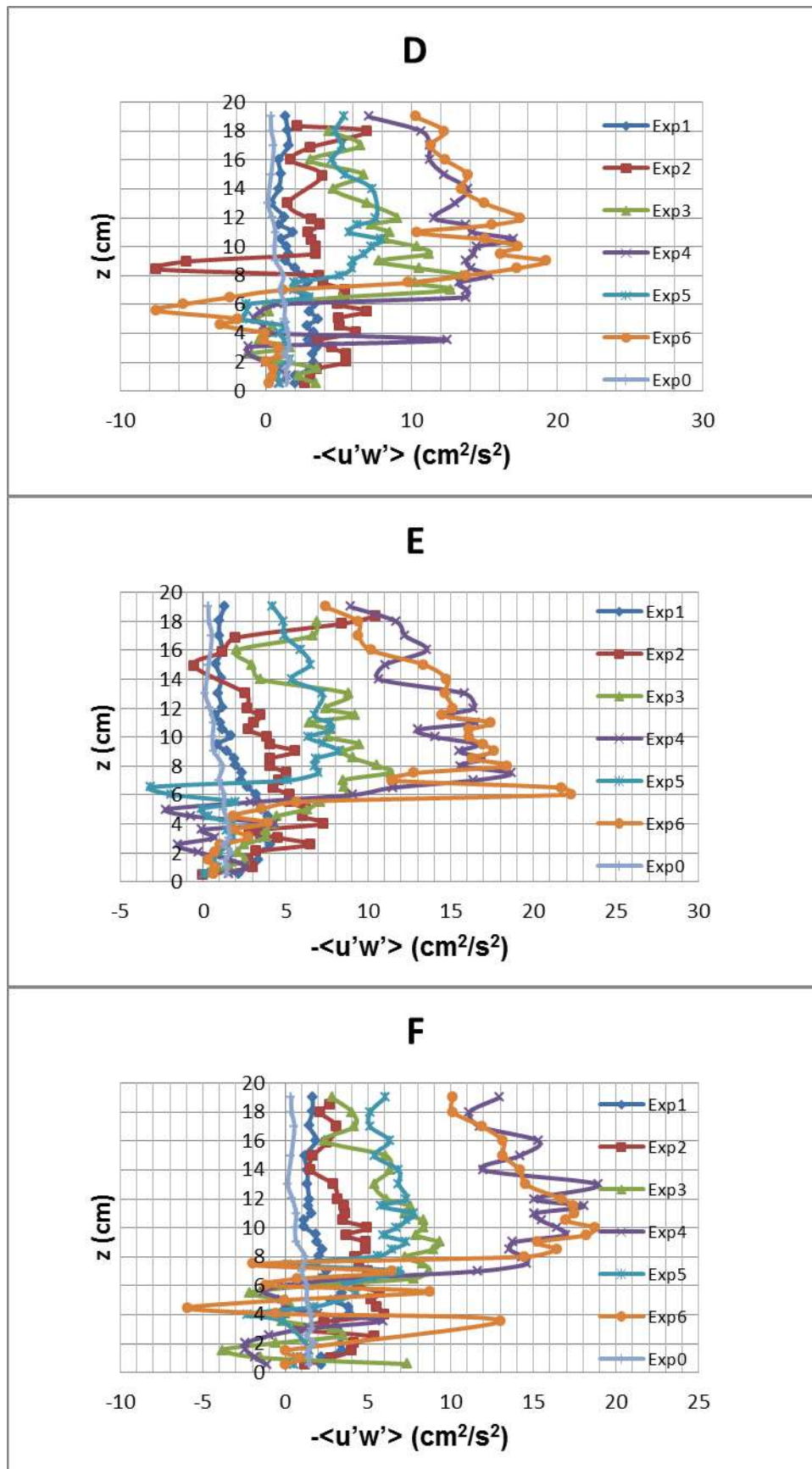


Σχήμα 5.5β. Προφίλ των  $-\langle u'w' \rangle$  (ή  $-\overline{u'w'}$ ) ανά πείραμα



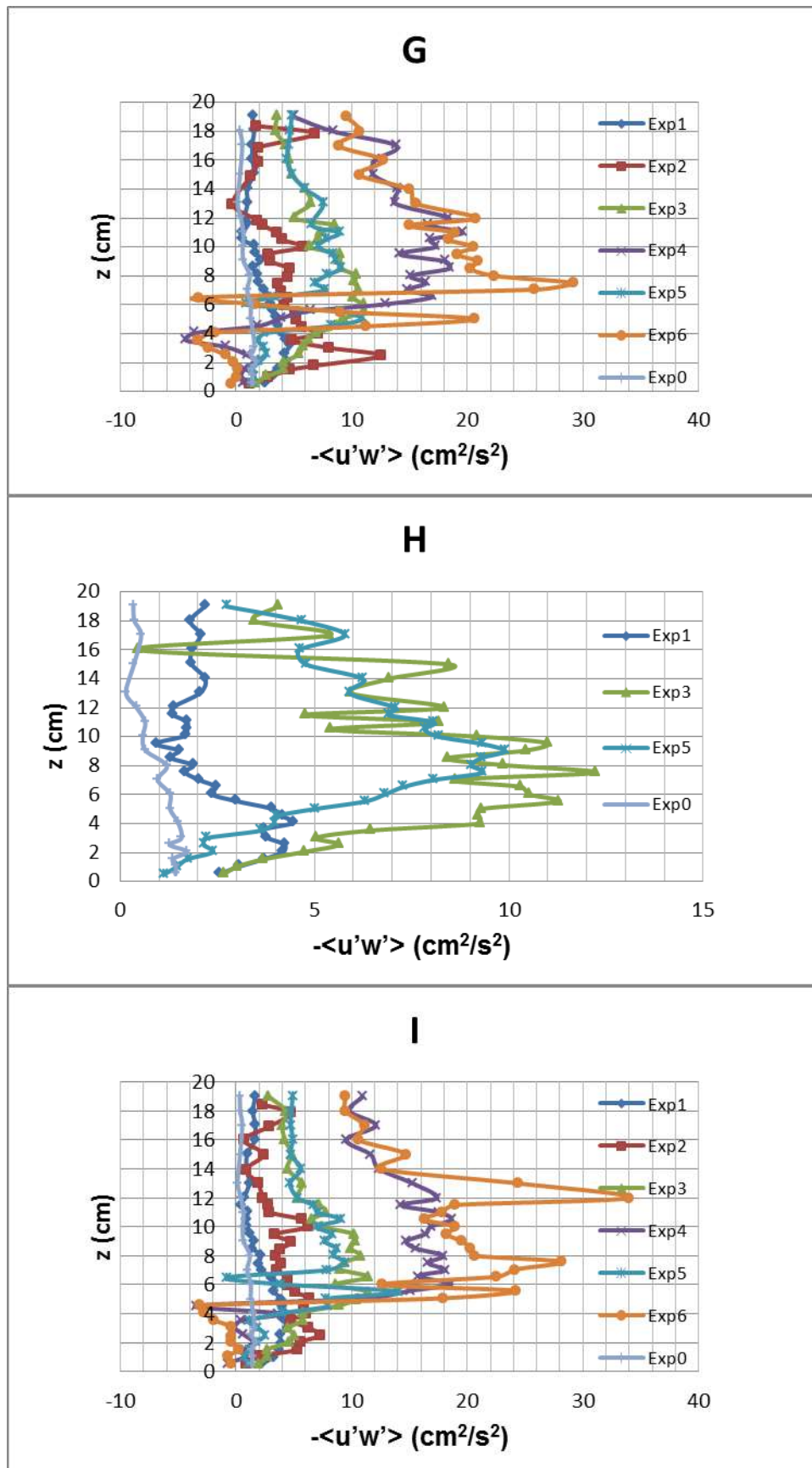
Σχήμα 5.6α. Προφίλ των  $-\langle u'w' \rangle$  (ή  $-\overline{u'w'}$ ) ανά θέση



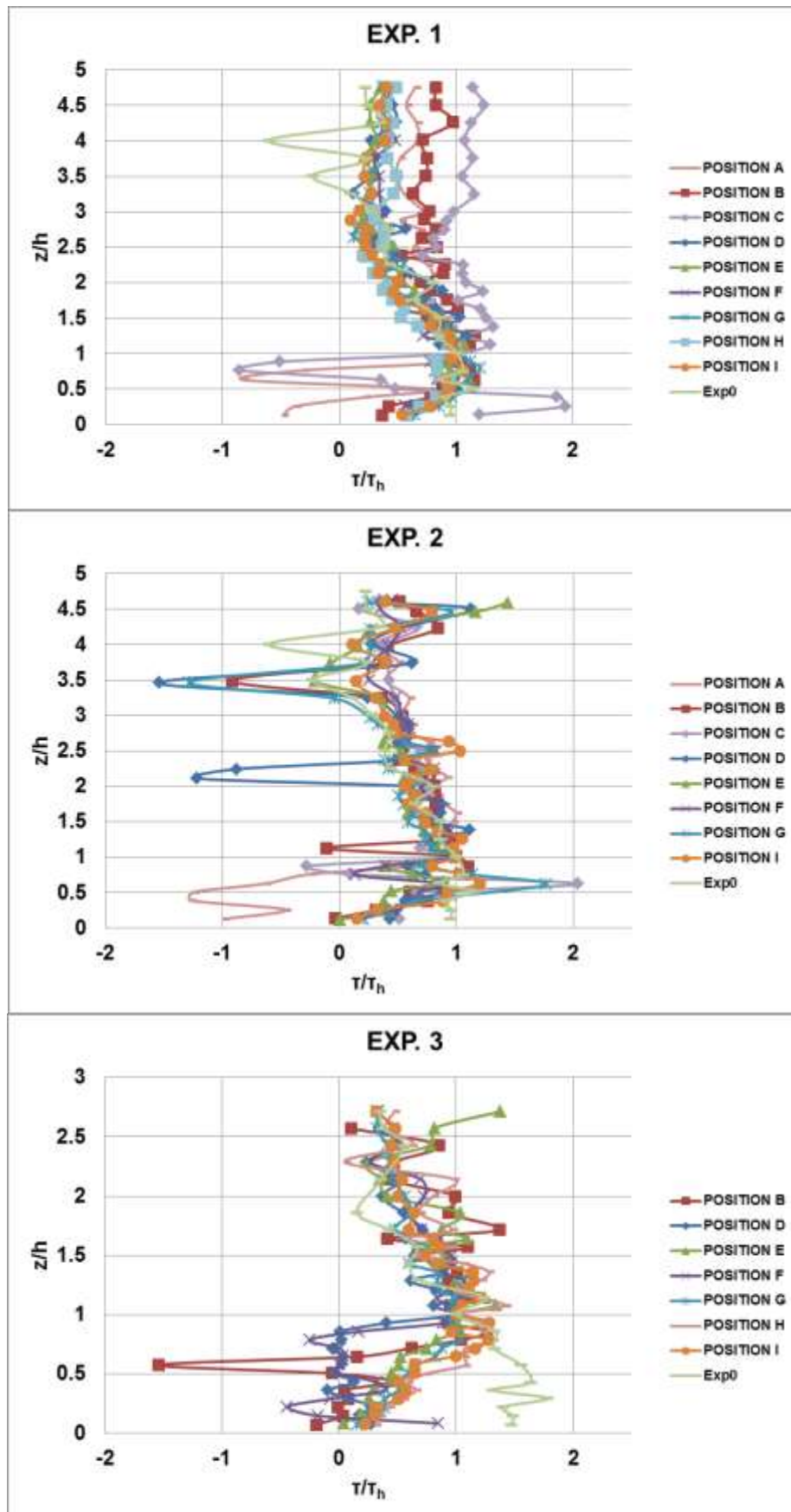


Σχήμα 5.6β. Προφίλ των  $-\langle u'w' \rangle$  (ή  $-\overline{u'w'}$ ) ανά θέση

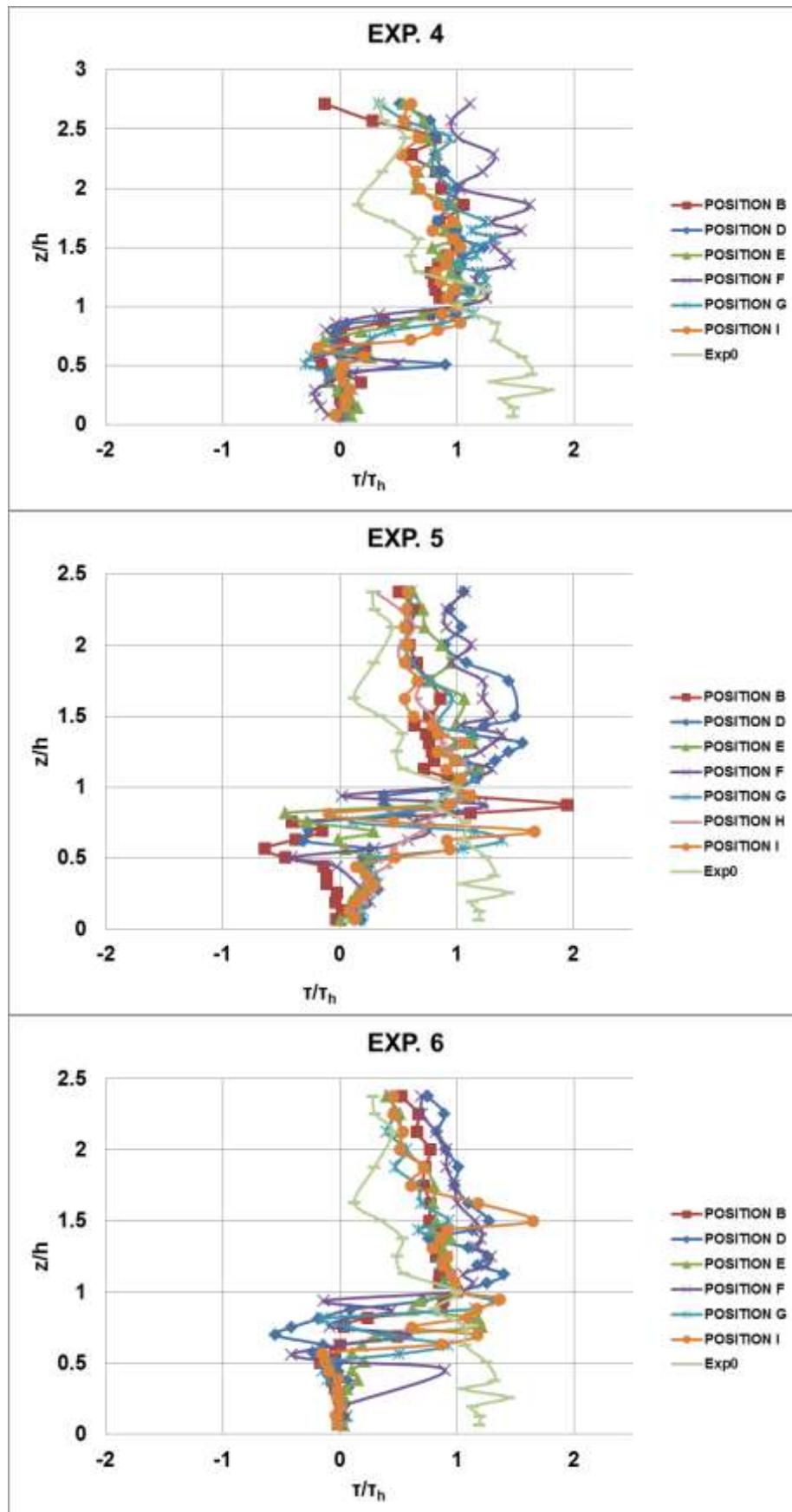




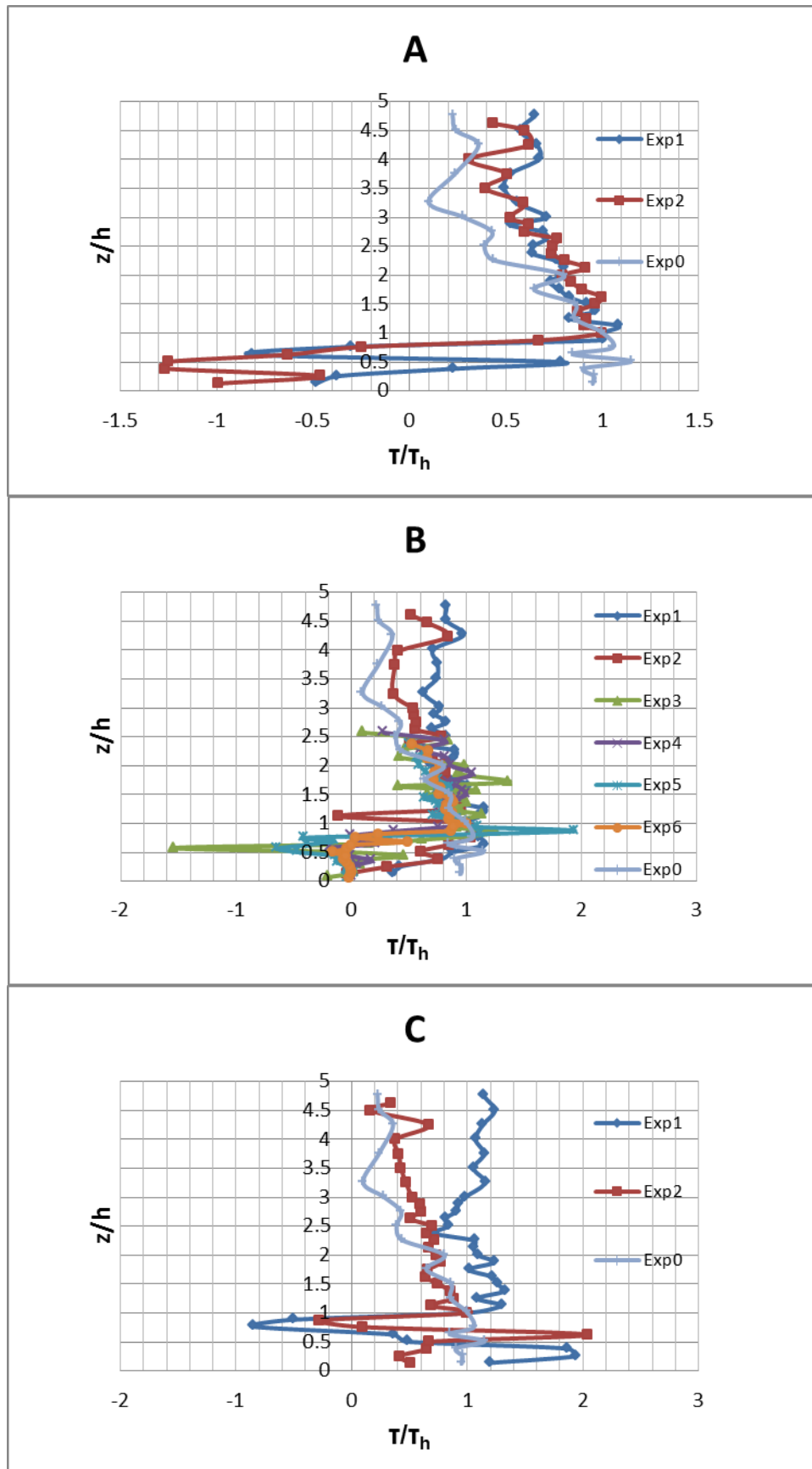
Σχήμα 5.6γ. Προφίλ των  $-\langle u'w' \rangle$  (ή  $-\overline{u'w'}$ ) ανά θέση



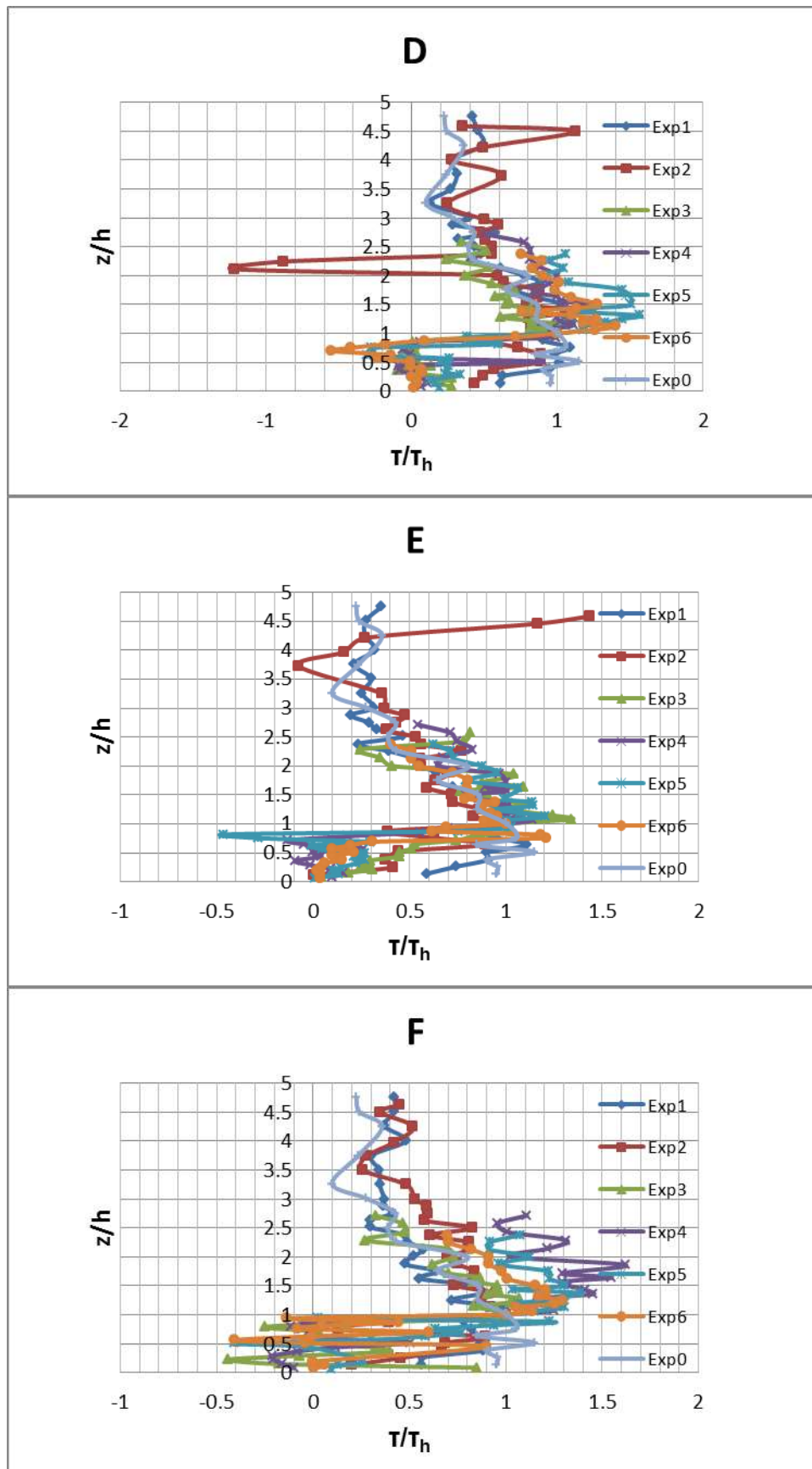
Σχήμα 5.7α. Αδιαστατοποιημένα προφίλ τυρβωδών διατμητικών τάσεων ανά πείραμα



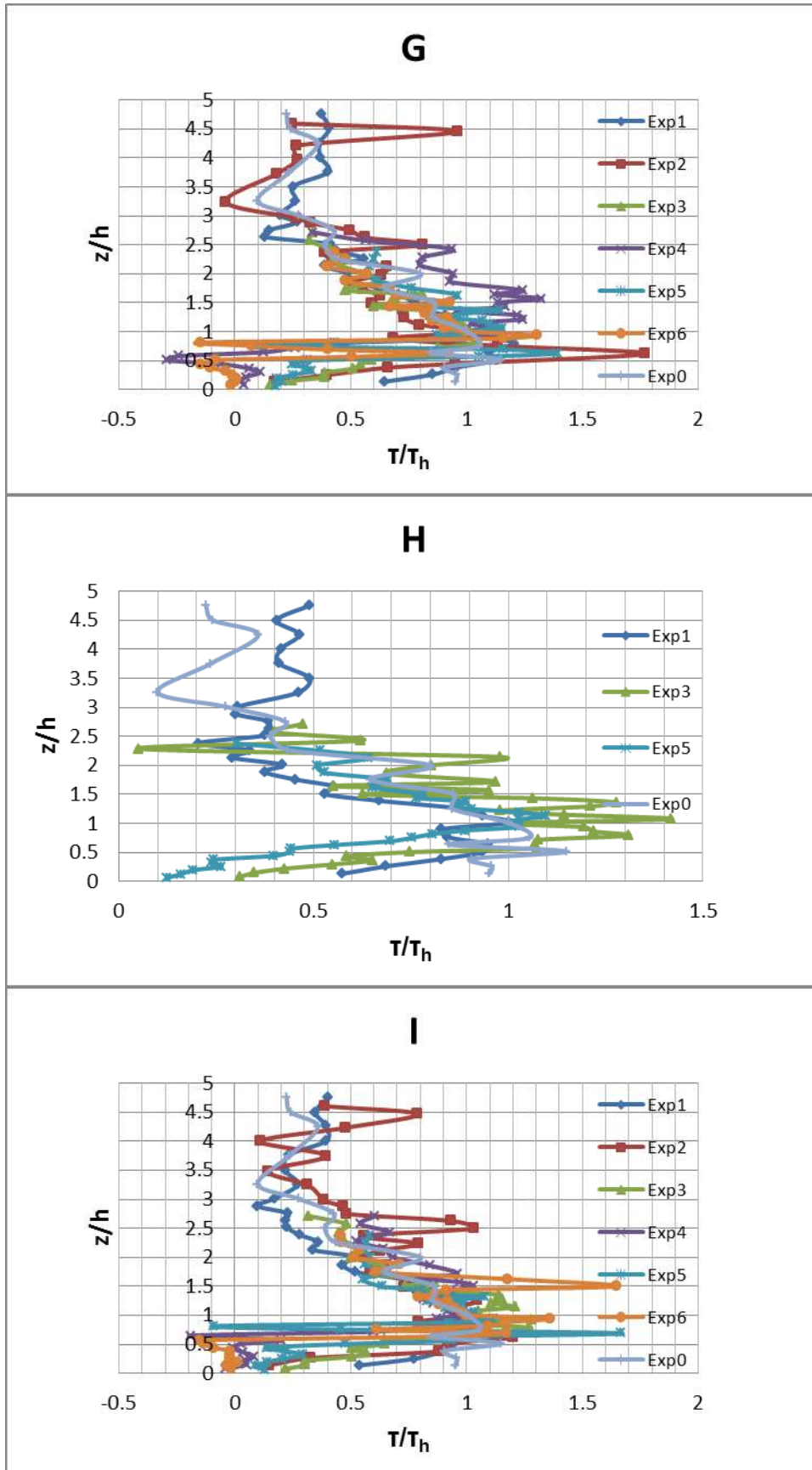
**Σχήμα 5.7β.** Αδιαστατοποιημένα προφίλ τυρβωδών διατμητικών τάσεων ανά πείραμα



**Σχήμα 5.8α.** Αδιαστατοποιημένα προφίλ τυρβωδών διατμητικών τάσεων ανά θέση



Σχήμα 5.8β. Αδιαστατοποιημένα προφίλ τυρβωδών διατμητικών τάσεων ανά θέση

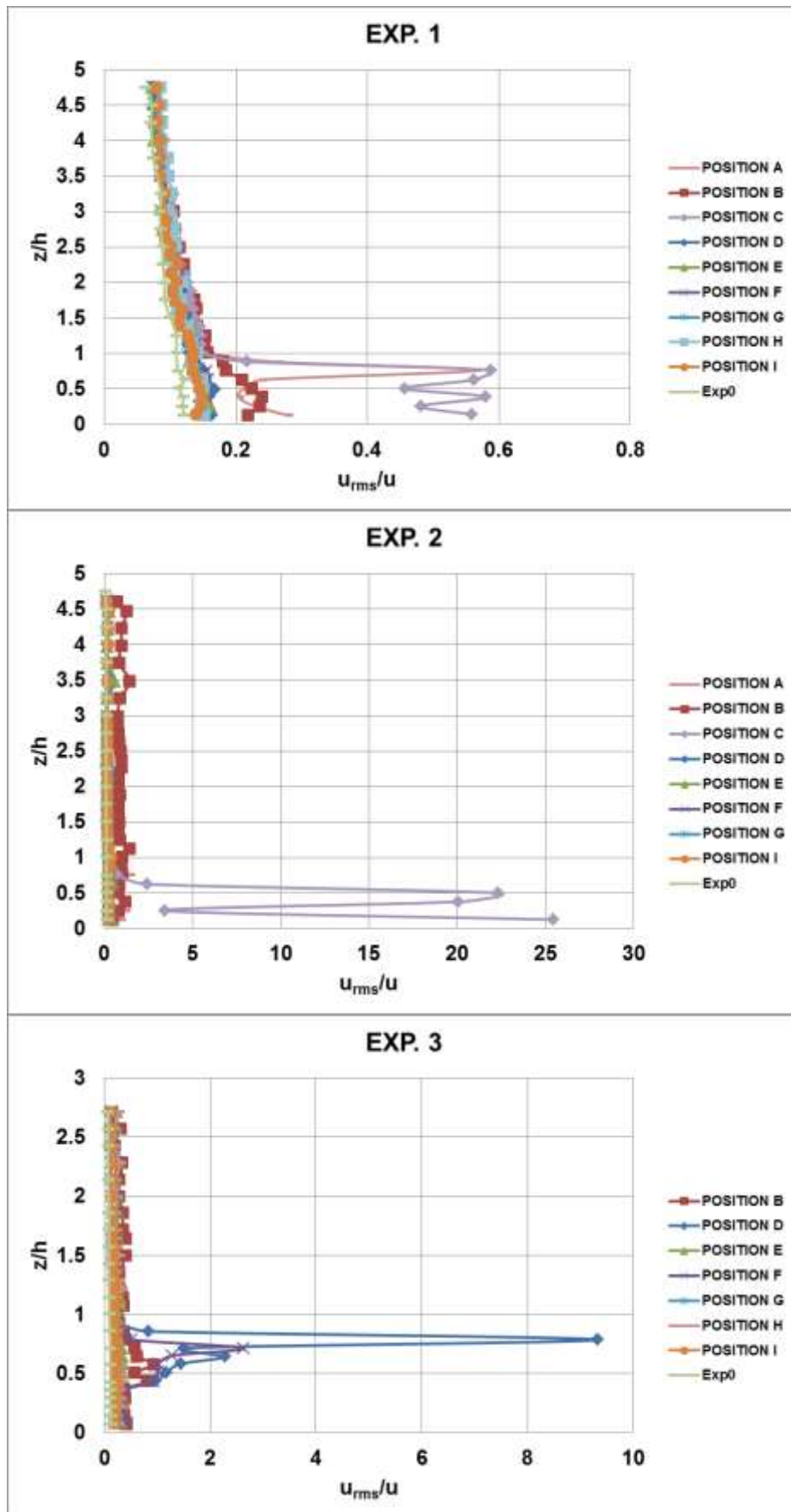


Σχήμα 5.8γ. Αδιαστατοποιημένα προφίλ τυρβωδών διατμητικών τάσεων ανά θέση

### 5.3. Ένταση τύρβης

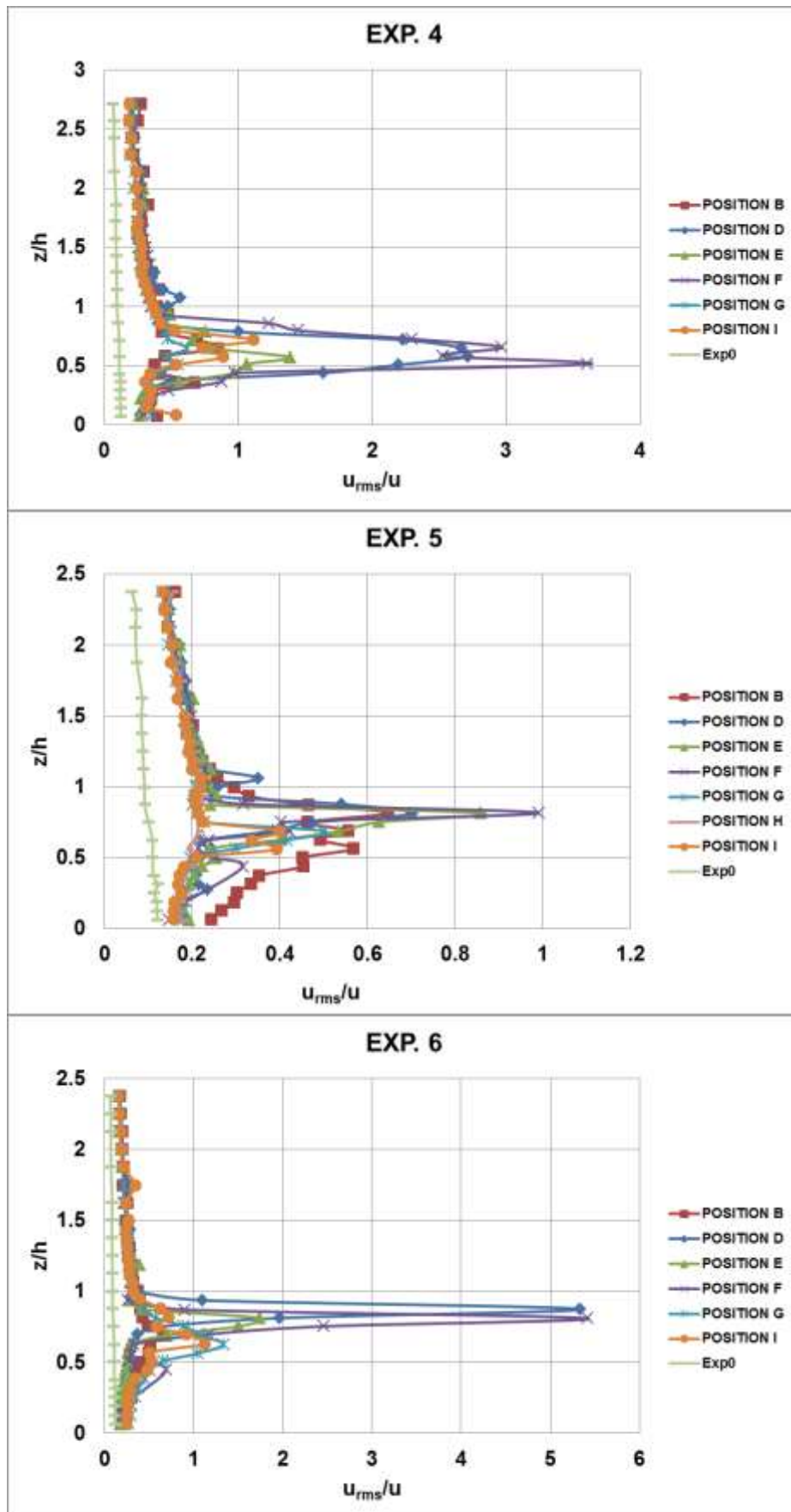
Στην ενότητα αυτή μέσω διαγραμμάτων θα απεικονιστεί η κατανομή της σχετικής έντασης τύρβης, που εκφράζεται ως ο λόγος των RMS διακυμάνσεων της ταχύτητας  $u_{RMS}(\sqrt{u'^2})$  προς την αντίστοιχη (χρονικά) μέση ταχύτητα  $u$  στο αντίστοιχο ύψος ( $z$ ). Η κατακόρυφη θέση είναι αδιαστατοποιημένη με το ύψος του στοιχείου ( $h$ ). Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες κατανομές της έντασης τύρβης ανά πείραμα και για όλες τις θέσεις μετρήσεων στην περιοχή βλάστησης. Γενικά, η ένταση τύρβης είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση, εντός και πάνω από την συστοιχία βλάστησης. Επίσης, πάνω από την συστοιχία βλάστησης φαίνεται για όλες τις περιπτώσεις οι εντάσεις να συγκλίνουν, να είναι σχεδόν σταθερές και να προσεγγίζουν την κατανομή της έντασης τύρβης για την περίπτωση χωρίς βλάστηση χωρίς όμως να την φθάνουν ποτέ ενώ είναι εμφανής μια μικρή πτωτική τάση της έντασης τύρβης καθώς ανερχόμαστε προς την ελεύθερη επιφάνεια. Αντίθετα παρατηρεί κανείς την αξιοσημείωτη αύξηση της έντασης στο επίπεδο του ογκώδους τμήματος των στοιχείων της βλάστησης και προς την περιοχή της κορυφής της σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται προφανώς στην έντονη μείωση της ταχύτητας σε αυτό το επίπεδο. Εδώ πρέπει να αναφερθούν κάποιες υπερβολικά υψηλές τιμές της έντασης τύρβης κυρίως στο Πείραμα 2 εντός της βλάστησης. Για παράδειγμα στο πείραμα αυτό η τιμή της έντασης σε ένα σημείο είναι περίπου 25 γιατί η ταχύτητα  $u=0.136$  (cm/s) και το  $u_{RMS}=3.45$ (cm/s). Να επισημανθεί ότι αυτό γίνεται στην θέση C που είναι στα απόνερα του στοιχείου που έχουμε την μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας. Πιθανόν αυτή η μείωση, σχεδόν μηδενισμός, της ταχύτητας προκαλεί την μη σωστή λειτουργία του ταχύμετρου, καθώς οι φυσαλίδες αέρα ή τα μικροσωματίδια, στην κίνηση των οποίων βασίζεται η μέτρηση, έχουν την τάση να αναδυθούν ή να καθιζήσουν εξαιτίας της ηρεμίας (μηδενική ταχύτητα) του νερού στο σημείο αυτό. Τέλος, από το σχήμα είναι εμφανής η διαφοροποίηση της έντασης τύρβης από θέση σε θέση στη ζώνη κάτω από την κορυφή της βλάστησης.





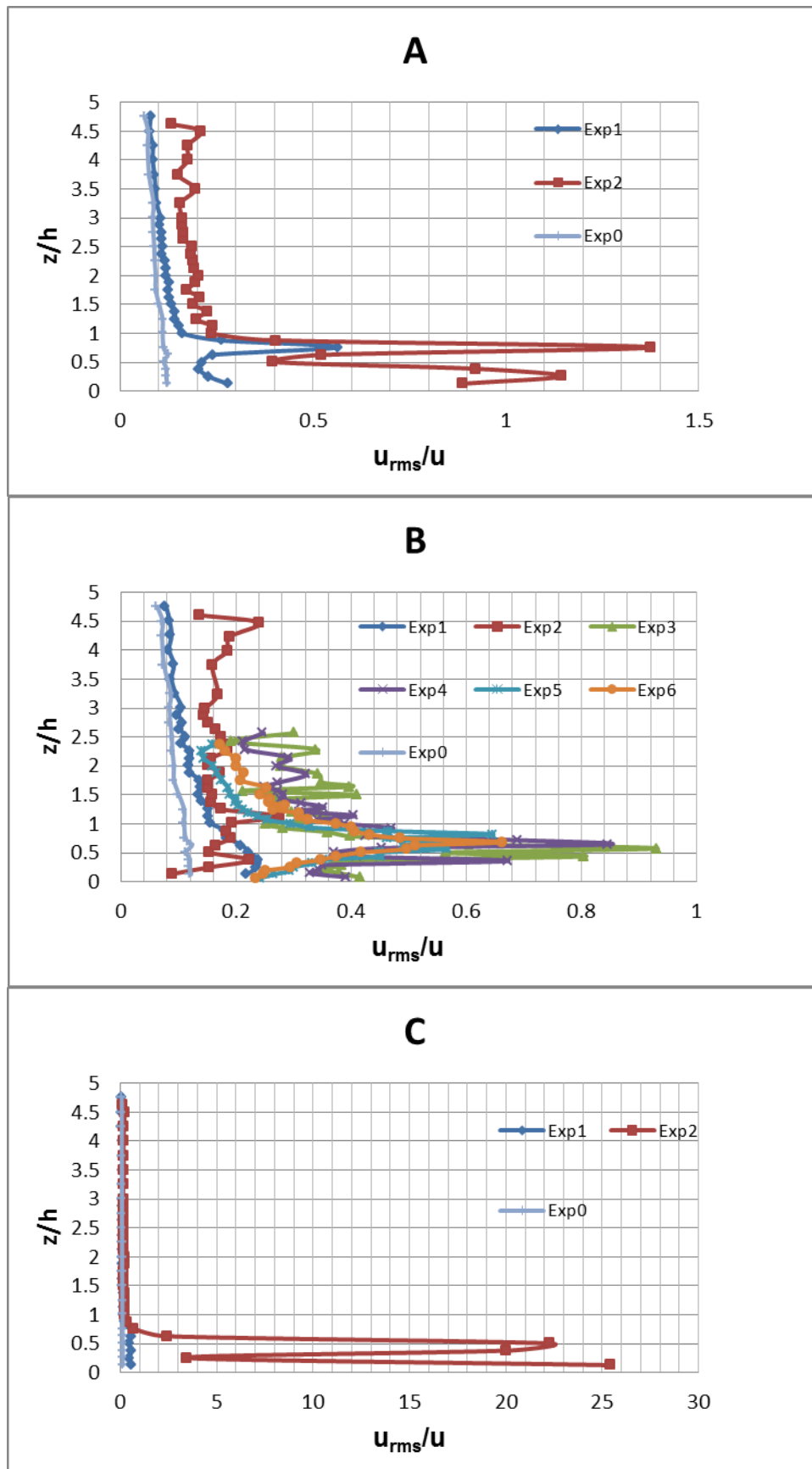
Σχήμα 5.9α. Προφίλ σχετικής έντασης τύρβης ανά πείραμα



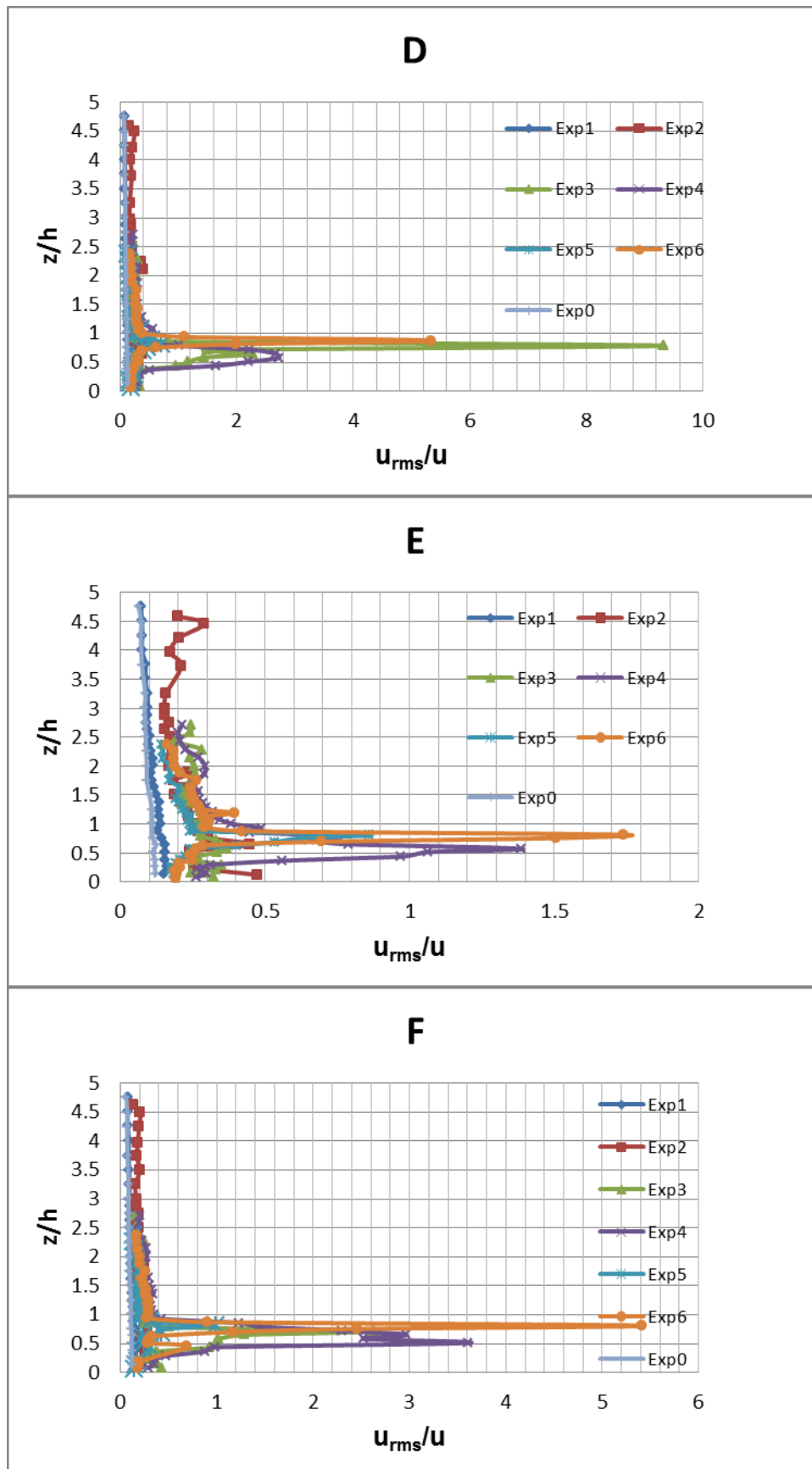


Σχήμα 5.9β. Προφίλ σχετικής έντασης τύρβης ανά πείραμα

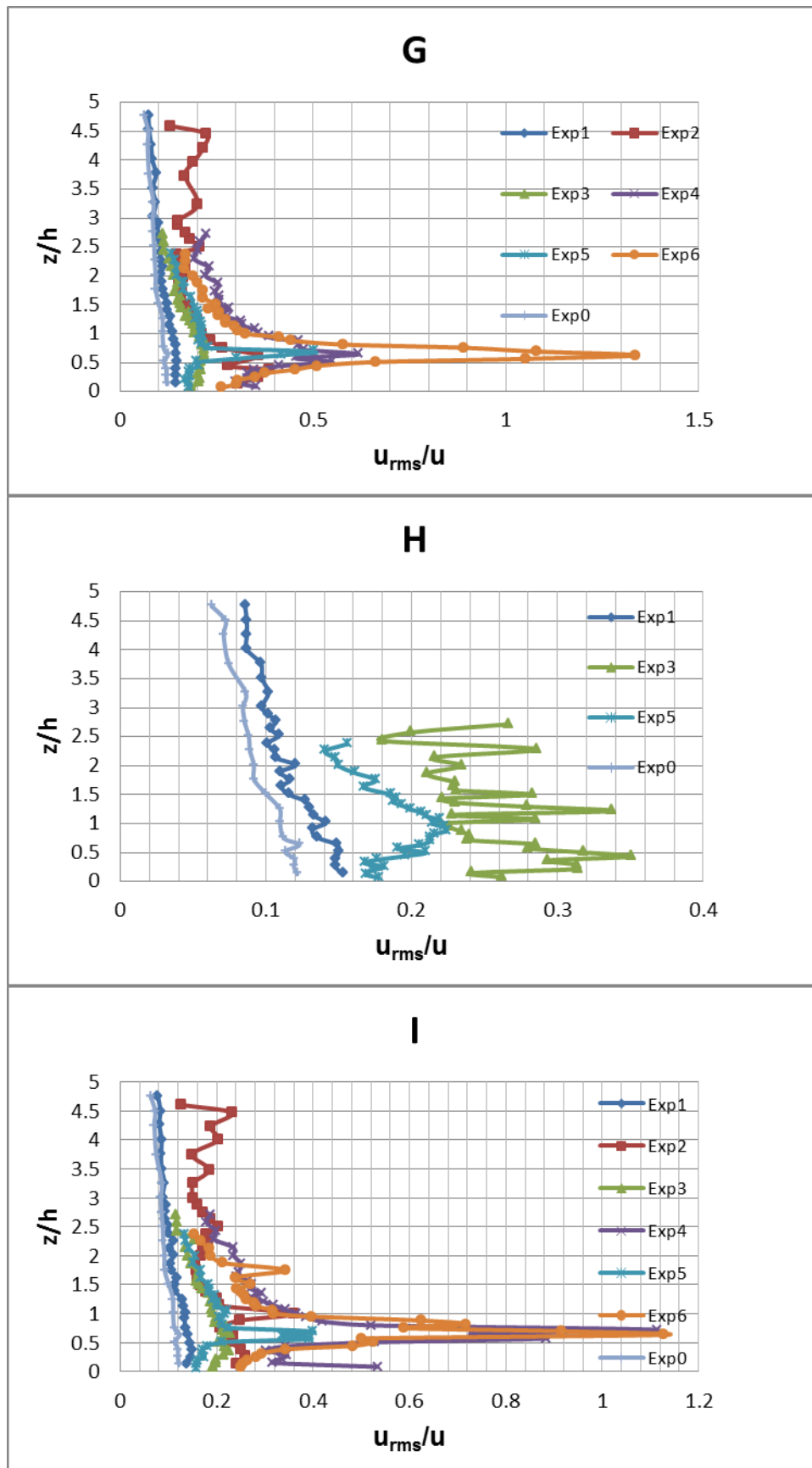
Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες κατανομές της έντασης τύρβης ανά θέση μέτρησης για όλα τα πειράματα. Κοντά στα στοιχεία παρατηρείται έντονη διακύμανση με μέγιστο κοντά ή και πάνω από την κορυφή των στοιχείων, ενώ η κατανομή είναι σχετικά ομαλή στην πιο απομακρυσμένη θέση Η. Γενικά παρατηρείται ότι η ένταση τύρβης εξαρτάται από το μέγεθος και την γεωμετρία του στοιχείου βλάστησης αλλά και την πυκνότητά της με αποτέλεσμα να παίζει σημαντικό ρόλο η απόσταση από το κοντινότερο στοιχείο βλάστησης. Συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά στο στοιχείο βλάστησης βρισκόμαστε ή όσο πιο μεγάλη μετωπική επιφάνεια έχει το στοιχείο ή/και μέρος του στοιχείου ή όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση τύρβης. Χαρακτηριστικά, στις θέσεις Α και C που είναι οι πλησιέστερες σε στοιχείο βλάστησης, σε απόσταση μιας διαμέτρου και για την μεγαλύτερη πυκνότητα, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές της έντασης τύρβης κυρίως στην θέση C που βρίσκεται μέσα στην περιοχή αποκόλλησης του στοιχείου. Στην θέση Η που είναι η πιο απομακρυσμένη από τα στοιχεία, σαν μέγεθος η ένταση τύρβης είναι μικρή και γενικότερα μικρότερη από τις άλλες θέσεις ενώ για τις απλές ράβδους προσεγγίζει την περίπτωση χωρίς βλάστηση. Ειδικότερα στις θέσεις εκτός της ευθυγράμμισης των στοιχείων, δηλαδή στις E, F, G και I, συνήθως οι κορυφές της σχετικής έντασης για τα σύνθετα άκαμπτα στοιχεία και το πυκνό μοτίβο είναι οι υψηλότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα. Θα πρέπει να επισημανθεί η απόκλιση από αυτήν την συμπεριφορά στην θέση D όπου η μεγαλύτερη κορυφή της σχετικής έντασης παρατηρείται για το πείραμα 3 (σύνθετα ημι-εύκαμπτα στοιχεία σε αραιό μοτίβο) ενώ και στην θέση Η παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στο πείραμα 3 από το 5 αν και έχει μικρότερη μετωπική επιφάνεια. Στη θέση B, δηλαδή μεταξύ των στοιχείων κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής, οι σχετικές εντάσεις είναι περίπου οι ίδιες για κάθε τύπο σύνθετου στοιχείου, ανεξαρτήτως μοτίβου. Όσον αφορά τα πειράματα απλών ράβδων, η ένταση της τύρβης είναι σημαντικά μικρότερη σε όλο το ύψος για το παράλληλο μοτίβο σε σύγκριση με το κλιμακωτό (πιο πυκνό) και σε όλες τις θέσεις. Να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα για την θέση Η υπάρχουν μετρήσεις μόνο για το παράλληλο μοτίβο βλάστησης δηλαδή για την μικρότερη πυκνότητα καθώς στην περίπτωση κλιμακωτής βλάστησης η θέση καταλαμβάνεται από στοιχείο βλάστησης και δεν υπάρχει μέτρηση ενώ επισημαίνεται ότι στις θέσεις Α και C ήταν εφικτές οι μετρήσεις μόνο για τα πειράματα 1 και 2 λόγω της αδυναμίας προσέγγισης του οργάνου μέτρησης στα σύνθετα στοιχεία.



Σχήμα 5.10α. Προφίλ σχετικής έντασης τύρβης ανά θέση μέτρησης



Σχήμα 5.10β. Προφίλ σχετικής έντασης τύρβης ανά θέση μέτρησης



Σχήμα 5.10γ. Προφίλ σχετικής έντασης τύρβης ανά θέση μέτρησης

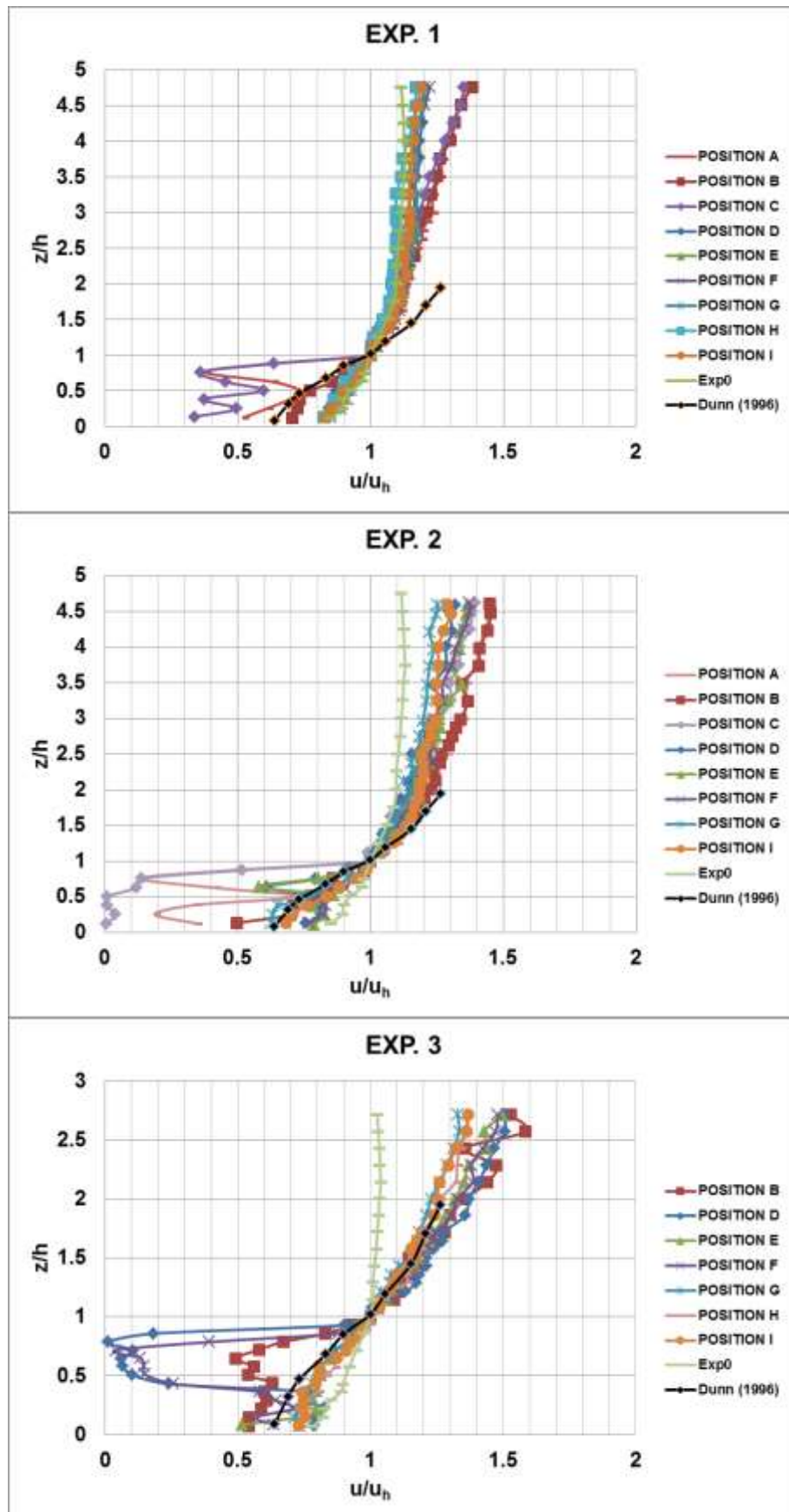
#### 5.4. Συγκρίσεις με άλλες εργασίες

Για την κρίση της εγκυρότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας επιδιώχθηκε η σύγκριση-αντιπαραβολή με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων εργασιών, εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο αδιαστατοποίησης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι ύστερα από εκτενή αναζήτηση, βρέθηκαν ελάχιστες εργασίες με λεπτομερή χωρικά δεδομένα υπό συγκρίσιμες συνθήκες, κάτι που καταδεικνύει την σημασία και την πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής. Ακολουθώντας στα Σχήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε αδιαστατοποιημένα κατακόρυφα προφίλ μεγεθών και επιχειρείται σύγκριση με πειραματικά δεδομένα των Fairbanks (1998) και Dunn et al (1996) που αφορούν παρόμοιες διατάξεις βλάστησης, δηλαδή απλές άκαμπτες ράβδους χωρίς επιφανειακή τραχύτητα σε κλιμακωτή διάταξη, ωστόσο με κάποιες σημαντικές διαφορές. Συγκεκριμένα, στο πείραμα του Fairbanks υπήρχαν οι εξής συνθήκες: παροχή  $Q=0,0114 \text{ m}^3/\text{s}$ , πλάτος  $b=0,3 \text{ m}$ , σταθερό βάθος  $Z=0,1141 \text{ m}$ , διάμετρος ράβδου  $6,35 \text{ mm}$  και ύψος  $h=7,62 \text{ cm}$  με διαδοχικές αποστάσεις  $6,35 \text{ cm}$  κατά μήκος και εγκαρσίως, ενώ οι διαδοχικές σειρές ράβδων είχαν απόσταση το μισό ( $3,175 \text{ cm}$ ), και άρα η πυκνότητα ήταν περίπου  $450 \text{ stems}/\text{m}^2$  και η μετωπική πυκνότητα  $\lambda=0,06$ . Στο πείραμα των Dunn et al υπήρχαν οι εξής συνθήκες: παροχή  $Q=0,177 \text{ m}^3/\text{s}$ , πλάτος  $b=0,91 \text{ m}$ , σταθερό βάθος  $Z=0,311 \text{ m}$ , διάμετρος ράβδου  $6,35 \text{ mm}$  και ύψος  $h=11,75 \text{ cm}$ , επομένως η αναλογία βύθισης  $H/h = 2,65$ , με διαδοχικές αποστάσεις  $20,32 \text{ cm}$  κατά μήκος και  $10,16 \text{ cm}$  εγκαρσίως, ενώ οι διαδοχικές σειρές ράβδων είχαν απόσταση  $10,16 \text{ cm}$ , και άρα η πυκνότητα ήταν περίπου  $96 \text{ stems}/\text{m}^2$  και η μετωπική πυκνότητα  $\lambda=0,0181$ . Τα κατακόρυφα προφίλ που παρουσίασαν οι Dunn et al προέκυψαν από τις χωρικά μέσες τιμές σε κάθε βάθος μέτρησης και επομένως δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θέσεις. Η αδιαστατοποίηση των αποτελεσμάτων τους έγινε ως εξής: Το βάθος  $z$  αδιαστατοποιήθηκε με το ύψος της ράβδου  $h$ , ενώ οι (μέσες χρονικά) ταχύτητες και οι τυρβώδεις διατμητικές τάσεις αδιαστατοποιήθηκαν με την αντίστοιχη τιμή πλησίον της κορυφής της συστάδας βλάστησης.

Το Σχήμα 5.11 δείχνει τα κανονικοποιημένα κατακόρυφα προφίλ για όλα τα πειράματα της παρούσας εργασίας μαζί με το αντίστοιχο προφίλ που αναφέρεται από τους Dunn et al. (1996). Το τελευταίο είναι ο μέσος όρος των ταχυτήτων που μετρώνται σε 4 θέσεις εντός της συστοιχίας βλάστησης η οποία αποτελείται από απλές ράβδους σε κλιμακωτή διάταξη όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές στις διαστάσεις και την πυκνότητα των ράβδων, η συμφωνία είναι αρκετά καλή με το πείραμα 2 (απλοί μίσχοι σε κλιμακωτό σχέδιο), αλλά ενδεικτικά παρουσιάζονται και τα υπόλοιπα πειράματα. Πάνω από την κορυφή των στοιχείων, τα μεμονωμένα προφίλ είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο και σε εκείνο των Dunn et al. (1996), με το τελευταίο να ανεβαίνει κάπως πιο γρήγορα λόγω της μικρότερης απόστασης από την ελεύθερη επιφάνεια. Κάτω από την κορυφή των στοιχείων, η διαφορά των προφίλ μεταξύ των θέσεων είναι σημαντική. Το προφίλ των Dunn et al. (1996) εμπίπτει ανάμεσα στα μεμονωμένα προφίλ του παρόντος

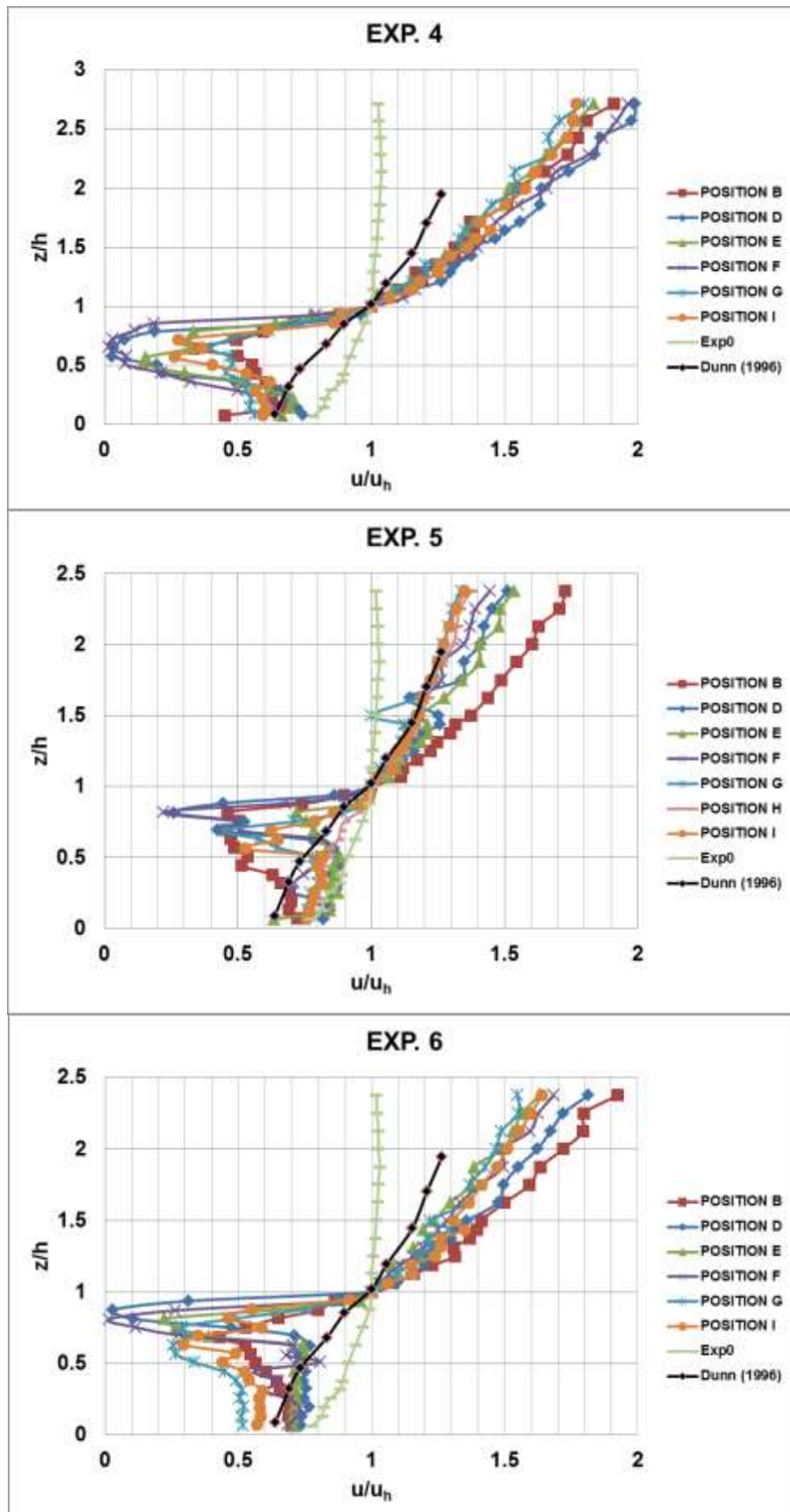
Πειράματος 2, αλλά είναι σαφές ότι ένα μέσο προφίλ δεν μπορεί να περιγράψει επαρκώς την πολυπλοκότητα της ροής μέσα στη βλάστηση.

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα προφίλ ταχυτήτων ανά θέση παρόμοια μεταξύ της παρούσας εργασίας και αυτής του Fairbanks (1998). Η πρώτη τριάδα διαγραμμάτων αφορά στις θέσεις A, B, C, οι οποίες βρίσκονται σε σειρά με τα στοιχεία βλάστησης. Σημειωτέον ότι στα πειράματα 3, 4, 5, 6 δεν ήταν δυνατή η μέτρηση στις θέσεις A και C πολύ κοντά στο σύνθετο στοιχείο λόγω της μορφής αυτού. Στο εσωτερικό της συστάδας παρατηρείται καλή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με απλές ράβδους (Πειράματα 1 και 2) προς αυτά του Fairbanks, ενώ πάνω από το ύψος των στοιχείων η ταχύτητα στο πείραμα του Fairbanks αυξάνεται πιο απότομα λόγω του περιορισμένου βάθους. Στη θέση B καθώς και στις πιο απομακρυσμένες D, E, H, παρατηρείται ικανοποιητική συμφωνία με τη μέση χωρικά καμπύλη των Dunn et al, ιδιαίτερα του Πειράματος 2 που αφορά και αυτό σε κλιμακωτή διάταξη απλών ράβδων.

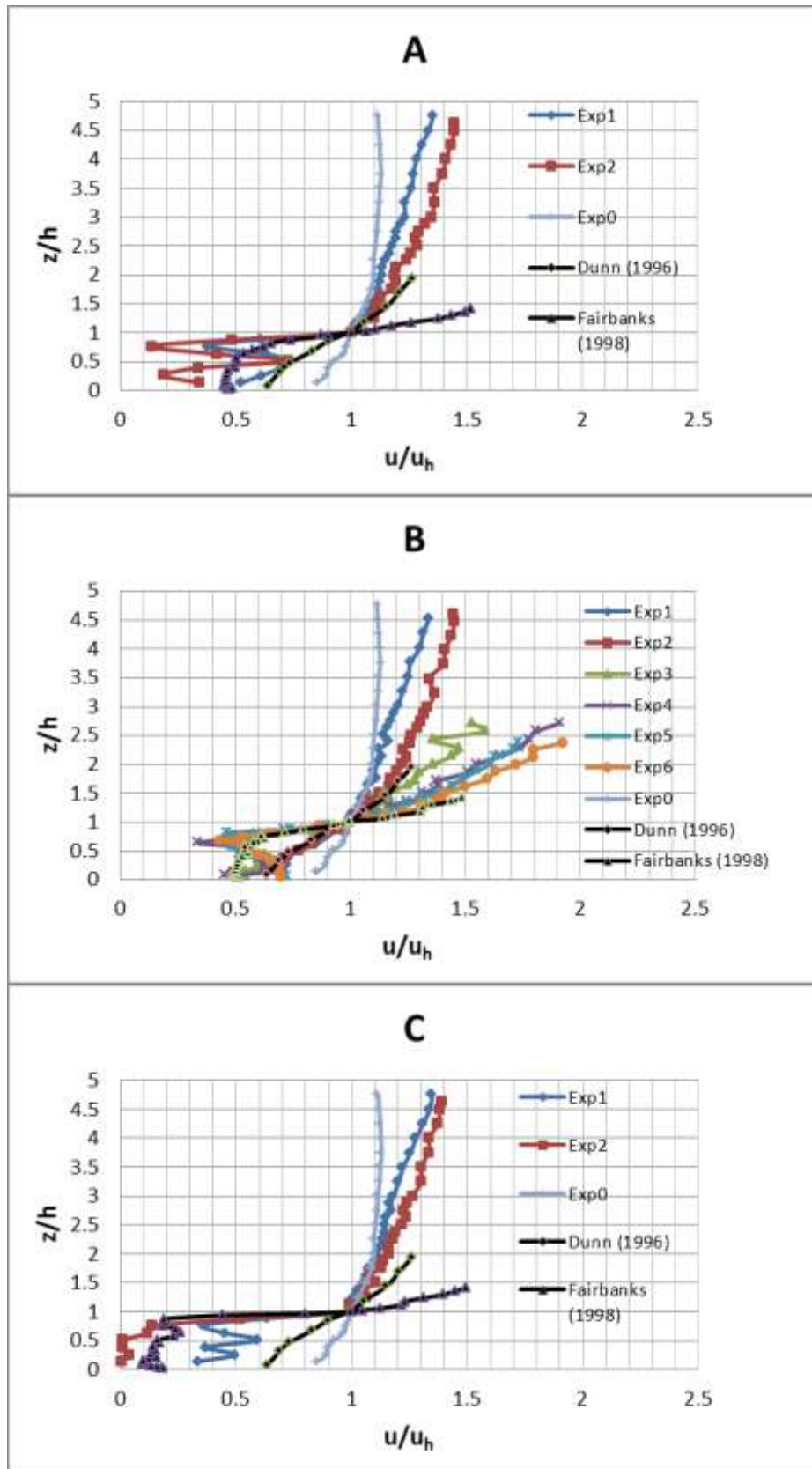


**Σχήμα 5.11α.** Σύγκριση αδιαστατοποιημένων κατακόρυφων προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα με τη μέση χωρικά κατανομή ταχυτήτων των Dunn et al. (1996)

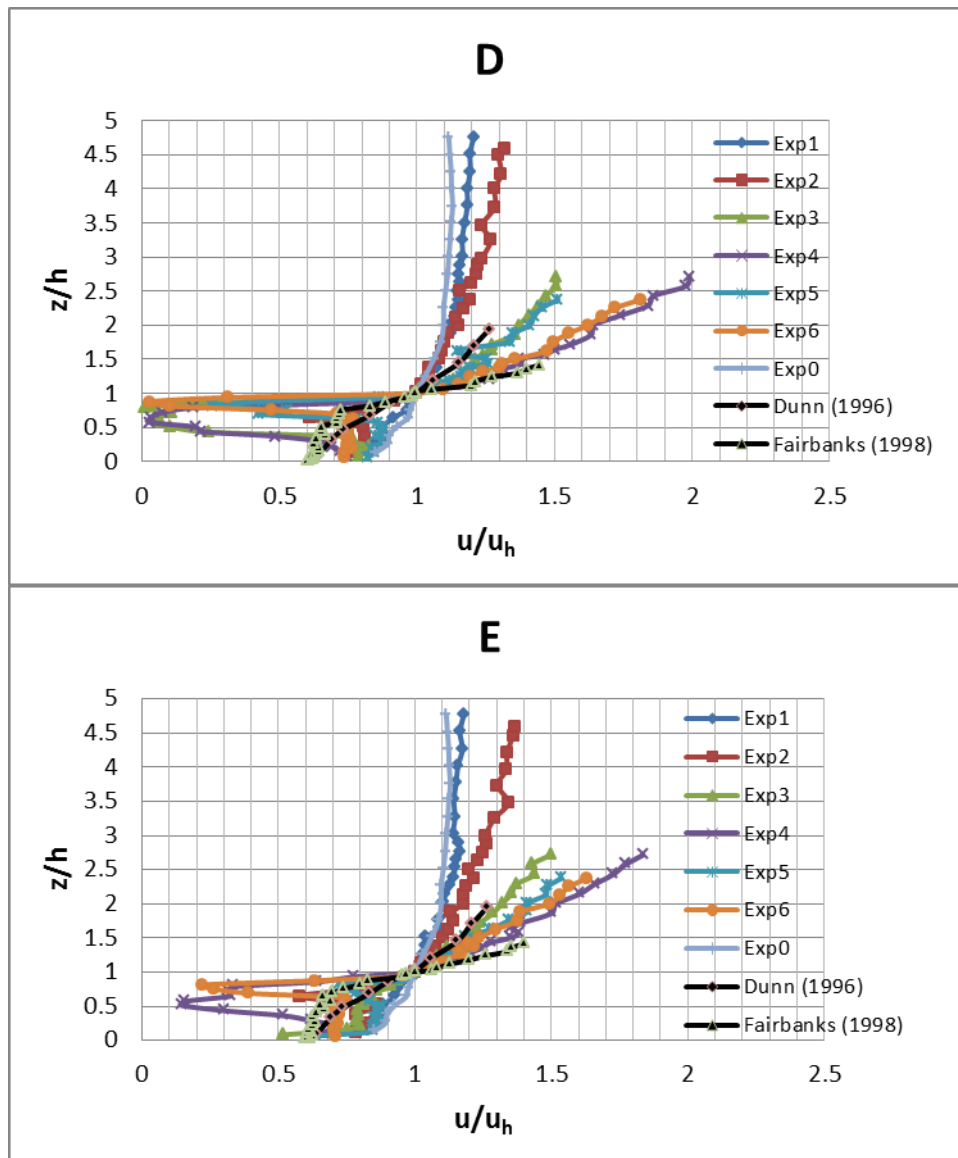




Σχήμα 5.11β. Σύγκριση αδιαστατοποιημένων κατακόρυφων προφίλ ταχυτήτων ανά πείραμα με τη μέση χωρικά κατανομή ταχυτήτων των Dunn et al. (1996)



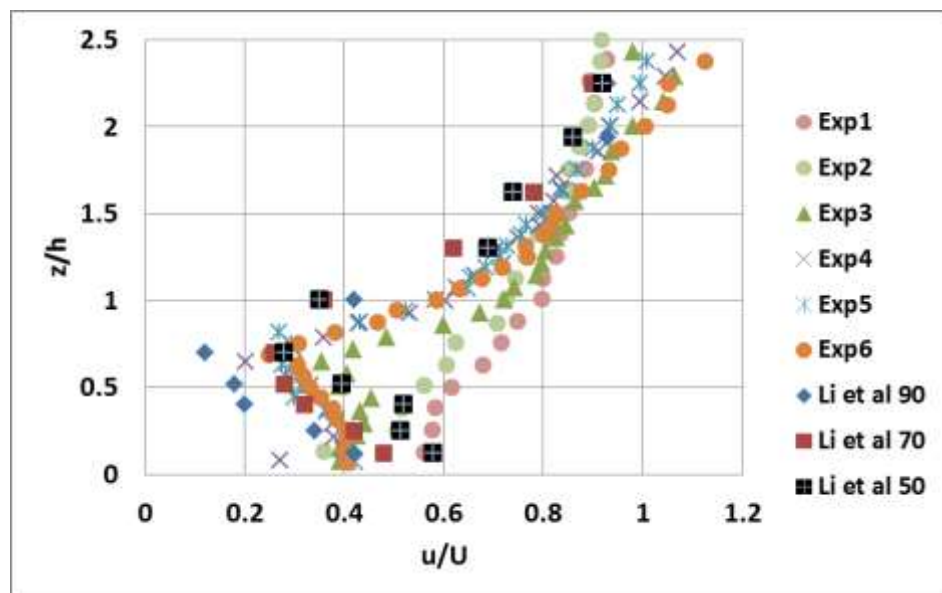
**Σχήμα 5.12α.** Σύγκριση αδιαστατοποιημένων κατακόρυφων προφίλ ταχυτήτων παρόμοιων θέσεων μεταξύ της παρούσας εργασίας και αυτής του Fairbanks (1998) και με τη μέση χωρικά κατανομή ταχυτήτων των Dunn et al. (1996)



**Σχήμα 5.12β.** Σύγκριση αδιαστατοποιημένων κατακόρυφων προφίλ ταχυτήτων παρόμοιων θέσεων μεταξύ της παρούσας εργασίας και αυτής του Fairbanks (1998) και με τη μέση χωρικά κατανομή ταχυτήτων των Dunn et al. (1996)

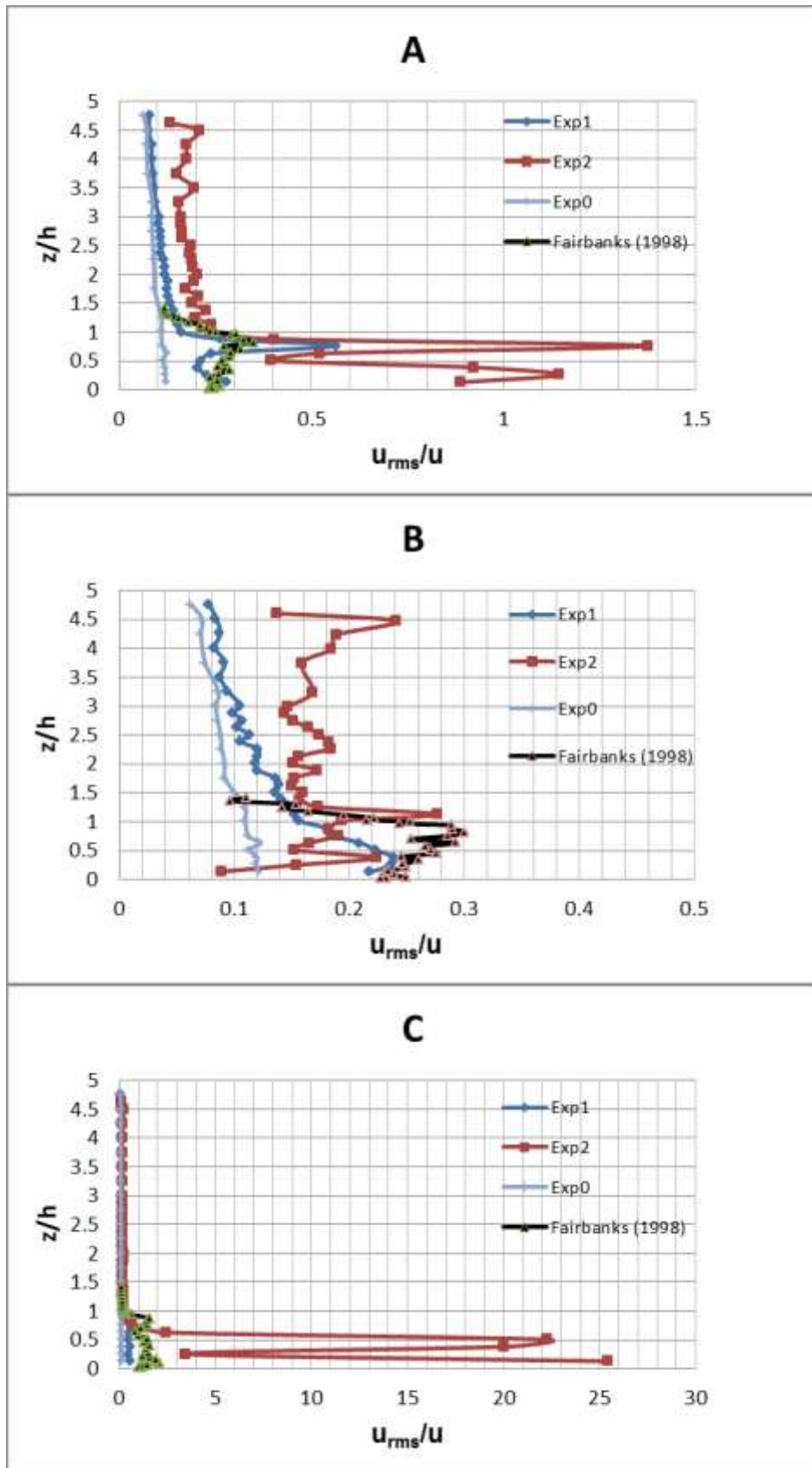
Επιπρόσθετα επιχειρήθηκε και μια σύγκριση των πειραμάτων της παρούσας εργασίας με αυτά των Li et al. (2014) όπου χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα στοιχεία σχετικά παραπλήσια με τα παρόντα αλλά εύκαμπτα. Το Σχήμα 5.13 δείχνει τα αδιάστατα προφίλ ταχύτητας  $u/U$  (όπου  $U$  είναι η μέση ταχύτητα διατομής  $=Q/(bZ)$ ) στη θέση B (στον άξονα του καναλιού) για όλα τα πειράματα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα προφίλ στον άξονα του καναλιού που αναφέρονται από τους Li et al. (2014). Η βλάστησή τους αποτελούνταν από εύκαμπτα τεχνητά φυτά που μιμούνται το πραγματικό είδος *Hydrilla verticillate*. Τα φυτά τοποθετήθηκαν σε κανονικό κλιμακωτό μοτίβο με πυκνότητα σε κάτοψη  $90 \text{ stems/m}^2$  και σε ακανόνιστα σχέδια για δύο χαμηλότερες πυκνότητες ( $70$  και  $50 \text{ stems/m}^2$ ). Η διάμετρος κάθε τμήματος του μίσχου ήταν  $0,2 \text{ cm}$  και το ύψος του  $6 \text{ cm}$ , ενώ το τμήμα του φυλλώματος είχε ύψος  $10 \text{ cm}$  και διάμετρο περίπου  $3,5 \text{ cm}$ . Έτσι, το φύλλωμα καλύπτει περίπου το

60% του συνολικού ύψους του φυτού σε σύγκριση με περίπου 30-40% στα παρόντα πειράματα. Παρόλα αυτά, η ομοιότητα των αδιάστατων προφίλ στα πειράματα με τα σύνθετα στοιχεία είναι αξιοσημείωτη, με μικρές διαφορές προφανώς λόγω της διαφορετικής πυκνότητας και ευελιξίας των στοιχείων. Ειδικότερα, είναι εμφανής σε όλες τις περιπτώσεις η απότομη μείωση της ταχύτητας κάτω από την κορυφή του στοιχείου, φτάνοντας την ελάχιστη τιμή στο πιο ογκώδες μέρος του φυλλώματος.

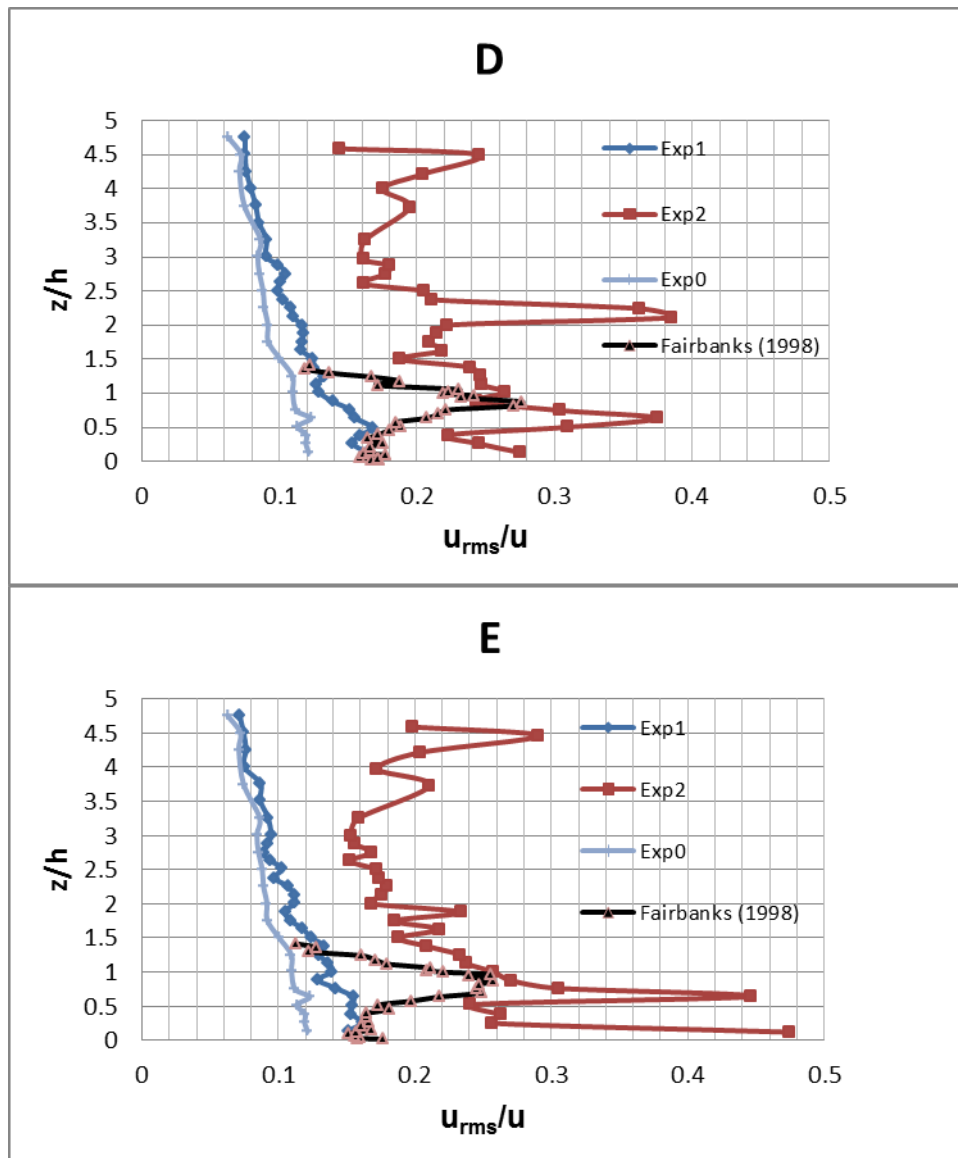


**Σχήμα 5.13.** Σύγκριση αδιάστατων προφίλ ταχύτητας για όλα τα στοιχεία με αυτά των Li et al. (2014) στην θέση B

Τέλος, στο Σχήμα 5.14 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας για απλές ράβδους (Πειράματα 1 και 2) με αυτά του Fairbanks (1998), που επίσης αφορούν κυλινδρικά στοιχεία, για την σχετική ένταση της τύρβης. Για τις θέσεις A και C, πολύ κοντά στα στοιχεία βλάστησης, φαίνεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία αλλά μόνο ποιοτικά, καθώς παρατηρείται η ίδια τάση μεγιστοποίησης της έντασης της τύρβης λίγο κάτω από την κορυφή της βλάστησης και προς το εσωτερικό της, τάση που παρατηρείται και στις υπόλοιπες θέσεις. Ωστόσο, για τις θέσεις αυτές και ειδικά για το Πείραμα 2 τα μεγέθη παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές, λόγω πιθανών σφαλμάτων μέτρησης εξαιτίας των πολύ μικρών ταχυτήτων όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Να σημειωθεί ότι οι θέσεις A και C στην εργασία του Fairbanks (1998) έχουν απόσταση από τα κυλινδρικά στοιχεία δυο φορές την διάμετρο τους ενώ στην παρούσα εργασία μια φορά και αυτό επίσης εξηγεί τις μικρότερες τιμές στην σχετική ένταση της τύρβης που παρατηρούνται εκεί. Στις πιο απομακρυσμένες θέσεις B, D, E που συγκρίνονται με το αντίστοιχο προφίλ σε παρόμοιες θέσεις του Fairbanks (1998) φαίνεται επίσης ικανοποιητική συμφωνία. Είναι σαφές ότι όσο απομακρυνόμαστε από τα στοιχεία βλάστησης η σχετική ένταση της τύρβης μειώνεται έντονα δείχνοντας πόσο σημαντικό ρόλο παίζει η απόσταση από τα στοιχεία των οποίων η επιρροή απομειώνεται.



**Σχήμα 5.14α.** Σύγκριση των προφίλ έντασης τύρβης για παρόμοιες θέσεις με το αντίστοιχο προφίλ του Fairbanks (1998)



**Σχήμα 5.14β.** Σύγκριση των προφίλ έντασης τύρβης για παρόμοιες θέσεις με το αντίστοιχο προφίλ του Fairbanks (1998)

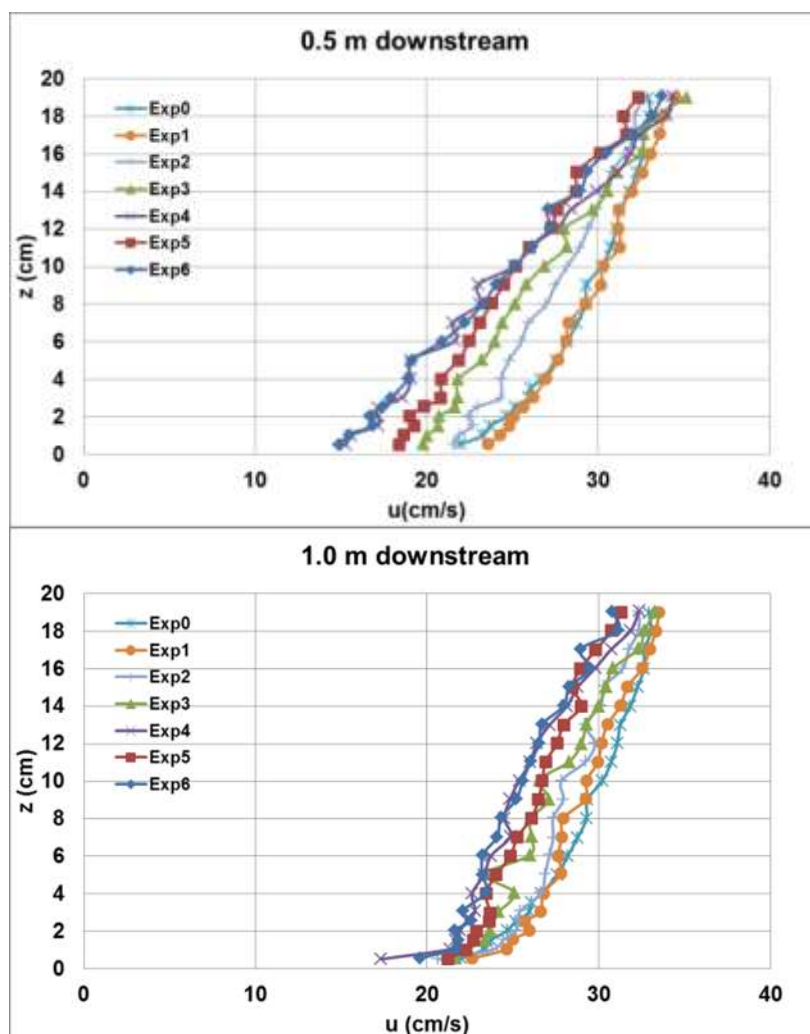
### 5.5. Κατάντη συνθήκες

Ο αρχικός σχεδιασμός των πειραμάτων περιελάμβανε και πειραματικές μετρήσεις κατάντη της περιοχής βλάστησης, συγκεκριμένα σε 4 θέσεις στον άξονα του καναλιού σε απόσταση 0.5, 1.0, 1.5 και 2.0 m από το τέλος της περιοχής με τα στοιχεία βλάστησης. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η βιβλιογραφία είναι πολύ φτωγή στο θέμα αυτό και το γεγονός αυτό ήταν ένας από τους λόγους που σχεδιάστηκε το πείραμα. Εξ άλλου, είναι εύλογο ότι το πεδίο των ταχυτήτων δεν μπορεί να επανέλθει ακαριαία μετά το πέρας της περιοχής βλάστησης.

Ο παραπάνω αρχικός σχεδιασμός στην πορεία των πειραμάτων τροποποιήθηκε, διότι από τις πρώτες μετρήσεις παρατηρήθηκε η επίδραση που είχε το θυρόφραγμα στο πεδίο ταχυτήτων στις πλησιέστερες προς αυτό θέσεις. Έτσι επιλέχθηκαν να



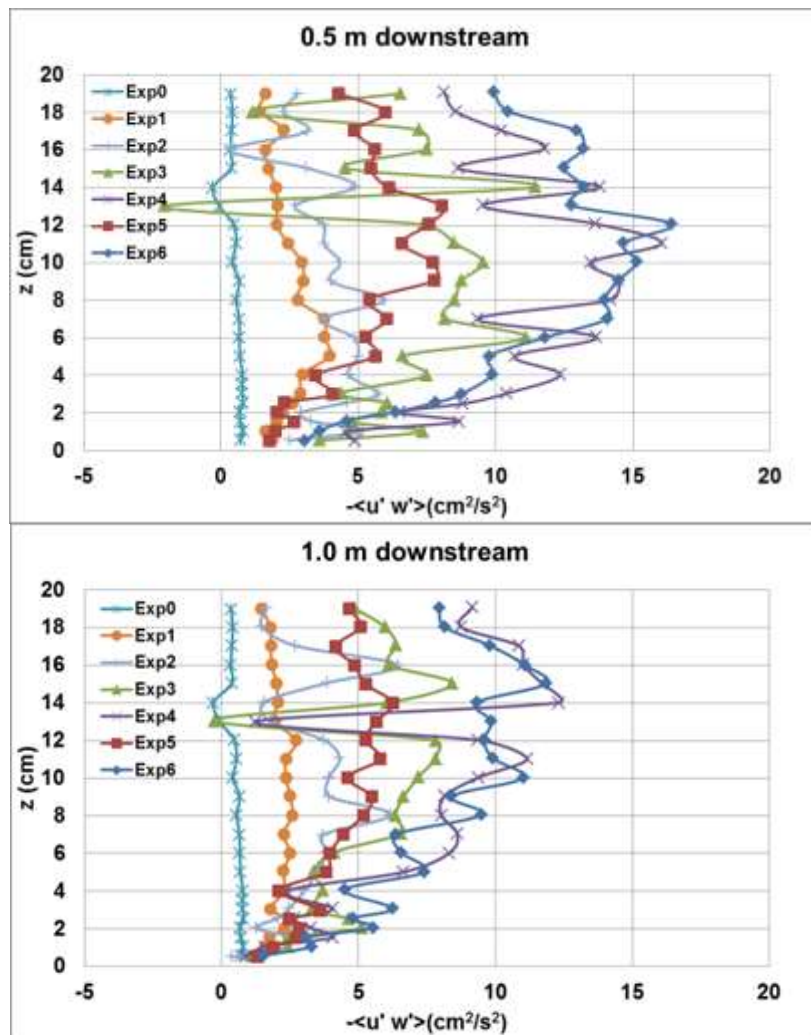
διατηρηθούν μόνο οι θέσεις σε απόσταση 0.5 και 1.0 m κατάντη της περιοχής βλάστησης και να επεκταθούν οι μετρήσεις εγκάρσια για να υπάρξει μια πιο λεπτομερής εικόνα της κατανομής των ταχυτήτων σε δυο κατάντη διατομές. Σε πρώτη φάση η επέκταση έγινε προς την μια ημιδιατομή αλλά γρήγορα κρίθηκε αναγκαίο να γίνει σε ολόκληρη. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις έγιναν συμμετρικά ως προς τον άξονα του καναλιού σε διαδοχικές αποστάσεις 0.0, 5.0, 10.0, 15.0 και 17.5 cm από αυτόν, ενώ στον κατακόρυφο άξονα η κατανομή των σημείων μέτρησης ήταν ανά 0.5 cm μέχρι τα 4.0 cm και στο υπόλοιπο ανά 1.0 cm.



**Σχήμα 5.15α.** Προφίλ ταχύτητας στον άξονα σε δύο κατάντη θέσεις

Το Σχήμα 5.15 παρουσιάζει προφίλ (α) ταχύτητας και (β) διατμητικής τάσης για όλα τα πειράματα στον άξονα του καναλιού σε αποστάσεις 0,50 και 1,0 m κατάντη του τέλους της βλάστησης, δηλαδή μία και δύο φορές το πλάτος του καναλιού. Μια μείωση της ταχύτητας σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από το Exp1, όπου φαινομενικά η επίδραση αυτής της απλής και αραιής βλάστησης παύει σε μικρή απόσταση όσον αφορά το προφίλ ταχύτητας. Ωστόσο, οι διατμητικές τάσεις εξακολουθούν να είναι σημαντικά υψηλότερες στο Exp1 σε σύγκριση με το Exp0. Γενικά η επίδραση της βλάστησης

τόσο στην ταχύτητα όσο και στις διατμητικές τάσεις κατάντη είναι υψηλότερη για τα πιο ογκώδη και πυκνά τοποθετημένα στοιχεία. Παρατηρείται επίσης ότι υψηλές τυρβώδεις τάσεις επιμένουν κατάντη της περιοχής βλάστησης, παρά το γεγονός ότι η κύρια ταχύτητα έχει σχεδόν επιστρέψει στο προφίλ χωρίς βλάστηση. Σαφώς, η παρουσία βλάστησης, η γεωμετρία των στοιχείων και το μοτίβο τοποθέτησης παίζουν σημαντικό ρόλο στο πεδίο ροής σε μια κατάντη περιοχή, η έκταση της οποίας αξίζει περαιτέρω έρευνα.



**Σχήμα 5.15β.** Προφίλ διατμητικής τάσης στον άξονα σε δύο κατάντη θέσεις

Ακολούθως παρατίθενται ενδεικτικά διαγράμματα κατανομών ταχυτήτων από τα πειράματα Exp5, Exp6 και Exp0, για τις δυο κατάντη διατομές σε απόσταση 0.5 και 1.0 m (T1 και T2 αντίστοιχα) από την περιοχή βλάστησης (Σχήματα 5.16 έως 5.20). Φαίνονται οι καμπύλες ίσων ταχυτήτων (ισοταχείς), που παρήχθησαν με την βοήθεια του λογισμικού Surfer 7.0 βασισμένες σε όλα τα πειραματικά δεδομένα που ήταν εφικτό να μετρηθούν στις διατομές αυτές και δεν περιλαμβάνουν τις περιοχές 7.5 cm από τα πλευρικά τοιχώματα του καναλιού και την περιοχή με απόσταση περισσότερο από 19.0 cm πάνω από τον πυθμένα. Το Surfer 7.0 είναι ένα πρόγραμμα γραφικών που βασίζεται σε πλέγμα σημείων (κάνναβος) και παρεμβάλλει δεδομένα μέχρι και

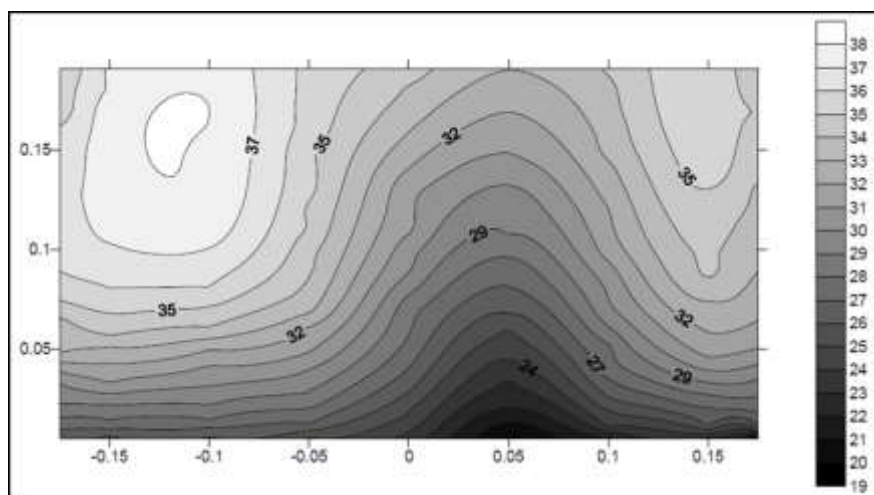


τριών διαστάσεων XYZ με ακανόνιστη απόσταση μετατρέποντας τα σε ένα πλέγμα σημείων με κανονισμένη απόσταση. Στη συνέχεια, το πλέγμα χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαφορετικών τύπων χαρτών, συμπεριλαμβανομένων χαρτών περιγράμματος και επιφανειακών χαρτών. Πολλές επιλογές πλέγματος και χαρτογράφησης είναι διαθέσιμες που επιτρέπουν να δημιουργηθεί ο χάρτης (ισοταχείς καμπύλες) που αντιπροσωπεύει καλύτερα τα διαθέσιμα δεδομένα. Οι ταχύτητες είναι σε cm/s και η διαβάθμιση τους φαίνεται στο πλαϊνό υπόμνημα ενώ οι διαστάσεις Y, Z είναι σε m όπου Y είναι η οριζόντια απόσταση κατά την εγκάρσια διεύθυνση από τον άξονα που τοποθετείται στο 0 ενώ το Z είναι η κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα.

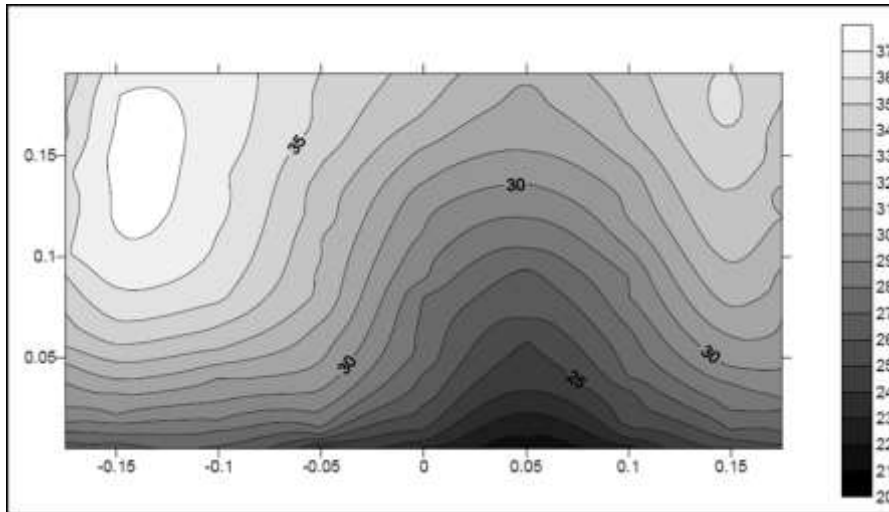
Γενικά στις διατομές αυτές παρατηρείται μια αύξηση των ταχυτήτων από τον πυθμένα και προς την επιφάνεια παρουσιάζοντας δυο περιοχές μεγίστων ταχυτήτων εκατέρωθεν του άξονα του καναλιού σε αποστάσεις που κυμαίνονται από 0.1 έως 0.15m. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν αισθητή εκτροπή από το αναμενόμενο. Συνήθως η διαμόρφωση της κατανομής της ταχύτητας στις διατομές παρουσιάζει μια περιοχή μεγίστων στον άξονα του καναλιού και προς την επιφάνεια και ταυτόχρονα μια σχετικά ομαλή μείωση προς τα πλευρικά τοιχώματα και τον πυθμένα με μηδενισμό της στα όρια αυτά αφού αφορά πραγματικά ρευστά. Αντίθετα, ακόμα και στο πείραμα χωρίς βλάστηση, εμφανίζονται δύο περιοχές μεγίστων που βρίσκονται εκατέρωθεν και σχεδόν συμμετρικά του άξονα του καναλιού με εμφανώς μεγαλύτερες τιμές στην περιοχή μεγίστων προς το αριστερό πλευρικό όριο κατά την κατεύθυνση της ροής. Πιθανές εξηγήσεις για τα αίτια αυτής της εκτροπής είναι ατέλειες της πειραματικής συσκευής (καναλιού), επίδραση των πλευρικών ορίων, δεδομένου ότι ο λόγος πλάτους προς βάθος νερού ( $B/H=2$ ) είναι σχετικά μικρός, πιθανή δημιουργία δευτερογενούς ροής ή και συνδυασμός αυτών. Συνεπακόλουθα μια άμεση αξιολόγηση των απολύτων μεγεθών των κατανομών ταχυτήτων των διατομών ήταν δύσκολη και έτσι επιχειρήθηκε η εξέταση της διαφοράς των αποτελεσμάτων μεταξύ πειραμάτων. Συγκεκριμένα, έγινε σε κάθε σημείο του πλέγματος αριθμητική αφαίρεση των τιμών των ταχυτήτων των δύο πειραμάτων για τα οποία γίνεται σύγκριση ώστε να προκύψει ένα νέο διάγραμμα από το οποίο θα μπορούσαν να προκύψουν κάποια συμπεράσματα για τη διαφοροποίηση της κατανομής μεταξύ των πειραμάτων. Έτσι, από την σύγκριση των πειραμάτων 5 και 0 για την διατομή T1 προκύπτει το διάγραμμα με την διαφορά τους (Σχ. 5.21) στο οποίο υπάρχει μια περιοχή στα χαμηλά της διατομής με αρνητικές τιμές που φανερώνει ότι οι τιμές της ταχύτητας για την ανεμπόδιστη ροή είναι μεγαλύτερες από αυτές στο πείραμα 5, κάτι που επιβεβαιώνει την επίδραση της βλάστησης στην κατάντη περιοχή προκαλώντας μείωση της ταχύτητας στο κατώτερο τμήμα της διατομής σαν να συνεχίζει να υπάρχει βλάστηση και στην θέση αυτή. Αντίθετα, στο ανώτερο κομμάτι η κατάσταση αντιστρέφεται και οι τιμές είναι θετικές δείχνοντας ότι οι ταχύτητες στο πείραμα 5 είναι μεγαλύτερες κάτι που συνάδει με την αρχή της συνέχειας αφού η ροή τείνει να αναπληρώσει την χαμένη ταχύτητα του κατώτερου τμήματος. Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να ειπωθούν και για τα υπόλοιπα

διαγράμματα διαφορών των πειραμάτων από τα οποία ενδεικτικά παρουσιάζονται τα Πειράματα 2,3 και 6 σε σχέση με το Πείραμα 0. Το διάγραμμα διαφορών των πειραμάτων 6 και 0(Σχ. 5.22) ομοιάζει αρκετά με το αντίστοιχο του Πειράματος 5. Αντίθετα το διάγραμμα διαφορών των πειραμάτων 2 και 0 (Σχ. 5.23) έχει αρκετά ομοιόμορφη εξέλιξη των ισοταχών καμπύλων και συμμετρική ως προς τον άξονα του καναλιού με την παρουσία μιας περιοχής μεγίστων κοντά στα 0.05m αριστερά από τον άξονα κατά την φορά της ροής και κοντά στον πυθμένα. Επιπλέον στο διάγραμμα διαφορών των πειραμάτων 3 και 0 (Σχ. 5.24) ενισχύεται αυτή η τάση με την περιοχή μεγίστων να μετατοπίζεται ακόμα πιο αριστερά αλλά να εκτείνεται σε μεγαλύτερη περιοχή καθ' ύψος αρκετά μακριά από τον πυθμένα. Τέλος, επιχειρήθηκε η σύγκριση μεταξύ των τριών πειραμάτων με το κλιμακωτό μοτίβο μεταξύ τους, με την ίδια μέθοδο των διαφορών έχοντας ως βάση σύγκρισης το πείραμα 6 (Σχ. 5.25, 5.26). Από τα αντίστοιχα σχήματα εξάγονται παρόμοιες παρατηρήσεις δείχνοντας ότι η επίδραση της βλάστησης στην περίπτωση του πειράματος 6 είναι εντονότερη από τις άλλες δύο όπως προκύπτει από τις διαφορές των ταχυτήτων καθώς σε αυτό οι μετρημένες τιμές ήταν οι μικρότερες σε σχέση με τα άλλα δυο πειράματα (2 και 4). Επιπρόσθετα, τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες στην εξέλιξη και κατανομή των καμπύλων δείχνοντας την παρόμοια επίπτωση της συγκεκριμένης τοποθέτησης της βλάστησης στην περιοχή κατάντη.

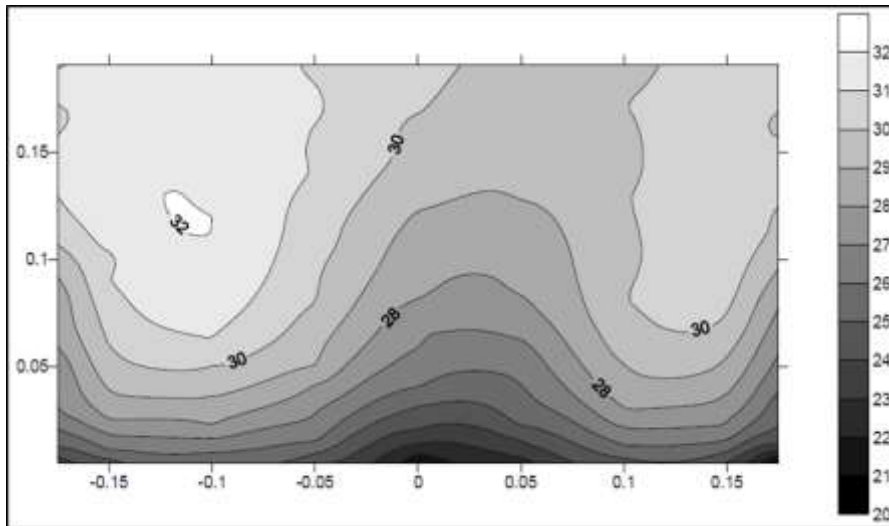
Συμπερασματικά, παρόλο που η παρούσα προσπάθεια δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ολοκληρωμένη λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν, εν τούτοις καταδεικνύει με σαφήνεια την επίδραση της βλάστησης στην περιοχή κατάντη αυτής φανερώνοντας την σημασία της περαιτέρω διερεύνησης αυτής της περιοχής σε μελλοντική έρευνα.



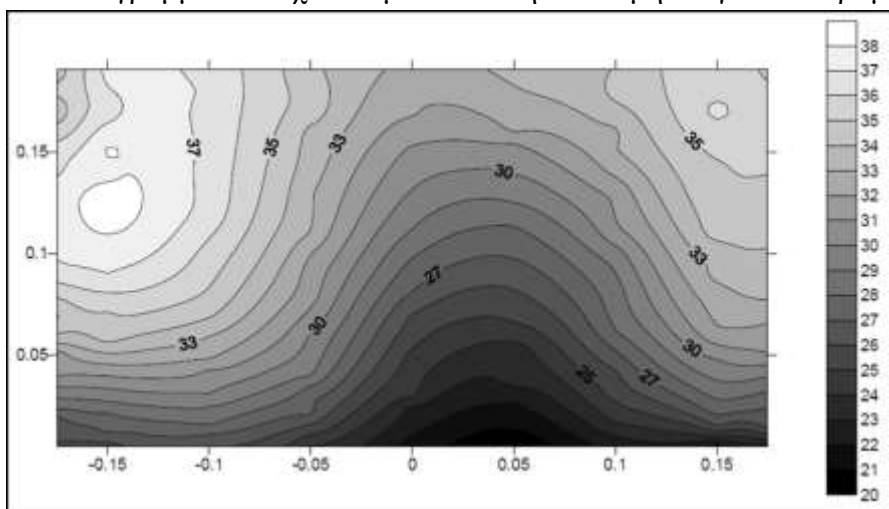
**Σχήμα 5.16.** Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για το πείραμα exp5



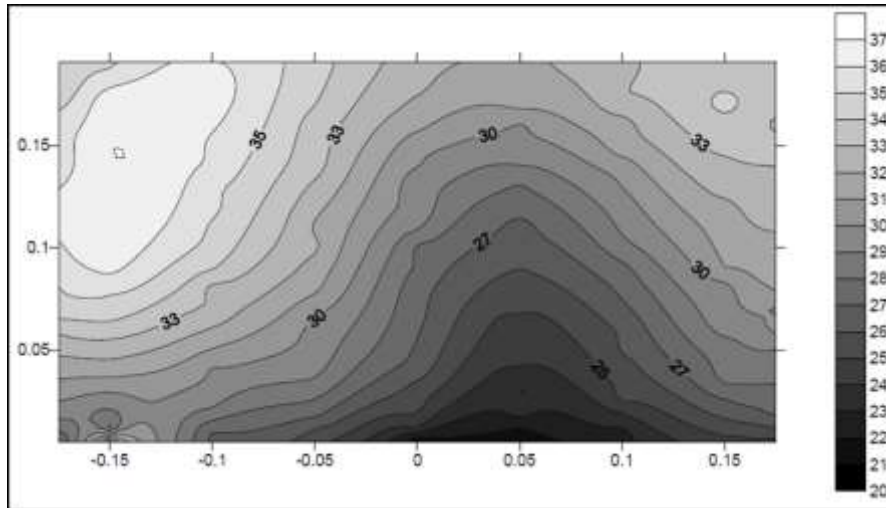
Σχήμα 5.17. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T2 για το πείραμα exp5



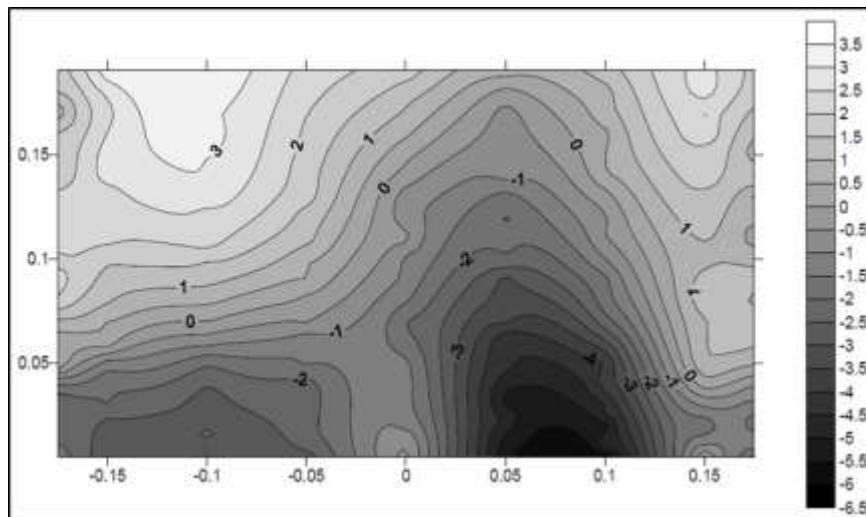
Σχήμα 5.18. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για το πείραμα exp0



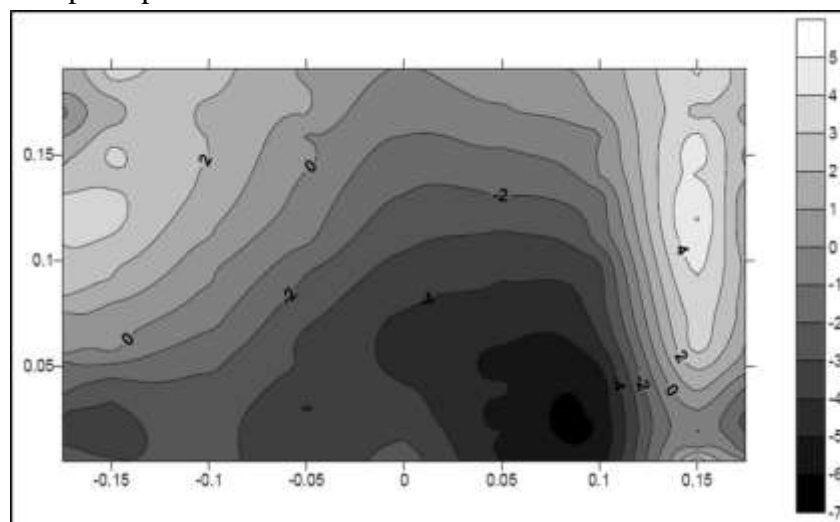
Σχήμα 5.19. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για το πείραμα exp6



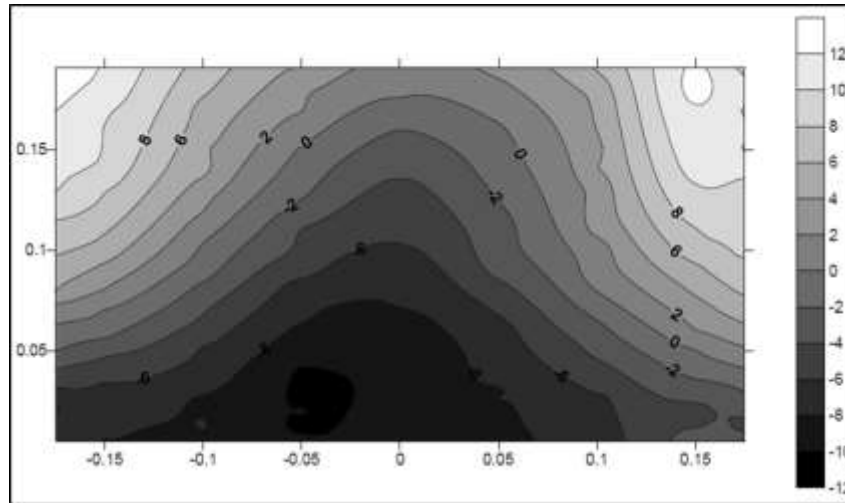
Σχήμα 5.20. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T2 για το πείραμα exp6



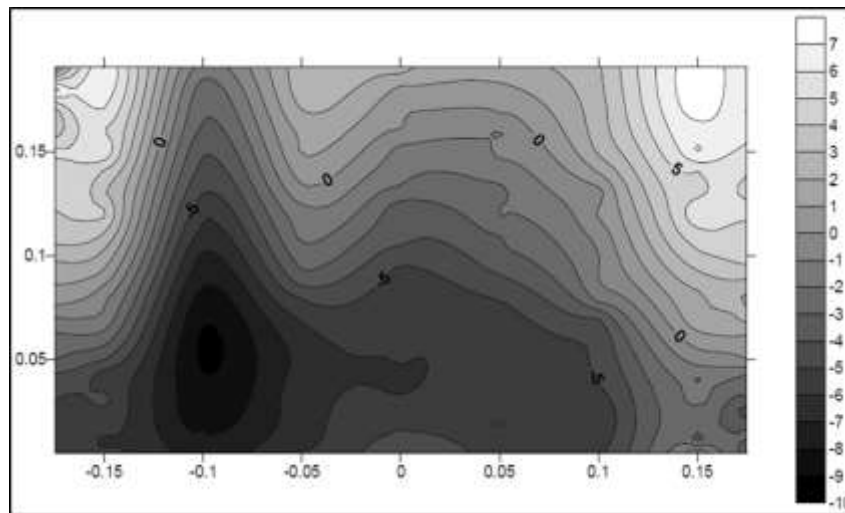
Σχήμα 5.21. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων exp5-exp0



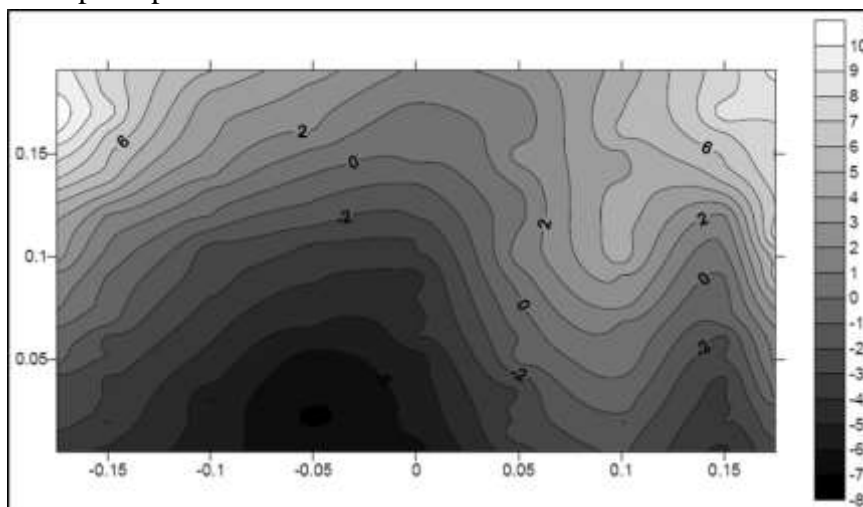
Σχήμα 5.22. Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων exp6-exp0



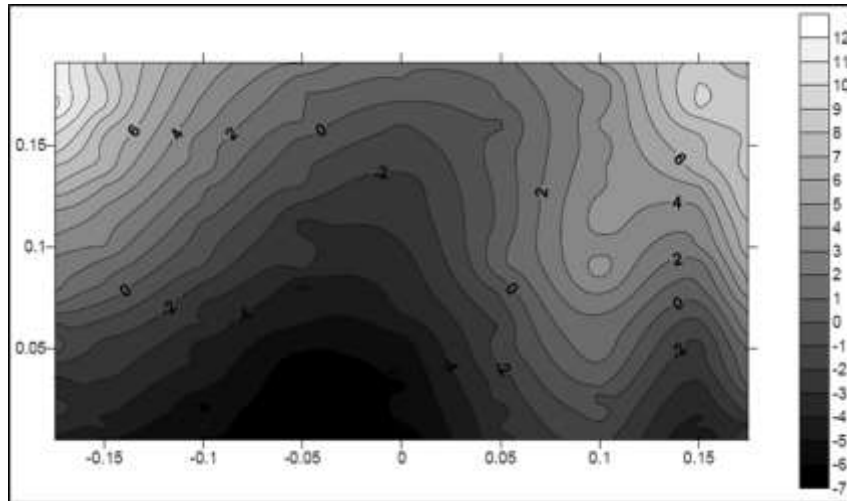
**Σχήμα 5.23.** Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων  $\text{exp2-exp0}$



**Σχήμα 5.24.** Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων  $\text{exp3-exp0}$



**Σχήμα 5.25.** Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων  $\text{exp4-exp6}$



**Σχήμα 5.26.** Διάγραμμα ισοταχών καμπύλων στην διατομή T1 για την διαφορά των πειραμάτων  $\text{exp2-exp6}$

## 6) Μοντέλα κατανομής ταχυτήτων

### 6.1. Γενική επισκόπηση μοντέλων

Η κατανομή της ταχύτητας σε ανοιχτό κανάλι παρουσία βλάστησης έχει ερευνηθεί εκτενώς. Αν και έχουν προταθεί πολλά μαθηματικά μοντέλα, ένα παγκοσμίως αποδεκτό μοντέλο είναι ακόμα ανέφικτο. Επιπλέον, δεν έχει γίνει πολλή δουλειά συγκρίνοντας διαφορετικά μοντέλα με πραγματικά πειραματικά δεδομένα. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι προσέγγισης για ροές με βλάστηση.

Όταν η βλάστηση (είτε άκαμπτη είτε εύκαμπτη) είναι βυθισμένη, η κορυφή της συστάδας ορίζει σαφώς μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρωμάτων, πάνω και εντός της βλάστησης. Με βάση αυτή την ιδέα, αρκετοί ερευνητές πρότειναν μοντέλα δύο στρωμάτων με εμπειρικές εξισώσεις που περιγράφουν την κατανομή της ταχύτητας και αξιολόγησαν τις σχετικές παραμέτρους συγκρίνοντας με πειραματικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι Klopstra et al. (1997) ανέπτυξαν ένα αναλυτικό, φυσικό μοντέλο του κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας, εφαρμόζοντας διαφορετικά μοντέλα τύρβης για το στρώμα βλάστησης και το επιφανειακό στρώμα. Οι Huthoff et al. (2007) περιέγραψαν τη ροή πάνω και μέσα από το στρώμα βλάστησης χωριστά και πρότειναν ένα μοντέλο για τη γρήγορη αξιολόγηση της υδραυλικής απόκρισης ενός ποταμού σε περιπτώσεις με βλάστηση πλημμυρικών κοιτών. Οι Righetti και Armanini (2002) διεξήγαγαν πειράματα σε ένα κανάλι με αραιά διατεταγμένους θάμνους που προσομοιώνονται με σφαίρες και πρότειναν ένα μοντέλο δύο στρωμάτων που αποτελείται από ένα λογαριθμικό προφίλ στο ανώτερο στρώμα χωρίς βλάστηση και ένα προφίλ εκθετικού νόμου στο φυτικό στρώμα. Οι Huai et al. (2013) χρησιμοποιώντας το προβλεπόμενο (από τη θεωρία προβόλου μεγάλης απόκλισης) ύψος της εύκαμπτης βλάστησης μετά τον ανασχηματισμό της εξαιτίας της εκτροπής των στοιχείων της από την αρχική θέση τους, διαχώρισαν τη ροή σε ένα στρώμα βλάστησης πυθμένα και ένα ανώτερο στρώμα ελεύθερης κίνησης νερού και διατύπωσαν εξισώσεις ορμής για κάθε στρώμα.

Από την άλλη πλευρά, μια προσέγγιση τριών στρωμάτων έχει υιοθετηθεί από πολλούς άλλους ερευνητές. Σύμφωνα με τους Shi και Hughes (2002), το προφίλ ταχύτητας μπορεί χονδρικά να χωριστεί σε τρεις υδροδυναμικές ζώνες: μία εντός της συστάδας, μία πάνω από την συστάδα και μία ενδιάμεση μεταβατική. Στην πραγματικότητα, στη διεπιφάνεια μεταξύ του φυτικού στρώματος και του ανώτερου ανεμπόδιστου στρώματος, αναπτύσσεται ένα στρώμα διάτμησης, όπως συζητήθηκε από τη Nepf (2012) και από τους Ghisalberti και Nepf (2002). Επιπλέον, οι Nepf και Vivoni (2000) προσδιόρισαν δύο περιοχές μέσα στη βλάστηση, δηλαδή το πάνω μέρος της συστάδας όπου η κατακόρυφη τυρβώδης ανταλλαγή με την ελεύθερη ανεμπόδιστη ζώνη είναι δυναμικά σημαντική για την ισορροπία της ορμής, ενώ στο κάτω μέρος της συστάδας, η διαμήκης μετατόπιση είναι κυρίαρχη, και η ισορροπία ορμής είναι μια ισορροπία της οπισθέλκουσας της βλάστησης και της κλίσης πίεσης.

Οι Carollo et al. (2002) πρότειναν μια ενιαία εξίσωση για ολόκληρη τη στήλη νερού, που χαρακτηρίζεται από ένα σημείο καμπής στην κορυφή της συστάδας και τείνει ασυμπτωτικά στη μέγιστη και την ελάχιστη ταχύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα, αντίστοιχα. Οι Ghisalberti και Nepf (2002) πρότειναν επίσης ένα ενιαίο προφίλ ταχύτητας αλλά με το σημείο καμπής χαμηλότερα από την κορυφή της συστάδας κατά μια ποσότητα που σχετίζεται με το πάχος ποσότητας κίνησης  $\theta$ , δηλ. το βάθος στο οποίο φθάνει η ορμή του στρώματος ανάμειξης. Μπορεί να σημειωθεί ότι η ύπαρξη ενός σημείου καμπής δεν παρατηρείται πάντοτε, π.χ., για χαμηλές πυκνότητες βλάστησης (Nepf 2012a). Οι Huai et al. (2009) έδειξαν ότι το προφίλ ταχύτητας αποτελείται από τρία υδροδυναμικά καθεστώτα και υιοθετούν διαφορετικές μεθόδους για κάθε στρώμα για να περιγράψουν την κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας. Οι Chen et al. (2011) μελέτησαν διάφορα μοτίβα εύκαμπτων δεσμίδων βλάστησης και πρότειναν ένα μοντέλο τριών στρωμάτων, με διαφορετικές λογαριθμικές εξισώσεις που εκφράζουν την κατανομή της ταχύτητας σε κάθε στρώμα ανάλογα επίσης με τις διαφορετικές θέσεις μέτρησης. Οι Li et al. (2014) χρησιμοποίησαν νέες μαθηματικές εκφράσεις για να εκφράσουν διακυμάνσεις στο προφίλ ταχύτητας, στον συντελεστή Manning και στην παροχή για διάφορες πυκνότητες βλάστησης.

Παρά τις εννοιολογικές διαφορές στην προσέγγιση των προηγούμενων εργασιών, υπάρχει κυρίαρχη συμφωνία ότι η κατανομή της ταχύτητας πάνω από την συστάδα της βλάστησης ακολουθεί ικανοποιητικά έναν λογαριθμικό νόμο παρόμοιο με τον γνωστό νόμο Prandtl–von Karman (1-4) σε ένα οριακό στρώμα. Παραλλαγές αυτού του νόμου που ισχύουν για κανάλια με βλάστηση έχουν προταθεί από τους Stephan and Gutknecht (2002), Liu et al. (2008) και άλλους, αλλά η απλούστερη και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή είναι [Klopstra et al. (1997), Shi and Hughes (2002), Ghisalberti and Nepf (2002)] εκείνη της εξίσωσης (2-6), δηλαδή:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (6-1)$$

όπου  $u$  = η τοπική ταχύτητα στο ύψος  $z$ ,  $u_*$  = η ταχύτητα τριβής,  $\kappa = 0,4$  σταθερά von Karman,  $d$  = η απόσταση του επιπέδου μηδενικής ταχύτητας από τον πυθμένα και  $z_0$  = το ύψος της τραχύτητας. Η εξίσωση (6-1) χρησιμοποιείται επίσης συχνά για το προφίλ ταχύτητας της ροής αέρα πάνω από τις επίγειες συστάδες βλάστησης, π.χ. όπως περιγράφεται από τον Raupach (1992,1994). Αρκετοί ερευνητές έχουν προτείνει τρόπους εκτίμησης των παραμέτρων της Εξίσωσης (6-1), συγκεκριμένα των  $u_*$ ,  $d$  και  $z_0$ , ανάλογα με ορισμένα χαρακτηριστικά της συστάδας που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Κάτω από την κορυφή της βλάστησης, η ροή είναι εξαιρετικά ετερογενής και φαίνεται να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα, το σχήμα και την ακαμψία των στοιχείων της βλάστησης, τη σχετική βύθιση κ.λπ., ενώ στην περίπτωση φυτών που αποτελούνται από τμήματα μίσχου και φύλλων, η κατανομή μπορεί να παρουσιάζει ελάχιστο περίπου στο επίπεδο του φυλλώματος (Chen et al.



2011). Επομένως, η πρόταση ενός μοντέλου ενιαίας κατανομής ταχύτητας είναι πιο δύσκολη.

Οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες εργασίες βασίζονται σε πειραματικές μετρήσεις. Ωστόσο, υπάρχουν λίγες πληροφορίες σχετικά με τη χωρική μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών ροής μέσα στη βλάστηση και την επίδραση του τύπου/γεωμετρίας των στοιχείων της βλάστησης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι περισσότερες από τις προηγούμενες μελέτες βασίζονται είτε σε έναν μεμονωμένο τύπο στοιχείου είτε έχουν αναφέρει αποτελέσματα ως χωρικούς μέσους όρους ή μόνο στον άξονα του καναλιού. Για παράδειγμα, οι Fairbanks (1998) και Liu et al. (2008) ανέφεραν λεπτομερείς μετρήσεις ταχύτητας σε έξι θέσεις σε μια συστοιχία κυλινδρικών στοιχείων σε παράλληλη και κλιμακωτή διάταξη. Οι Dunn et al. (1996) παρουσίασαν τα μέσα χωρικά και χρονικά προφίλ για άκαμπτους και εύκαμπτους κυλίνδρους σε κλιμακωτή διάταξη. Οι Righetti & Armanini (2002) ανέφεραν επίσης μέσα προφίλ για μια σειρά τεχνητών θάμνων, ενώ οι Shi & Hughes (2002), Chen et al. (2011) και Li et al. (2014) χρησιμοποίησαν πραγματική ή τεχνητή βλάστηση και παρουσίασαν αποτελέσματα μόνο σε θέσεις κατά μήκος του άξονα του καναλιού. Ωστόσο, πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 δείχνουν ότι η κατανομή της ταχύτητας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα όχι μόνο με τον τύπο (γεωμετρία) του στοιχείου αλλά επίσης με τη θέση μέσα στη συστοιχία βλάστησης. Τέτοιες λεπτομέρειες μπορεί να είναι σημαντικές όσον αφορά τις τοπικές διαδικασίες μεταφοράς και τον οικολογικό βιότοπο και, ως εκ τούτου, αξίζουν περαιτέρω έρευνα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στόχος της παρούσας ενότητας είναι να διερευνήσει περαιτέρω την κατανομή της ταχύτητας σε κανάλια με βυθισμένη βλάστηση, μελετώντας ποσοτικά τις διακυμάνσεις στις σχετικές παραμέτρους για διαφορετικές γεωμετρίες ή πυκνότητες στοιχείων βλάστησης, καθώς και τη χωρική διακύμανση των προφίλ εντός και πάνω από τη βλάστηση, ανάλογα με τη θέση στη συστοιχία βλάστησης. Ως εκ τούτου, ακολούθως θα παρουσιαστούν αναλυτικά κάποια χαρακτηριστικά μοντέλα από τα προαναφερθέντα σε σύγκριση με τα πειράματα της παρούσας εργασίας και τέλος θα γίνει πρόταση για ένα νέο μοντέλο για σύνθετα στοιχεία βλάστησης.

## 6.2. Κατανομή ταχύτητας πάνω από τη βλάστηση

Για την κατανομή ταχύτητας πάνω από τη βλάστηση, ο Raupach (1994) μελέτησε την εφαρμογή της Εξίσωσης (6-1) πάνω από επίγειες συστάδες, θεωρώντας το ύψος  $h$  των στοιχείων βλάστησης και την μετωπική πυκνότητα  $\lambda$  ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Βρήκε ότι ο λόγος της ταχύτητας  $u_h$  στην κορυφή της συστάδας προς την ταχύτητα τριβής  $u^*$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\gamma = u_h/u^* = \exp(c\lambda\gamma/2)(C_S + C_R\lambda)^{-0.5} \quad (6-2)$$

όπου  $c$ ,  $C_S$  και  $C_R$  είναι αριθμητικές σταθερές με προτεινόμενες τιμές  $c = 0,5$ ,  $C_S = 0,003$  και  $C_R = 0,3$ . Η εξίσωση (6-2) απαιτεί μια επαναληπτική λύση για να υπολογιστεί το  $u_h/u^*$ . Επιπλέον, πρότεινε τις ακόλουθες εξισώσεις για τη στάθμη μηδενικής ταχύτητας  $d$  και το ύψος τραχύτητας  $z_0$ :

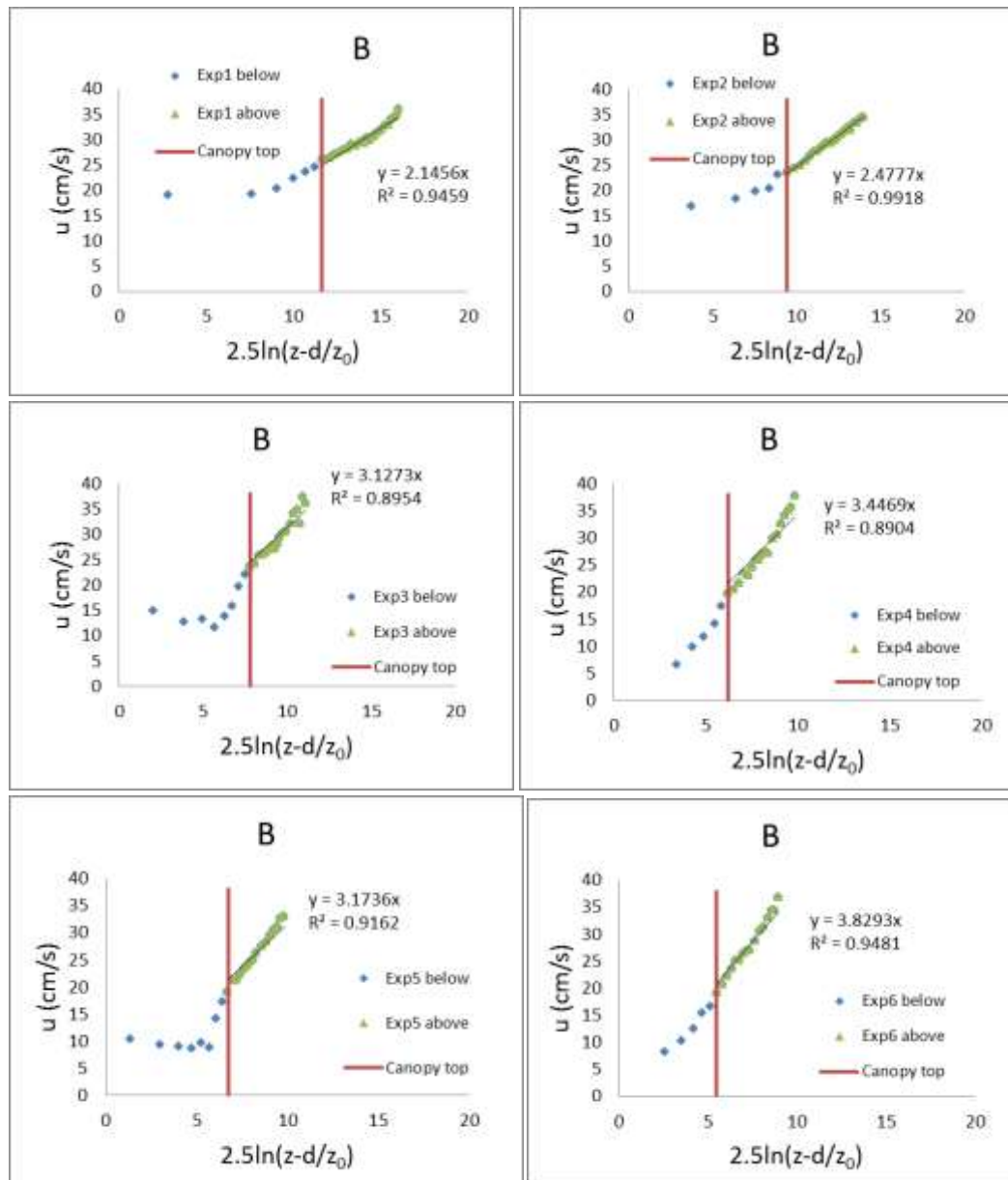
$$z_0/h = (1 - d/h)\exp(-\kappa u_h/u^* - \Psi_h) \quad (6-3)$$

$$1 - d/h = [1 - \exp(-(c_{d1}2\lambda)^{0.5})]/(c_{d1}2\lambda)^{0.5} \quad (6-4)$$

όπου  $\kappa = 0,4$  είναι η σταθερά von Karman, και  $\Psi_h$  και  $c_{d1}$  είναι αριθμητικές σταθερές, με προτεινόμενες τιμές  $\Psi_h = 0,193$  και  $c_{d1} = 7,5$ .

Η προσέγγιση του Raupach εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης ως εξής: Πρώτον, για κάθε σύνολο πειραμάτων, οι τιμές των  $u_h/u^*$ ,  $d$  και  $z_0$  υπολογίστηκαν με βάση τις Εξισώσεις (6-2), (6-3) και (6-4) σύμφωνα με την αντίστοιχη τιμή του  $\lambda$  που φαίνεται στον Πίνακα 5-1. Στη συνέχεια, ο λογαριθμικός νόμος (Εξίσωση (6-1)) προσαρμόστηκε στις μετρήσεις ταχύτητας για  $z > h$  σε κάθε θέση μέτρησης. Έτσι, η τοπική τιμή του  $u^*$  λήφθηκε ως η κλίση της γραμμής προσαρμογής σε ένα ημι-λογαριθμικό διάγραμμα. Γενικά, παρατηρήθηκε πολύ καλή προσαρμογή, επιβεβαιώνοντας έτσι την εγκυρότητα της Εξίσωσης (6-1). Μάλιστα, σε αρκετές περιπτώσεις, η δυνατότητα εφαρμογής της Εξίσωσης (6-1) φάνηκε να εκτείνεται κάτω από την κορυφή της συστάδας. Για παράδειγμα, τα διαγράμματα για τη θέση B για όλα τα πειράματα φαίνονται στο Σχήμα 6.1.

Οι τιμές του  $u^*$  για όλα τα πειράματα και τις θέσεις, καθώς και αυτές των  $d$  και  $z_0$ , παρατίθενται στον Πίνακα 6-1. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι: (α) για οποιαδήποτε δεδομένη θέση, οι τιμές του  $u^*$  είναι σημαντικά μεγαλύτερες για τα σύνθετα στοιχεία σε σύγκριση με τις απλές ράβδους καθώς και για την κλιμακωτή (πιο πυκνή) διάταξη σε σύγκριση με την παράλληλη, (β) οι τιμές του  $u^*$  για τους δύο τύπους σύνθετων στοιχείων είναι περίπου ίδιες για το μοτίβο αραιής (παράλληλης) τοποθέτησης, αν και η μετωπική πυκνότητα  $\lambda$  είναι αισθητά διαφορετική, (γ) οι τιμές των  $d$  και  $z_0$  είναι επίσης μεγαλύτερες για τα σύνθετα στοιχεία, αλλά διαφέρουν αισθητά μεταξύ των δύο τύπων σύνθετων στοιχείων και (δ) για ένα δεδομένο πείραμα, μπορούν να προσδιοριστούν τρεις ομάδες σχεδόν πανομοιότυπων τιμών  $u^*$  σε θέσεις κατά μήκος γραμμών παράλληλων προς την ευθυγράμμιση των στοιχείων, δηλαδή στα (A,B,C), (D,E,F) και (G,H,I), υποδηλώνοντας μια πλευρική διαφοροποίηση της διάτμησης που προσφέρει η συστάδα στο ανώτερο στρώμα χωρίς βλάστηση.



**Σχήμα 6.1.** Προσαρμογή της εξίσωσης (6-1) στα παρόντα δεδομένα πάνω από την κορυφή της συστάδας στη θέση B για όλα τα πειράματα σύμφωνα με την προσέγγιση του Raupach (1994).

Η Nepf (2012 b), σε μια ανασκόπηση σχετικών προηγούμενων εργασιών, εξέτασε την εφαρμογή της εξίσωσης (6-1) για υδρόβιες συστοιχίες βλάστησης και πρότεινε τις ακόλουθες εξισώσεις για τον υπολογισμό των κύριων παραμέτρων  $u^*$ ,  $d$  και  $z_0$ :

$$u^* = [gS(H - h)]^{0.5} \quad (6-5)$$

$$d/h = 1 - (0,1/C_D \lambda) \quad (6-6)$$

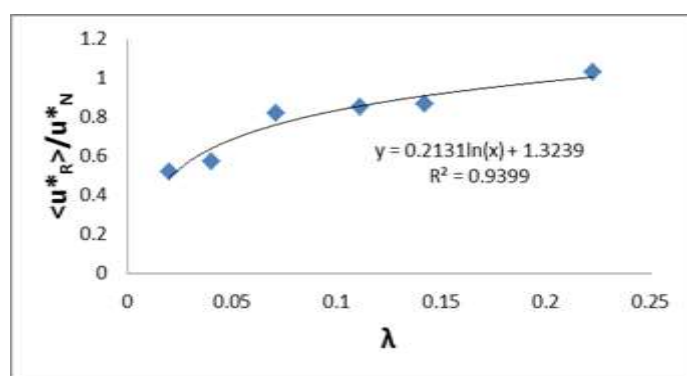
$$z_0/h \approx C_D \lambda; \text{ για } \lambda < 0,1 \quad (6-7a)$$

$$z_0/h = (0,04 \pm 0,02)\lambda^{-1} \quad \text{για } \lambda > 0,1 \quad (6-7b)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $S$  είναι το άθροισμα των κλίσεων του πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας και το  $C_D$  είναι ένας συντελεστής οπισθέλκουσας τάξης 1. Προφανώς, η εξίσωση (6-6) ισχύει για  $\lambda > 0,1$ , ενώ το  $d$  εξαφανίζεται για  $\lambda \leq 0,1$ , συνεπώς η Nepf (2012a) σημείωσε ότι, για χαμηλή πυκνότητα βλάστησης ( $\lambda < 0,1$ ), δεν υπάρχει σημείο καμπής στο προφίλ ταχύτητας, το οποίο τείνει να ακολουθεί τον ίδιο λογαριθμικό νόμο εντός και πάνω από τη βλάστηση. Με βάση τις Εξισώσεις (6-5 έως 6-7), οι τιμές των  $d$ ,  $z_0$  και  $u^*$  υπολογίστηκαν για κάθε πείραμα και παρατίθενται επίσης στον Πίνακα 6-1. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με αυτές που προέκυψαν από το μοντέλο του Raupach, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Συγκεκριμένα, οι τιμές  $u^*$  από την Εξίσωση (6-5) είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές του Raupach για τα πειράματα με απλούς μίσχους, μειώνονται ελαφρώς για τα σύνθετα στοιχεία και είναι ανεξάρτητα από τη διάταξη/πυκνότητα για έναν δεδομένο τύπο στοιχείου. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην εκτίμηση του  $u^*$  που βασίζεται αποκλειστικά στο βάθος ( $H-h$ ) του ανώτερου στρώματος χωρίς βλάστηση, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι, στα παρόντα πειράματα, το βάθος ροής  $H$  ελέγχεται τεχνητά αντί να είναι φυσικά καθορισμένο από τη ροή μέσω της συστάδας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μια πιο ακριβής εκτίμηση με βάση την διαφορά ( $H-d$ ) θα παρήγαγε μόνο μια οριακή διαφορά ή καμία διαφορά στην παρούσα περίπτωση. Η διακύμανση του λόγου  $\langle u^*_R \rangle / u^*_N$ , όπου  $\langle u^*_R \rangle$  υποδηλώνει τη μέση τιμή όλων των θέσεων για ένα δεδομένο πείραμα σύμφωνα με το μοντέλο του Raupach και το  $u^*_N$  υποδηλώνει την τιμή που προκύπτει από το μοντέλο της Nepf (δηλ. εξίσωση (6-5)), με τον δείκτη μετωπικής πυκνότητας  $\lambda$ , απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Μια καλή συσχέτιση μπορεί να παρατηρηθεί, με σταδιακή αύξηση του λόγου της ταχύτητας διάτμησης με αύξηση του  $\lambda$  στο εύρος που μελετήθηκε.

**Πίνακας 6-1.** Βασικές παράμετροι των μοντέλων Raupach και Nepf για τα παρόντα πειράματα.

|      | Raupach (1994) |                     |           |      |      |      |      |      |      |      | Nepf (2012b) |        |                     |           |
|------|----------------|---------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|--------|---------------------|-----------|
|      | d (cm)         | z <sub>0</sub> (cm) | u* (cm/s) |      |      |      |      |      |      |      |              | d (cm) | z <sub>0</sub> (cm) | u* (cm/s) |
| Exp1 | 0.92           | 0.029               | 2.19      | 2.15 | 2.16 | 2.39 | 2.42 | 2.37 | 2.49 | 2.40 | 2.48         | 0      | 0.08                | 4.54      |
| Exp2 | 1.22           | 0.065               | 2.47      | 2.48 | 2.47 | 2.56 | 2.59 | 2.51 | 2.77 |      | 2.71         | 0      | 0.16                | 4.54      |
| Exp3 | 2.63           | 0.194               |           | 3.13 |      | 3.30 | 3.33 | 3.34 | 3.61 | 3.61 | 3.61         | 0      | 0.50                | 4.20      |
| Exp4 | 3.32           | 0.306               |           | 3.45 |      | 3.52 | 3.59 | 3.53 | 3.80 |      | 3.80         | 1.58   | 1.97                | 4.20      |
| Exp5 | 3.50           | 0.305               |           | 3.17 |      | 3.34 | 3.33 | 3.33 | 3.61 | 3.65 | 3.64         | 0.07   | 2.88                | 4.08      |
| Exp6 | 4.32           | 0.411               |           | 3.83 |      | 4.04 | 4.07 | 4.09 | 4.45 |      | 4.48         | 4.06   | 1.44                | 4.08      |



**Σχήμα 6.2.** Μεταβολή του  $\langle u^*_R \rangle / u^*_N$  με το  $\lambda$ .

Από την παραπάνω διερεύνηση συνάγεται ότι η λογαριθμική κατανομή που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Raupach (1994) για τη ροή πάνω από τις επίγειες συστάδες είναι ικανή να περιγράψει καλά το προφίλ ταχύτητας στο στρώμα πάνω από την υδρόβια βλάστηση, με κατάλληλο προσδιορισμό των παραμέτρων της. Διαπιστώθηκε ότι αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τον τύπο και την πυκνότητα των στοιχείων της βλάστησης και επίσης από τη σχετική θέση σε σχέση με την ευθυγράμμιση των στοιχείων. Αντίθετα, το μοντέλο της Nepf (2012b), αν και ακολουθεί την ίδια λογική, δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην παρούσα περίπτωση όπου το βάθος ροής είναι ελεγχόμενο και όχι διαμορφούμενο από τη ροή.

### 6.3. Ενιαία κατανομή ταχύτητας

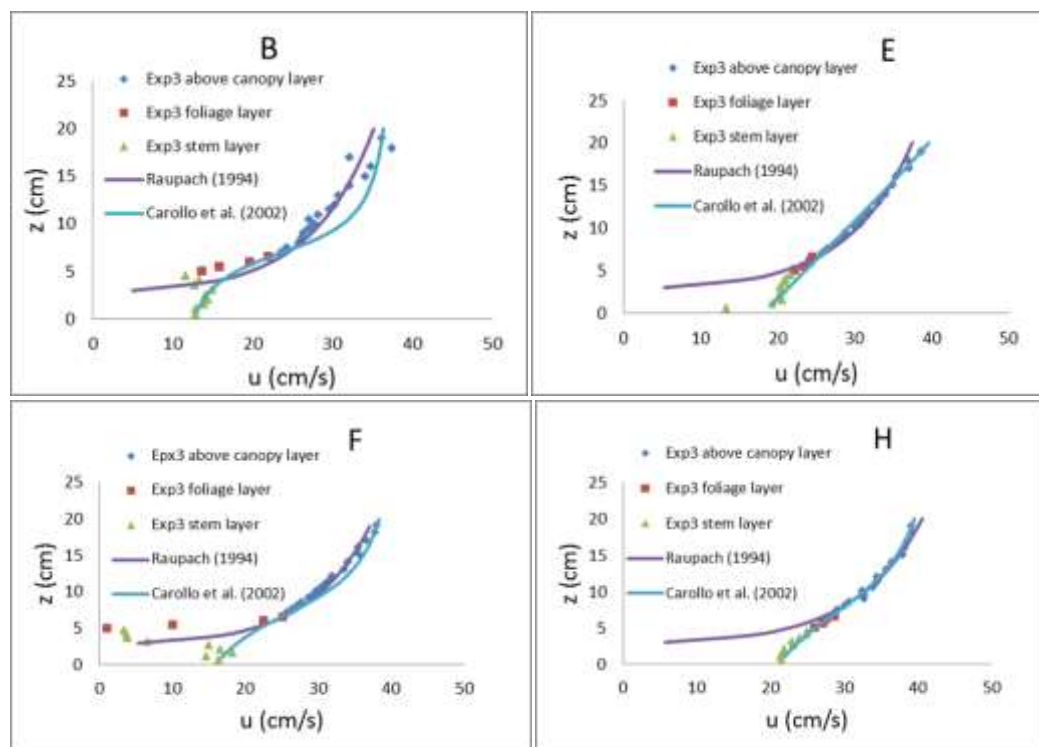
Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω, για την κατανομή ταχύτητας εντός και πάνω από τη βλάστηση έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την καθιέρωση αναλυτικών εκφράσεων της κατανομής της ταχύτητας είτε σε ξεχωριστά στρώματα, όπως π.χ. από τους Righetti & Armanini (2002), Huthoff et al. (2007), Huai et al. (2009), Chen et al. (2011), είτε σε ολόκληρη τη στήλη νερού, π.χ. από τους Carollo et al. (2002), Nepf (2012b). Κατ' αρχήν, το προφίλ ταχύτητας εντός του στρώματος βλάστησης αναμένεται να εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης. Ειδικότερα, για ανομοιομορφα κατά το ύψος στοιχεία βλάστησης, έχει παρατηρηθεί ότι το προφίλ

περιέχει ένα τμήμα που μοιάζει με αριστερή παρένθεση "(", με ελάχιστο στο επίπεδο του μέγιστου μετωπικού πλάτους (Li et al. 2014). Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη, επιχειρήθηκε η εφαρμογή μιας ενιαίας κατανομής προκειμένου να αποκαλυφθεί η έκταση της επιρροής της γεωμετρίας του στοιχείου σε διαφορετικές θέσεις μέσα στη βλάστηση. Επιλέχθηκε ένα σχετικά απλό μοντέλο, που παρουσιάστηκε από τους Carollo et al. (2002), στο οποίο προτείνεται η ακόλουθη μορφή:

$$u/u^* = b_0 + b_1 \arctan((Y - \alpha_1)/\alpha_2) \quad (6-8)$$

όπου  $Y = z/h$ ,  $\alpha_1 = h/H$ . Το προφίλ της εξίσωσης (6-8) προϋποθέτει ένα σημείο καμπής που βρέθηκε ότι συμπίπτει με την κορυφή της συστάδας. Επομένως, η σταθερά  $b_0 = u_h/u^*$ . Οι συντελεστές  $\alpha_2$  και  $b_1$  σχετίζονται με την κλίση της κατανομής και τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης ταχύτητας κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια και στον πυθμένα του καναλιού, αντίστοιχα. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στην παρούσα περίπτωση με τον προσδιορισμό των τιμών των σταθερών, με βάση τις μετρηθείσες ταχύτητες στην κορυφή του στοιχείου και στο μέγιστο και ελάχιστο ύψος  $z$ .

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης της μετρούμενης κατανομής ταχύτητας με την Εξίσωση (6-8) σε ορισμένες θέσεις μέτρησης για το πείραμα 3 (B, E, F και H) φαίνονται στο Σχήμα 6.3. Τα πειραματικά δεδομένα επισημαίνονται διαφορετικά για το κατώτερο (μίσχος), το ενδιάμεσο (φύλλωμα) και το άνω στρώμα (πάνω από την συστάδα). Στο ίδιο σχήμα, φαίνεται επίσης το λογαριθμικό προφίλ που λήφθηκε προηγουμένως κατά τη μέθοδο του Raupach (1994). Διαπιστώνεται ότι η εξίσωση (6-8) ταιριάζει πολύ καλά με τα δεδομένα σε ολόκληρη τη στήλη νερού στις θέσεις E και H, στις οποίες υπάρχει σταδιακή μείωση της ταχύτητας προς τον πυθμένα. Ωστόσο, αδυνατεί να περιγράψει την κατανομή της ταχύτητας μέσα στη βλάστηση στις θέσεις B και F, στις οποίες η ελάχιστη ταχύτητα εμφανίζεται στο ενδιάμεσο στρώμα φυλλώματος. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι το λογαριθμικό προφίλ (Εξίσωση (6-1)) που λαμβάνεται για το ανώτερο στρώμα περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά την πραγματική ταχύτητα και σε ένα μέρος του στρώματος φυλλώματος σε όλες τις θέσεις.

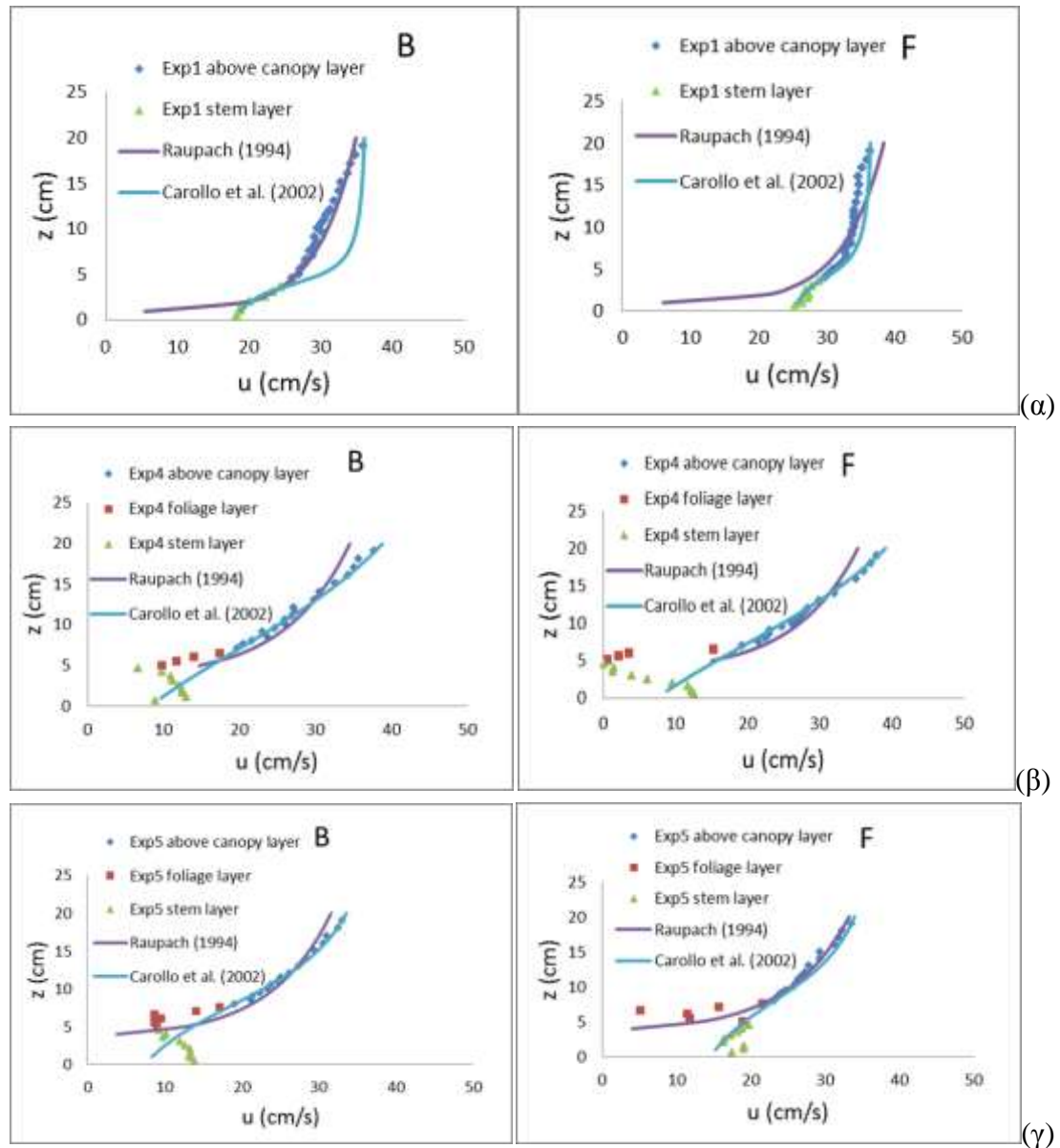


**Σχήμα 6.3.** Δεδομένα κατανομής ταχύτητας για το Exp3, σε σύγκριση με τις εξισώσεις των Raupach (1994) και Carollo et al. (2002)

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις θέσεις B και F για τα πειράματα 1, 4 και 5 παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4, έτσι ώστε να απεικονιστούν οι διαφορές λόγω του τύπου του στοιχείου και της πυκνότητας της βλάστησης. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι, για την πιο πυκνή διάταξη (πείραμα 4), καθώς και για τα σύνθετα άκαμπτα στοιχεία (πείραμα 5), η προσαρμογή της εξίσωσης (6-8) είναι μάλλον κακή στα B και F, παρόμοια με το πείραμα 3. Ωστόσο, στην περίπτωση απλών στοιχείων χωρίς φύλλωμα (πείραμα 1), η εξίσωση (6-8) ταιριάζει αρκετά καλά με τα δεδομένα σε ολόκληρη τη στήλη νερού στη θέση B και ακόμη καλύτερα στη θέση F, σε αντίθεση με το πείραμα 3. Αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στην απουσία μιας τοπικά ελάχιστης ταχύτητας σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο στο φυτικό στρώμα. Επιπλέον, στο πείραμα 1 το λογαριθμικό προφίλ εκτείνεται σχεδόν μέχρι τον πυθμένα στο B αλλά όχι στο F.

Για βλάστηση χωρίς φύλλωμα, δηλαδή απλούς μίσχους, η ταχύτητα γενικά μειώνεται σταδιακά προς τον πυθμένα, εκτός από τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά στα στοιχεία όπου εμφανίζεται απότομη μείωση. Έτσι, εξαιρουμένων αυτών των θέσεων, μια ενοποιημένη κατανομή ταχύτητας, όπως αυτή που προτείνεται από τους Carollo et al. (2002), παρέχει καλή εφαρμογή με τις μετρήσεις σε ολόκληρη τη στήλη νερού. Για τη βλάστηση με φύλλωμα, η κατανομή της ταχύτητας κάτω από την κορυφή της συστάδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχετική θέση στη συστοιχία βλάστησης και σε μικρότερο βαθμό από τη διάταξη/πυκνότητα. Σε πολλές θέσεις, η κατανομή παρουσιάζει μια ελάχιστη τιμή στο επίπεδο του φυλλώματος, με τη μείωση της ταχύτητας να είναι πιο έντονη μεταξύ της ευθυγράμμισης των στοιχείων. Αυτή ακριβώς η συμπεριφορά του προφίλ της ταχύτητας όταν πρόκειται για σύνθετα

στοιχεία είναι μάλλον αδύνατο να περιγραφεί από ένα ενοποιημένο μοντέλο καθιστώντας αναγκαία την δημιουργία ενός σύνθετου μοντέλου κατανομής ταχύτητας βασιζόμενου στην διαστρωμάτωση της ροής.



**Σχήμα 6.4.** Δεδομένα κατανομής ταχύτητας στις θέσεις B και F, σε σύγκριση με τις εξισώσεις των Raupach (1994) και Carollo et al. (2002) για τα (α) Exp1, (β) Exp4 και (γ) Exp5.

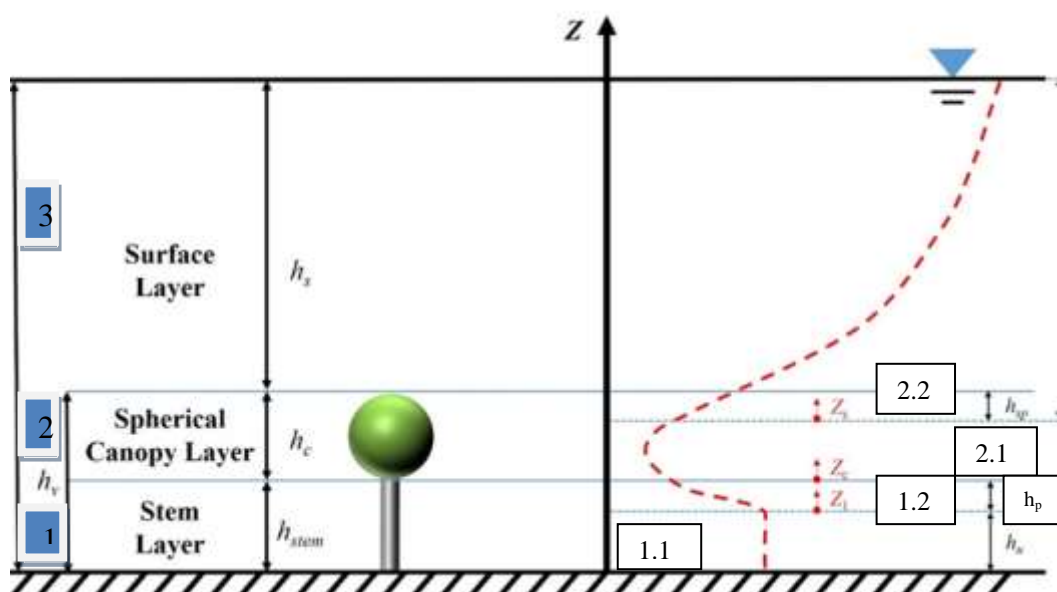
#### 6.4. Αναλυτικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας για βλάστηση με σφαιρικό φύλλωμα

Έχοντας υπόψη τις παραπάνω διαπιστώσεις, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί ένα νέο μοντέλο κατανομής ταχύτητας σε πεδίο ροής με παρουσία σύνθετων στοιχείων



βλάστησης. Μια πρώτη απόπειρα ήταν το αποτέλεσμα ερευνητικής συνεργασίας μεταξύ του συγγραφέα και της διδάκτορος Fang Zhao κατά τα αρχικά στάδια της διατριβής στο πλαίσιο των προκαταρκτικών πειραμάτων με σφαιρικό φύλλωμα (βλ. κεφ. 4), τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση με το νέο μοντέλο. Αυτό αναπτύχθηκε κυρίως από τον υποψήφιο διδάκτορα Weijie Wang και παρουσιάζεται στην εργασία Wang et al. (2023).

Λόγω της έντονης ανομοιομορφίας της ταχύτητας καθ' ύψος που παρατηρήθηκε για τα συγκεκριμένα στοιχεία βλάστησης, σε αυτή την εργασία έγινε προσπάθεια διαχωρισμού του κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας σε ζώνες και υποζώνες ώστε σε καθεμιά να εκφραστεί διαφορετικά η ταχύτητα. Αρχικά ο διαχωρισμός γίνεται σε 3 ζώνες (βλ. Σχ. 6.5): 1) στρώμα μίσχου/ κορμού (κυλινδρική βλάστηση), 2) στρώμα σφαιρικής βλάστησης, 3) στρώμα ανεμπόδιστης ροής μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Επιπλέον κάθε ζώνη βλάστησης χωρίστηκε περαιτέρω ανάλογα με την συμπεριφορά της ταχύτητας και έτσι η ζώνη κυλινδρικής βλάστησης διαχωρίστηκε σε μια υποζώνη σταθερής ταχύτητας (1.1) και σε μια υποζώνη μειούμενης ταχύτητας (1.2), ενώ η ζώνη σφαιρικής βλάστησης σε μια υποζώνη μειωμένης ταχύτητας (2.1) και σε μια υποζώνη αυξανόμενης ταχύτητας (2.2).



**Σχήμα 6.5.** Σκίτσο της βλάστησης με σφαιρική γεωμετρία και διαχωρισμός σε ζώνες

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι το μοντέλο αυτό έλαβε υπόψη μόνο τη βλάστηση με σύνθετα στοιχεία αποτελούμενα από μίσχο και σφαιρικό φύλλωμα, όπως μελετήθηκε στα πειράματα 5 και 6 (Σχήμα 4.1 β, δ), όπου το μετωπικό πλάτος πρώτα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται (Σχήμα 6.5) και η κατανομή της ταχύτητας κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση δείχνει μη μονοτονική συμπεριφορά, παρουσιάζοντας μια σημαντική ζώνη χαμηλής ταχύτητας στο στρώμα βλάστησης (ενδεικτικό προφίλ ταχύτητας με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή στο Σχήμα 6.5). Υπό αυτές τις συνθήκες, οι παραδοσιακές αναλυτικές λύσεις ταχύτητας, όπως συζητούνται στην

Ενότητα 6.1-6.2-6.3, δεν μπορούν να περιγράψουν την κατανομή της ταχύτητας καθώς αυτή παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις και ακρότατα ανάλογα με το σε ποιά ζώνη βρίσκεται. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, προτείνεται αυτό το νέο αναλυτικό μοντέλο, όπου η κατανομή της ταχύτητας προκύπτει σύμφωνα με διαφορετικές προσεγγίσεις στα επιμέρους στρώματα.

Όπως προαναφέρθηκε, το στρώμα κυλινδρικής βλάστησης (1) χωρίζεται σε δύο υποζώνες, την υποζώνη σταθερής ταχύτητας (1.1) και την υποζώνη μειούμενης ταχύτητας (1.2). Η μέθοδος υπολογισμού της ταχύτητας ροής στην υποζώνη σταθερής ταχύτητας (1.1) βασίζεται στην εξίσωση ορμής στην κατεύθυνση ροής, απλοποιημένης ώστε να απεικονίζει την ισορροπία μεταξύ της συνιστώσας της βαρύτητας και της αντίστασης της βλάστησης, αγνοώντας την τάση Reynolds σε σύγκριση με την αντίσταση της βλάστησης, όπως έχει προταθεί και από άλλους ερευνητές (Huai et al., 2009, Nepf, 2012b):

$$\rho g S_o - \frac{1}{2} \rho C_d m D_z u^2 = 0 \quad (6-9)$$

όπου  $D_z = d_0$  είναι η διάμετρος του μίσχου,  $m$  είναι η πυκνότητα βλάστησης (αριθμός στοιχείων βλάστησης ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα),  $C_d$  είναι ο συντελεστής αντίστασης,  $S_o$  η κλίση του αγωγού και  $u$  η ταχύτητα. Επομένως, προκύπτει η ταχύτητα σε αυτή την υποζώνη:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2gS_o}{C_d m d_0}} \quad (6-10)$$

Για την υποζώνη μειούμενης ταχύτητας (1.2) ισχύει ότι επειδή η ταχύτητα ροής στο στρώμα του φυλλώματος τείνει να είναι μικρότερη από εκείνη στο στρώμα μίσχου λόγω του μεγαλύτερου μετωπικού πλάτους, έτσι η μείωση της ταχύτητας αρχίζει πιο χαμηλά από το φύλλωμα. Η ταχύτητα μειώνεται σε αυτή την υποζώνη, υποδεικνύοντας ότι η τάση Reynolds είναι αρνητική. Με βάση το κατακόρυφο σύστημα συντεταγμένων  $z_1$  (βλ. Σχήμα 6.5), το οποίο ξεκινά από τη διεπαφή υποζώνης σταθερής (Ζώνη 1.1) και μειούμενης (Ζώνη 1.2) ταχύτητας, η εξίσωση ορμής δίνει

$$\frac{\partial \tau}{\partial z_1} + \rho g S_o - \frac{1}{2} \rho C_d m D_z u^2 = 0 \quad (6-11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την δυνατότητα αναλυτικής λύσης της εξίσωσης, υιοθετείται ο κλασικός τύπος κλεισίματος  $2^{ac}$  τάξεως

$$\tau = \rho (k_1 z_1)^2 \left| \frac{du}{dz_1} \right| \frac{du}{dz_1} \quad (6-12)$$

και δεδομένου ότι  $du/dz_1 < 0$  σε αυτή τη ζώνη, η τάση Reynolds μπορεί να εκτιμηθεί

ως:

$$\tau = -\rho(k_1 z_1)^2 \left( \frac{du}{dz_1} \right)^2 < 0 \quad (6-13)$$

όπου  $k_1$  υποδηλώνει τον τροποποιημένο συντελεστή von Karman. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (6-13) στην (6-11), αυτή γράφεται:

$$-2(k_1 z_1)^2 \frac{\partial u}{\partial z_1} \frac{\partial^2 u}{\partial z_1^2} - 2k_1^2 z_1 \left( \frac{\partial u}{\partial z_1} \right)^2 + gS_0 = \frac{1}{2} C_d m d_0 u^2 \quad (6-14)$$

Όπου  $0 < z_1 < h_p$  (Σχήμα 6.5) και  $d_0$  είναι η διάμετρος του μίσχου.

Για την επίλυση της εξίσωσης (6-14) υιοθετείται η μέθοδος εκθετικής σειράς, δηλαδή η ταχύτητα εκφράζεται ως

$$u = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z_1^n = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_1^2 + a_3 z_1^3 + \dots \quad (6-15)$$

Με παραγωγήιση

$$\frac{\partial u}{\partial z_1} = \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z_1^{n-1} = a_1 + 2a_2 z_1 + 3a_3 z_1^2 + \dots \quad (6-16)$$

και

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z_1^2} = \sum_{n=2}^{+\infty} n(n-1) a_n z_1^{n-2} = 2a_2 + 6a_3 z_1 + 12a_4 z_1^2 + \dots \quad (6-17)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6-15) έως (6-17) στην (6-14), δίνει

$$-2(k_1 z_1)^2 \left( \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z_1^{n-1} \right) \left( \sum_{n=2}^{+\infty} n(n-1) a_n z_1^{n-2} \right) - 2k_1^2 z_1 \left( \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n z_1^{n-1} \right)^2 + gS_0 = \frac{1}{2} C_d m D_0 \left( \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z_1^n \right)^2 \quad (6-18)$$

Συγκρίνοντας τους συντελεστές για κάθε στοιχείο  $z_1^n$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ) προκύπτει:

$$z_1^0 \quad gS_0 = \frac{1}{2} C_d m D_0 a_0^2 \quad (6-19)$$

$$z_1^1 \quad (-2k_1^2 z_1) a_1^2 = \left( \frac{1}{2} C_d m D_0 \right) 2a_0 a_1 z_1 \quad (6-20)$$

$$z_1^2 \quad (-2k_1^2 z_1^2) 6a_1 a_2 = \frac{1}{2} C_d m D_0 z_1^2 (2a_0 a_2 + a_1^2) \quad (6-21)$$

$$z_1^3 \quad (-2k_1^2 z_1^3) (8a_2^2 + 12a_1 a_3) = \frac{1}{2} C_d m D_0 z_1^3 (2a_0 a_3 + 2a_1 a_2) \quad (6-22)$$

Επομένως υπολογίζονται οι συντελεστές  $a_0, a_1, a_2, \dots$

$$a_0 = u_0 = \sqrt{\frac{2gS_o}{C_d m D_0}} \quad (6-23)$$

$$a_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{C_d m D_0}{k_1^2} \right) u_0 \quad (6-24)$$

$$a_2 = \frac{1}{40} \left( \frac{C_d m D_0}{k_1^2} \right)^2 u_0 \quad (6-25)$$

$$a_3 = -\frac{1}{4400} \left( \frac{C_d m D_0}{k_1^2} \right)^3 u_0 \quad (6-26)$$

Εισάγοντας αυτούς στην (6-15) προκύπτει η λύση του προφίλ ταχύτητας ( $0 \leq z_1 \leq h_p$ )

$$u_p = u_0 \left[ 1 + \frac{-\phi_1}{2} + \frac{(-\phi_1)^2}{40} + \frac{(-\phi_1)^3}{4400} + \dots \right] \quad (6-27)$$

όπου το  $u_0$  είναι η ταχύτητα στην υποζώνη σταθερής ταχύτητας (εξ. 6-10) και ο παράγοντας  $\phi_1$

$$\phi_1 = \left( \frac{C_d m d_0}{k_1^2} \right) z_1 \quad (6-28)$$

Για την εκτίμηση του πάχους της υποζώνης αυτής ( $h_p$ ) χρησιμοποιήθηκε η κλίμακα μήκους διεύθυνσης  $\delta_e$  της Nepf (2012b), όπως θα αναφερθεί και στην επόμενη υποενότητα, τροποποιημένη ως  $\delta_e = \omega / C_d m d_0$  με  $\omega = 0.009$  που προέκυψε από βελτιστοποίηση της σύγκρισης με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για τη ροή στο στρώμα σφαιρικής βλάστησης (Ζώνη 2), λαμβάνοντας υπόψη την δυνατότητα επίλυσης της εξίσωσης ορμής, υιοθετείται μια εκθετική κατανομή της τάσης Reynolds, (Dijkstra and Uittenbogaard 2010, Huai et al. 2013a, Shimizu et al. 1991) της μορφής:

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} = -\rho \overline{u'w'} \Big|_{z_c=h_c} \exp[\eta(z_c - h_c)] \quad (6-29)$$

όπου το  $z_c$  είναι το ύψος από τη διεπαφή μεταξύ ζώνης σφαιρικής και κυλινδρικής βλάστησης (Σχήμα 6.5), και  $\eta$  είναι μια προσδιοριστέα σταθερά. Αυτός ο τύπος εμπεριέχει την παραδοχή ότι η διατμητική τάση φτάνει τη μέγιστη τιμή της στην κορυφή της βλάστησης ( $z_c = h_c$ ). Η τιμή αυτή υπολογίζεται από την ισορροπία ορμής της ροής πάνω από τη βλάστηση,

$$-\rho \overline{u'w'} \Big|_{z_c=h_c} = \rho u_*^2 \quad (6-30)$$

όπου  $u_* = \sqrt{gS_0 h_s}$  είναι η ταχύτητα τριβής στην κορυφή του φυτού και  $h_s$  είναι το βάθος του νερού πάνω από την κορυφή της βλάστησης (δηλαδή,  $h_s = H - h$ ). Αυτός ο τρόπος υπολογισμού του  $u_*$  είναι ίδιος με την πρόταση της Nepf (2012b) και όχι του Raurach (1994). Από τις εξισώσεις (6-29) και (6-30), η διατμητική τάση Reynolds είναι:

$$\tau = \rho u_*^2 \exp[\eta(z_c - h_c)] = \rho g S_0 h_s \exp[\eta(z_c - h_c)] \quad (6-31)$$

Εφαρμόζοντας τη γενική εξίσωση (6-11) σε συνδυασμό με την (6-31) στη ζώνη αυτή, προκύπτει η ταχύτητα  $u_c$ , σε τυχόν ύψος  $z_c$ :

$$u_c = \sqrt{\frac{2\eta g S_0 h_s \exp[\eta(z_c - h_c)] + 2gS_0}{C_d m D_z}} \quad (6-32)$$

Για την σφαιρική βλάστηση, είναι εύκολη η έκφραση της μετωπικής επιφάνειας (κυκλικό σχήμα) ως συνάρτησης του  $z_c$ , δηλαδή  $D_z(z_c)$ :

$$D_z = 2\sqrt{\frac{D_0^2}{4} - \left(z_c - \frac{D_0}{2}\right)^2} \quad (6-33)$$

Επομένως, το προφίλ ταχύτητας σε αυτό το στρώμα φυλλώματος προκύπτει όταν προσδιοριστεί η παράμετρος  $\eta$ . Από προσαρμογή στα συγκεκριμένα πειράματα προτείνεται:

$$\eta = 1.8613 \times \Omega^{-1.173} \quad \text{όπου } \Omega = \frac{u_v - u_{\min}}{\Delta z}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το στρώμα σφαιρικής βλάστησης (Ζώνη 2) στο οποίο ισχύει η (6-32) εκτείνεται από το πέρασ του κυλινδρικού στοιχείου (μίσχος) έως το επίπεδο όπου οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια στρωμάτων βλάστησης-ελεύθερης ροής μπορούν να διεισδύσουν στο στρώμα της συστάδας, σε απόσταση  $h_{sp}$  από την κορυφή της βλάστησης όπως αναλύεται παρακάτω.

Στο επιφανειακό στρώμα όπου δεν υπάρχουν παράγοντες οπισθέλκουσας βλάστησης, η εξίσωση ορμής δίνει

$$\frac{\partial \tau}{\partial z_s} + \rho g S_0 = 0 \quad (6-34)$$

και η τάση Reynolds εκφράζεται με τον κλασσικό τύπο 2ης τάξης

$$\tau = \rho(\kappa z_s)^2 \left( \frac{du}{dz_s} \right)^2 \quad (6-35)$$

όπου το  $z_s$  υπολογίζεται ξεκινώντας από το επίπεδο όπου οι στροβιλισμοί που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μπορούν να διεισδύσουν στο στρώμα της συστάδας (Εικόνα 6.5), δηλαδή σε απόσταση  $h_{sp}$  (ο δείκτης «sp» υποδηλώνει τη διείσδυση του επιφανειακού στρώματος). Αυτή η στάθμη αντιμετωπίζεται ως η τροποποιημένη στάθμη μηδενικής ταχύτητας και το μήκος ανάμειξης υπολογίζεται με βάση το  $z_s$ .

Με αναλυτική λύση της εξίσωσης (6-34), το προφίλ ταχύτητας στο επιφανειακό στρώμα μπορεί να εξαχθεί ως εξής:

$$u_s = \frac{2\sqrt{gS_0}}{\kappa} \left[ \sqrt{h_{ssp} - z_s} - \sqrt{h_{ssp}} \operatorname{arctanh} \left( \sqrt{\frac{h_{ssp} - z_s}{h_{ssp}}} \right) \right] + c_1 \quad (6-36)$$

όπου η συνάρτηση "arctanh" είναι η αντίστροφη υπερβολική εφαπτομένη,

$$\operatorname{arctanh} \delta = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + \delta}{1 - \delta} \right) \quad (6-37)$$

και

$$h_{ssp} = h_s + h_{sp} \quad (6-38)$$

Οι παράμετροι  $h_{ssp}$  και  $c_1$  στην εξίσωση (6-36) μπορούν να προσδιοριστούν από δύο οριακές συνθήκες:

1) Η ταχύτητα στην κορυφή της συστάδας ισούται με αυτή στο κάτω μέρος του επιφανειακού στρώματος

$$u_s \Big|_{z_s=h_{sp}} = u_{\text{top}} \quad (6-39)$$

όπου  $u_{\text{top}}$  είναι η ταχύτητα στην κορυφή της βλάστησης.

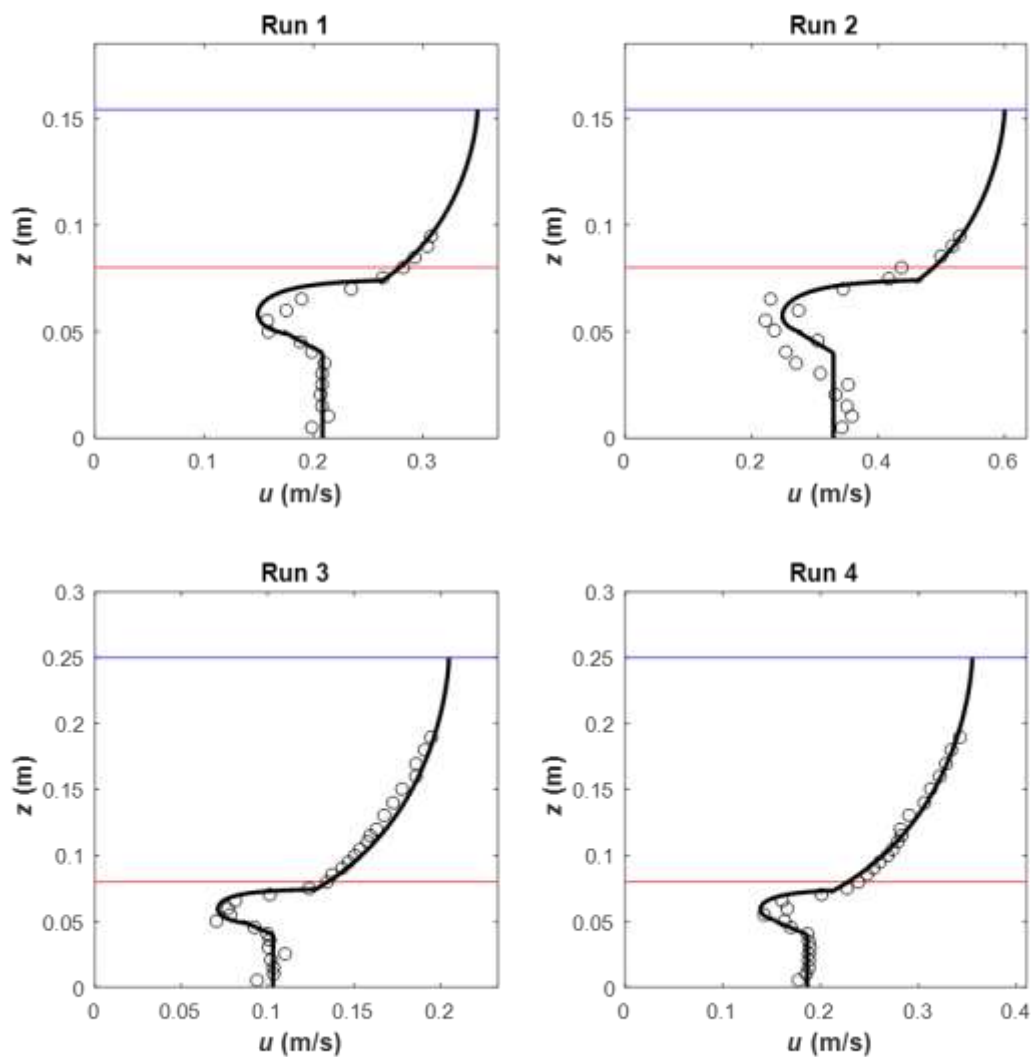
2) Η παράγωγος της ταχύτητας είναι μηδέν στην επιφάνεια του νερού.

$$\left. \frac{\partial u_s}{\partial z_s} \right|_{z_s=h_{ssp}} = 0 \quad (6-40)$$

Συνοψίζοντας, οι ταχύτητες στα επιμέρους στρώματα μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας διάφορες εξισώσεις, ως εξής: (1) Η ταχύτητα του στρώματος μίσχου υπολογίζεται από την εξίσωση (6-10) (ζώνη σταθερής ταχύτητας 1.1) και την εξίσωση (6-27) (ζώνη μειούμενης ταχύτητας 1.2). (2) Η ταχύτητα του στρώματος του

φυλλώματος (ζώνη 2.1) υπολογίζεται από την εξίσωση (6-32). (3) Η ταχύτητα του επιφανειακού στρώματος (ζώνη 3) υπολογίζεται από την εξίσωση (6-36) η οποία εφαρμόζεται και μέχρι απόσταση  $h_{sp}$  κάτω από την κορυφή της βλάστησης (ζώνη 2.2). Για το επιφανειακό στρώμα χρησιμοποιήθηκε η παραδοσιακή τιμή της σταθεράς του von Karman  $k=0,41$ , ενώ στη ζώνη 1.2 βρέθηκε ως βέλτιστη τροποποιημένη τιμή  $k_1=0,16$ , που βρίσκεται στην περιοχή 0,12-0,33 όπως έχει μελετηθεί από τους Wang et al (2015). Για τη μετατόπιση μηδενικού επιπέδου  $h_{sp}$ , η οποία θεωρείται ανάλογη με το πάχος του επιφανειακού στρώματος, υιοθετείται η τιμή 0,04 m για τα Runs 1–2 και η τιμή 0,06 m για τα Runs 3–4. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από κατάλληλη προσαρμογή της κατανομής (Εξίσωση 6-36) του επιφανειακού στρώματος στα πειραματικά δεδομένα ενώ η κατανομή αυτή σταματά εκεί που τέμνεται με τη κατανομή (Εξίσωση 6-32) της πιο κάτω ζώνης (2.1). Έτσι ουσιαστικά το προφίλ στη ζώνη 2.2 είναι προέκταση από τη ζώνη 3, πάχους  $h_{sp}$  σύμφωνα με το Σχήμα 6.5.

Το Σχήμα 6.6 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων ταχυτήτων για κάθε περίπτωση, όπου η καλή συμφωνία δείχνει ότι το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο είναι αποτελεσματικό για την πρόβλεψη της ταχύτητας ροής μέσω της βλάστησης με σφαιρικό φύλλωμα. Επισημαίνεται ότι οι υπολογιστικά προβλεπόμενες τιμές ταχύτητας και η κατανομή τους καθ' ύψος συγκρίνονται με τις μέσες χωρικά πειραματικές τιμές ταχύτητας από όλες τις θέσεις λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συνθήκες ροής που εξετάστηκαν προκαταρκτικά (δυο παροχές και δυο βάθη, με παράλληλη διάταξη στοιχείων (βλ. Κεφ 4.3). Συγκεκριμένα τα Runs 1 και 3 αντιστοιχούν σε παροχή 22.4 l/s και τα Runs 2 και 4 σε παροχή 40.9 l/s. Τα Runs 1 και 2 πραγματοποιούνται σε βάθος 15.4 cm και τα Runs 3 και 4 σε βάθος 25 cm ενώ η πυκνότητα διάταξης σε όλα τα Runs ήταν  $m=100$  stems/m<sup>2</sup>.



**Σχήμα 6.6.** Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και προβλεπόμενης ταχύτητας για τέσσερις περιπτώσεις, όπου οι κουκκίδες είναι δεδομένα μέτρησης, οι μαύρες γραμμές είναι προβλεπόμενες τιμές από το αναλυτικό μοντέλο, οι κόκκινες γραμμές είναι η κορυφή της βλάστησης και οι μπλε γραμμές είναι η επιφάνεια ροής.

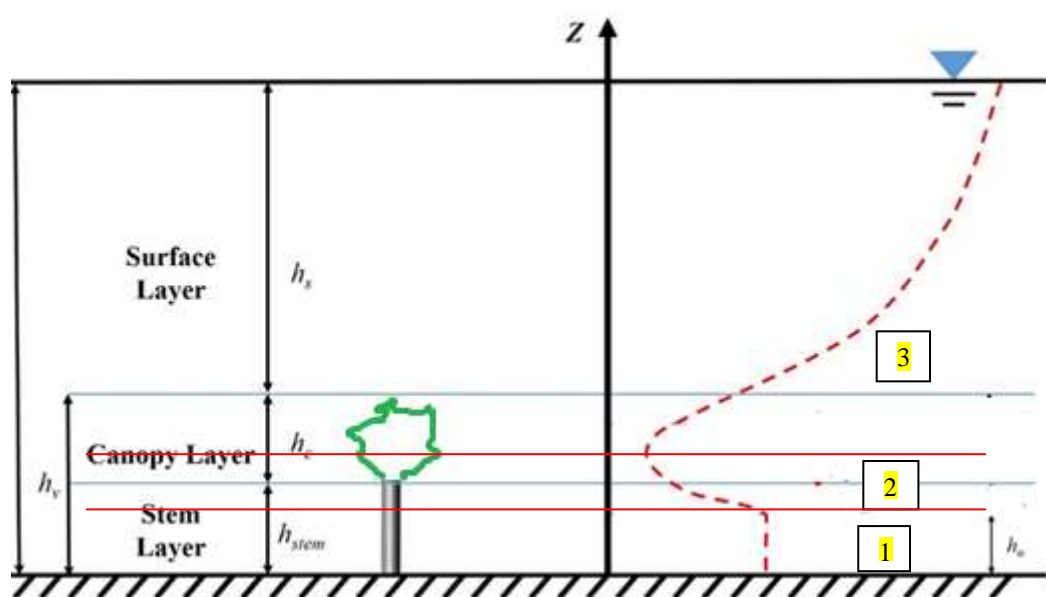
Αν και το νεοσύστατο μοντέλο αναλυτικών λύσεων μπορεί να προβλέψει καλά την κίνηση της ροής υπό την επίδραση σφαιρικής βλάστησης, ορισμένοι περιορισμοί και αδυναμίες παραμένουν να αντιμετωπιστούν σε μελλοντικές μελέτες. Κατ' αρχήν χρησιμοποιούνται πολλές προσδιοριστέες παράμετροι ( $\eta$ ,  $k_1$ ,  $h_p$ ,  $h_{sp}$ , ...), οι τιμές των οποίων καθορίστηκαν εδώ ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή με τα αποτελέσματα περιορισμένου αριθμού πειραμάτων με συγκεκριμένη βλάστηση σφαιρικού σχήματος. Επομένως για διαφορετικές μορφολογίες βλάστησης, ή ακόμα και για διαφορετικές πυκνότητες και γεωμετρίες, αυτές οι παράμετροι πιθανότατα απαιτούν τροποποίηση με περαιτέρω διερεύνηση. Το γεγονός αυτό κάνει το μοντέλο δύσχρηστο για γενικότερη εφαρμογή, όπως όλα τα μοντέλα που βασίζονται στην βελτιστοποίηση πάνω σε πειραματικά δεδομένα. Επίσης, θα πρέπει να επισημανθεί η



διαφοροποίηση από τη λογαριθμική κατανομή στο επιφανειακό στρώμα που είναι αρκετά καθιερωμένη, με τη χρήση μιας μορφής κατανομής αντίστροφης υπερβολικής εφαπτομένης, κάτι όμως που, αν και δεν είναι συνηθισμένο, δεν είναι και αναπάντεχο καθώς παρόμοια λογική έχουν ακολουθήσει και άλλοι ερευνητές όπως οι Carollo et al. (2002).

### 6.5. Νέο αναλυτικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας

Η παρούσα διδακτορική εργασία επιχειρήσει να προχωρήσει ένα βήμα παραπέρα από το παραπάνω μοντέλο, με στόχο ένα πιο απλοποιημένο και πιο γενικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας, που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για κάθε γεωμετρία βλάστησης με φύλλωμα και το οποίο προκύπτει από συνδυασμό θεωριών που αναφέρονται στο παρόν κεφάλαιο. Ακολουθήθηκε παρόμοια όπως προηγουμένως διαδικασία διαχωρισμού της ροής σε ζώνες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Ξεκινώντας από την βαθύτερη, έχουμε την ζώνη σταθερής ταχύτητας (Ζώνη 1) που υποδηλώνει ότι στο στρώμα αυτό η κατανομή ταχύτητας είναι ομοιόμορφη, ενδιάμεσα έχουμε την ζώνη μειούμενης ταχύτητας (Ζώνη 2) όπου η ταχύτητα βαίνει μειούμενη μέχρι το ελάχιστό της που εντοπίζεται πίσω από το πιο ογκώδες μέρος της βλάστησης (φύλλωμα) και τέλος έχουμε την επιφανειακή ζώνη (Ζώνη 3) που περιλαμβάνει την ανεμπόδιστη ροή στην οποία η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Η διαφορά από την προηγούμενη διαίρεση έγκειται στο ότι η ζώνη μειούμενης ταχύτητας θεωρείται πως εκτείνεται πιο πάνω μέσα στο φύλλωμα και η ζώνη της ανεμπόδιστης ροής πιο κάτω μέσα στη βλάστηση, μέχρις ότου οι αντίστοιχες κατανομές συναντηθούν ορίζοντας το ελάχιστο της ταχύτητας. Όλα τα παραπάνω εμφανίζονται παραστατικά στο Σχήμα 6.7, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ως βάση το Σχήμα 6.5 καθώς η κατανομή ταχύτητας έχει παρόμοια μορφή, τροποποιώντας των διαχωρισμό των ζωνών με τον καινούργιο τρόπο που σημειώνεται με τις κόκκινες γραμμές.



Σχήμα 6.7. Ζώνες υγρής στήλης για το απλοποιημένο αναλυτικό μοντέλο

Στη ζώνη σταθερής ταχύτητας (Ζώνη 1), για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υιοθετείται η σχέση (6-10) η οποία προκύπτει από την εξίσωση ορμής στην κατεύθυνση ροής, απλοποιημένη ώστε να απεικονίσει την ισορροπία μεταξύ της συνιστώσας της βαρύτητας και της αντίστασης της βλάστησης, αγνοώντας την τάση Reynolds σε σύγκριση με την αντίσταση της βλάστησης (εξ. 6-9). Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές όπως Huai et al. (2009) και Nepf (2012b) και είναι αντιπροσωπευτική για το μέγεθος της ταχύτητας στη ζώνη αυτή. Το ύψος αυτής της ζώνης είναι μικρότερο από το ύψος του κυλινδρικού στοιχείου (μίσχου) λόγω της διείσδυσης στροβίλων από την ζώνη φυλλώματος που προκαλούν μείωση της ταχύτητας. Σύμφωνα με τη Nepf (2012b) η κλίμακα μήκους διείσδυσης  $\delta_e$  (βάθος διείσδυσης στροβίλων) σε μια βυθισμένη απλή κυλινδρική βλάστηση είναι:

$$\delta_e \approx \frac{0.23}{C_d m d_0} \quad (6-41)$$

όπου  $C_d=1,13$  συντελεστής αντίστασης και  $d_0$  η διάμετρος του κυλινδρικού στοιχείου. Είναι προφανές ότι η σχέση (6-41) μπορεί να ισχύει μόνο για τα πειράματα 1 και 2 της παρούσας διατριβής. Μάλιστα ο υπολογισμός του πάχους αυτού για αυτά τα πειράματα δείχνει ότι το πάχος διείσδυσης είναι μεγάλο και φθάνει ή υπερβαίνει το ύψος των ράβδων (για το Πείραμα 1 είναι 0,4 m και για το Πείραμα 2 είναι 0,2 m), επιβεβαιώνοντας την πρόταση της Nepf ότι για αραιή βλάστηση το λογαριθμικό προφίλ της ταχύτητας εκτείνεται πρακτικά σε όλο το βάθος ροής. Για βλάστηση με πολύπλοκη γεωμετρία λόγω των διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης στροβίλων προτείνεται η τροποποιημένη μορφή:

$$\delta_e = \frac{\omega}{C_d m d_0} \quad (6-42)$$

όπου ο παράγοντας  $\omega$  εξαρτάται από την γεωμετρία βλάστησης. Για τα παρόντα πειράματα επιλέχθηκε η τιμή  $\omega= 0,027$ , που ταιριάζει καλύτερα με τα προφίλ ταχύτητας των πειραμάτων (βλ. Πίνακα 6-2) και είναι κοντά σε τιμές της βιβλιογραφίας (Wang et al. 2023).

Στην επιφανειακή ζώνη (Ζώνη 3), για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υιοθετείται ο λογαριθμικός νόμος της εξίσωσης (6-1) σε συνδυασμό με την θεωρία του Raupach (1994) όπου με τις εξισώσεις (6-2), (6-3) και (6-4) προκύπτουν οι παράγοντες  $d$  και  $z_0$ . Η λογαριθμική κατανομή της ταχύτητας φαίνεται να είναι η πιο ταιριαστή τουλάχιστον για το κομμάτι της ανεμπόδιστης ροής (βλ. Σχήματα 6.8 και 6.9) ενώ έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, όπως Klopstra et al. (1997), Shi & Hughes (2002), Ghisalberti & Nepf (2002). Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της κατανομής αυτής είναι η εγκυρότητα της αρκετά μέσα στην βλάστηση δηλαδή κάτω από την κορυφή της, όπως φάνηκε στις προηγούμενες ενότητες 6.2, 6.3.

Στην ενδιάμεση ζώνη μειούμενης ταχύτητας (Ζώνη 2), για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υιοθετούνται οι σχέσεις (6-10, 6-27, 6-28) όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα 6.4 διευκρινίζοντας ότι χρησιμοποιήθηκαν τρεις όροι της σειράς στην εξίσωση (6-27). Σε αντίθεση όμως με το προηγούμενο μοντέλο όπου το πάχος της ζώνης είναι προκαθορισμένο, στο παρόν μοντέλο αυτό προκύπτει όταν η καμπύλη της ταχύτητας από τις παραπάνω σχέσεις τμήσει την καμπύλη της ταχύτητας από την επιφανειακή ζώνη. Στον ακόλουθο Πίνακα 6-2 φαίνονται οι τιμές του  $\delta_e$  από τη (6-42) για όλα τα πειράματα καθώς και οι τιμές των ελαχίστων ταχυτήτων και των θέσεων τους (κατά προσέγγιση) δηλαδή των σημείων τομής της λογαριθμικής και της κατανομής μειούμενης ταχύτητας όπως προκύπτουν για την θέση B, όπου το  $y_{u_{min}}$  είναι η κατά προσέγγιση απόσταση του σημείου ελάχιστης ταχύτητας από τον πυθμένα. Στα πειράματα 1 και 2 δεν υπάρχει ζώνη μειούμενης ταχύτητας οπότε η ελάχιστη ταχύτητα ταυτίζεται με την ταχύτητα της ζώνης σταθερής ταχύτητας ενώ στα υπόλοιπα πειράματα με τα σύνθετα στοιχεία η ελάχιστη ταχύτητα είναι μικρότερη από εκείνη της ζώνης σταθερής ταχύτητας ( $u_0$ ) και εμφανίζεται λίγο κάτω από τη βάση του φυλλώματος.

Πίνακας 6-2. Παράμετρος  $\delta_e$  και θέση ελαχίστων ταχυτήτων του νέου μοντέλου

|      | $\delta_e$ (cm) | $u_{min}$ (cm/s) | $y_{u_{min}}$ (cm) | $u_0$ (cm/s) |
|------|-----------------|------------------|--------------------|--------------|
| EXP1 | 40.7            | 19.8             | 2.1                | 19.8         |
| EXP2 | 20.4            | 14.0             | 1.7                | 14.0         |
| EXP3 | 3.0             | 10.7             | 3.6                | 14.7         |
| EXP4 | 1.5             | 7.9              | 4.2                | 10.4         |
| EXP5 | 3.0             | 8.8              | 4.4                | 14.7         |
| EXP6 | 1.5             | 5.5              | 4.9                | 10.4         |

Στα επόμενα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζεται αυτό το νέο μοντέλο για όλα τα πειράματα σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα της θέσης B και με τις μέσες χωρικές τιμές της ταχύτητας που έχουν προκύψει σαν απλή μέση τιμή των ταχυτήτων από όλες τις θέσεις σε κάθε βάθος. Τα Σχήματα αυτά φανερώνουν την πολύ καλή συσχέτιση του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα της θέσης B για όλα σχεδόν τα πειράματα και για κάποια από τα μέσα διαγράμματα όπως του πειράματος 4. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στα μέσα διαγράμματα και κυρίως εντός της βλάστησης οφείλονται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο (Raupach 1994, Nepf 2012b) αναπτύχθηκαν για σχετικά μεγάλη πυκνότητα βλάστησης ενώ οι τιμές της πυκνότητας βλάστησης στην παρούσα εργασία είναι πιο μικρές με αποτέλεσμα να οδηγηθούμε σε υποεκτίμηση των ταχυτήτων με την εξαίρεση του πειράματος 4 όπου η βλάστηση γίνεται αρκετά πυκνή. Φαίνεται επίσης ότι το σχήμα της βλάστησης δεν παίζει σημαντικό ρόλο εφόσον οι μετωπικές επιφάνειες είναι παραπλήσιες σε έκταση.

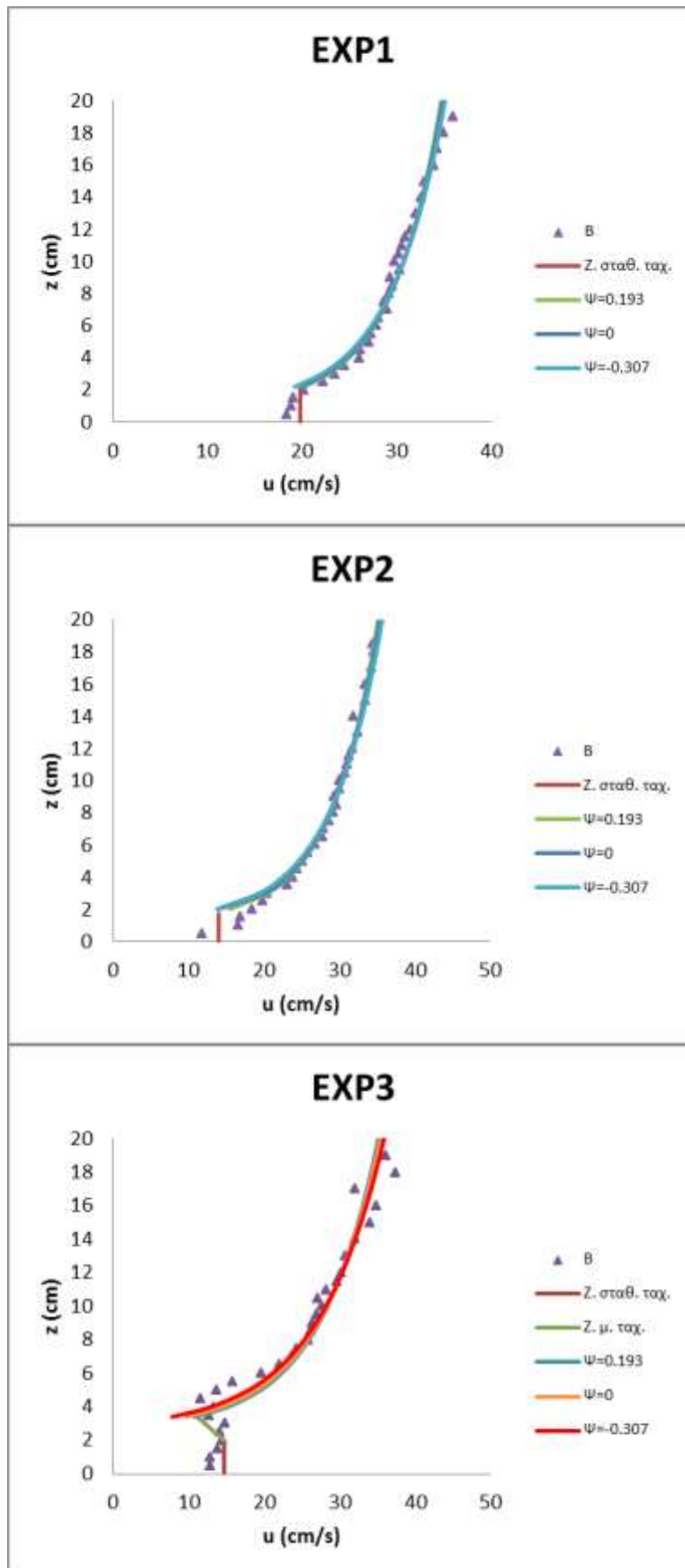
Δεδομένου ότι μεγάλο μέρος των προφίλ ταχύτητας, όχι μόνο πάνω από αλλά και

μέσα στη βλάστηση, προσεγγίζεται από την λογαριθμική κατανομή, έγινε διερεύνηση του παράγοντα  $\Psi_h$  από την σχέση (6-3), ο οποίος εκφράζει την επίδραση της γεωμετρίας της βλάστησης στους παράγοντες  $d$  και  $z_0$  δηλαδή την απόκλιση από τον κλασικό λογαριθμικό νόμο πάνω από τραχιά επιφάνεια. Ο Raupach (1994) προτείνει για τον παράγοντα  $\Psi_h$  την τιμή 0,193 που έχει προκύψει από την βέλτιστη συσχέτιση με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα εργαστηρίου και πεδίου για επίγειες συστάδες στην ατμόσφαιρα όπου η βλάστηση πιθανόν να παρουσιάζει αποκλίσεις από τα πιο σύνθετα στοιχεία βλάστησης της παρούσας εργασίας. Επανεξετάζοντας τους υπολογισμούς του Raupach για την προταθείσα τιμή της σταθεράς  $c_w$  προέκυψε η τιμή  $\Psi_h = -0,307$ . Γι' αυτό δοκιμάστηκαν οι τιμές 0,193, 0 και -0,307 στα πειράματα της θέσης B ώστε να διερευνηθεί η ευαισθησία ως προς τον παράγοντα  $\Psi_h$ . Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-3, στα πειράματα με απλές ράβδους η καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται με  $\Psi_h = 0,193$ , ενώ στα πειράματα με τα σύνθετα στοιχεία η καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται με  $\Psi_h = -0,307$ . Όμως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.8, οι διαφορές είναι μικρές, υποδεικνύοντας τη μικρή επίδραση του παράγοντα  $\Psi_h$  στο εύρος διακύμανσής του που εξετάστηκε.

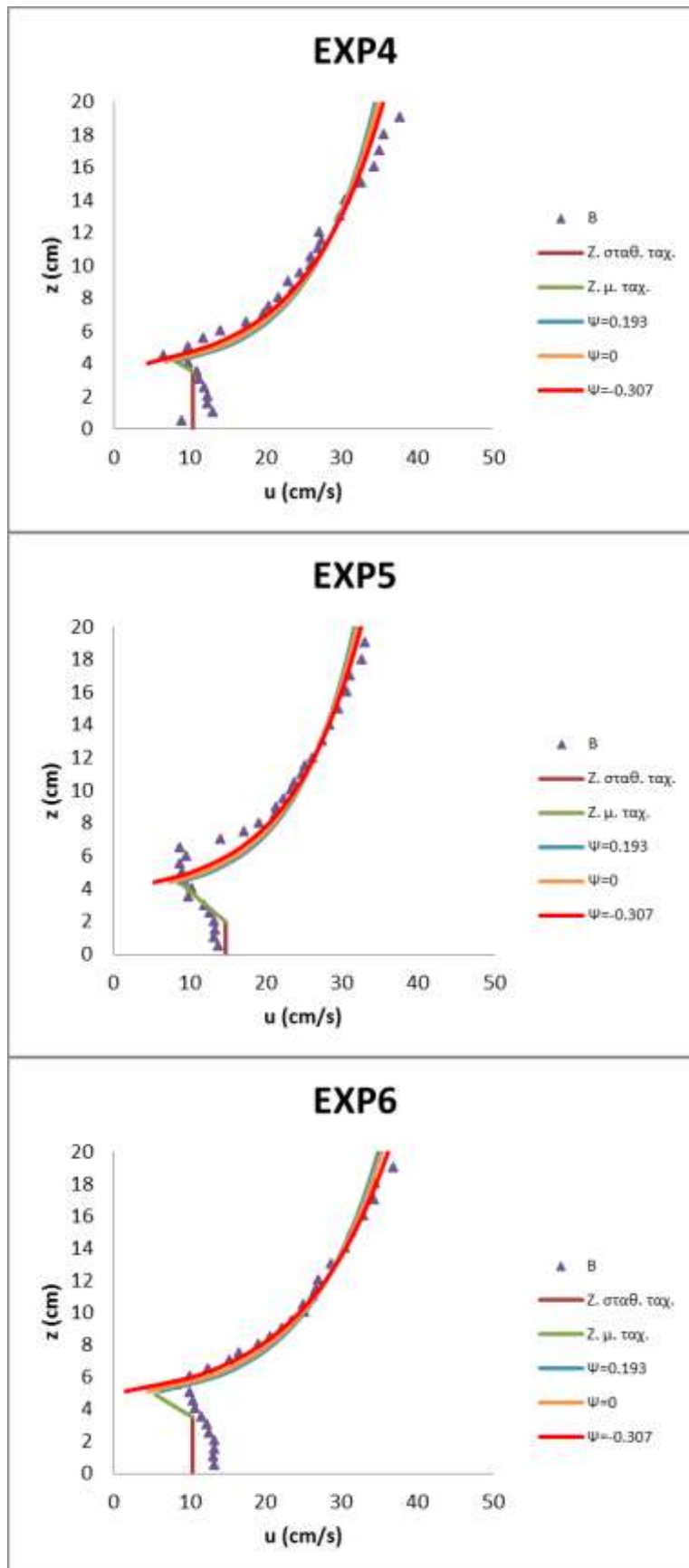
Το νέο μοντέλο κατανομής ταχύτητας φαίνεται να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά κατά την εφαρμογή του στα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διατριβής έχοντας σαν πλεονέκτημα την απλότητα στην εφαρμογή του. Θα πρέπει όμως να τονιστεί η αναγκαιότητα εφαρμογής του και σε πειράματα με βλάστηση διαφορετικής γεωμετρίας για να επαληθευτεί η εγκυρότητα του. Γενικότερα, η μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στην συγκριτική μελέτη πολλών και ποικίλων γεωμετριών βλάστησης.

Πίνακας 6-3. Παράμετροι μοντέλου Raupach (1994) για διάφορα  $\Psi_h$

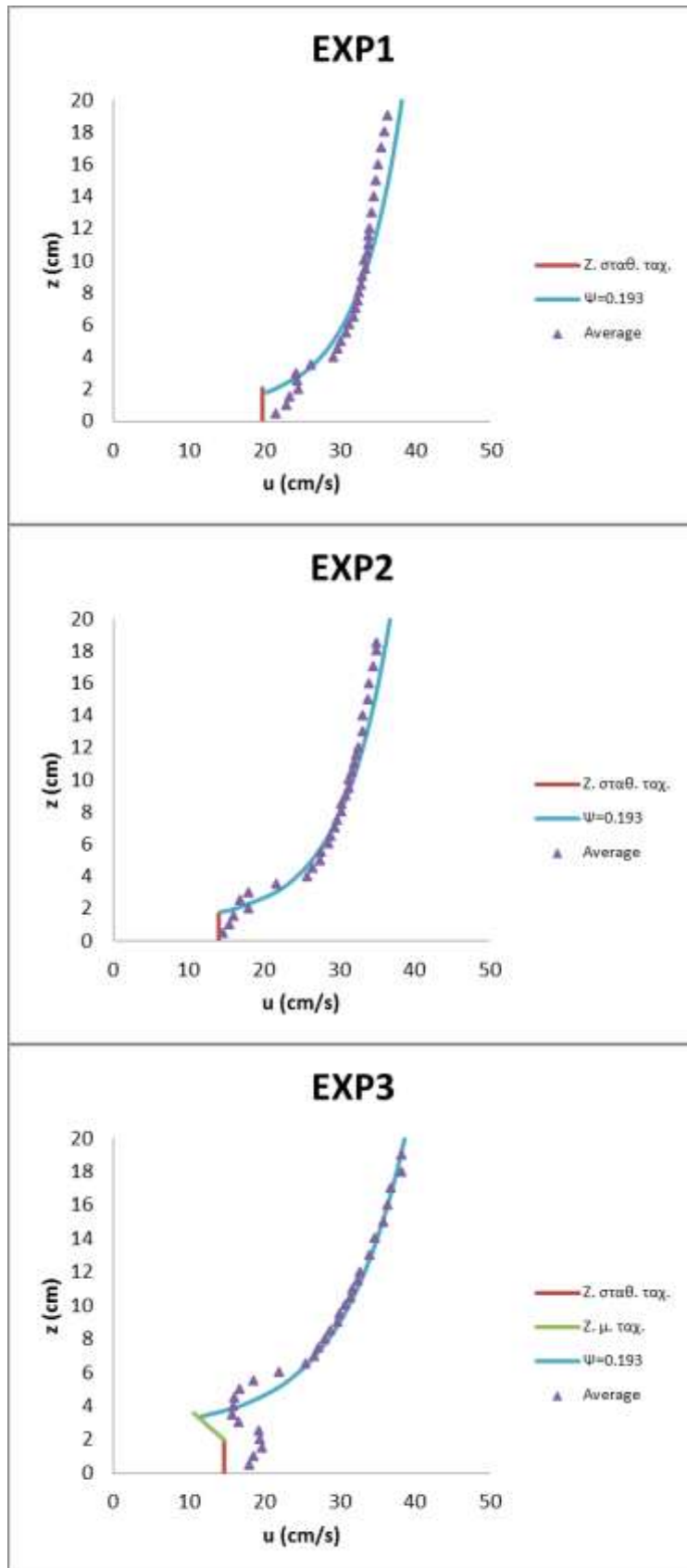
| B    | $\Psi_h=0.193$ |            |              |       | $\Psi_h=0$ |            |              |       | $\Psi_h=-0.307$ |            |              |       |
|------|----------------|------------|--------------|-------|------------|------------|--------------|-------|-----------------|------------|--------------|-------|
|      | d (cm)         | $z_0$ (cm) | $u_*$ (cm/s) | $R^2$ | d (cm)     | $z_0$ (cm) | $u_*$ (cm/s) | $R^2$ | d (cm)          | $z_0$ (cm) | $u_*$ (cm/s) | $R^2$ |
| EXP1 | 0.920          | 0.029      | 2.146        | 0.946 | 0.920      | 0.036      | 2.221        | 0.944 | 0.920           | 0.049      | 2.352        | 0.935 |
| EXP2 | 1.216          | 0.065      | 2.478        | 0.992 | 1.216      | 0.078      | 2.580        | 0.988 | 1.216           | 0.106      | 2.760        | 0.974 |
| EXP3 | 2.634          | 0.194      | 3.127        | 0.895 | 2.634      | 0.235      | 3.293        | 0.910 | 2.634           | 0.320      | 3.595        | 0.928 |
| EXP4 | 3.318          | 0.306      | 3.447        | 0.890 | 3.318      | 0.371      | 3.661        | 0.914 | 3.318           | 0.504      | 4.062        | 0.948 |
| EXP5 | 3.506          | 0.305      | 3.174        | 0.916 | 3.506      | 0.370      | 3.367        | 0.939 | 3.506           | 0.503      | 3.728        | 0.971 |
| EXP6 | 4.323          | 0.411      | 3.829        | 0.948 | 4.323      | 0.498      | 4.095        | 0.968 | 4.323           | 0.677      | 4.602        | 0.988 |



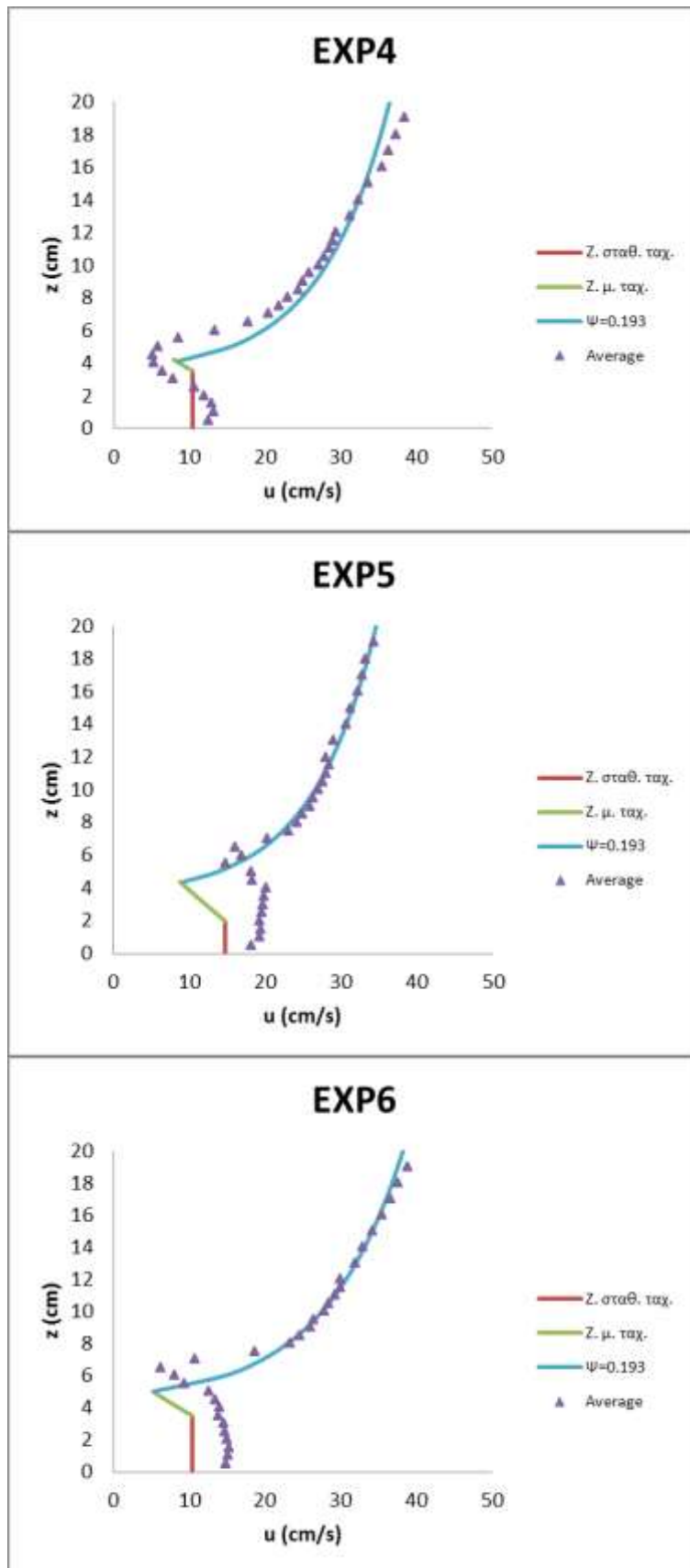
**Σχήμα 6.8α.** Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας νέου μοντέλου και πειραματικών δεδομένων για όλα τα πειράματα στην θέση B



**Σχήμα 6.8β.** Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας νέου μοντέλου και πειραματικών δεδομένων για όλα τα πειράματα στην θέση B



**Σχήμα 6.9α.** Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας νέου μοντέλου και πειραματικών δεδομένων για όλα τα πειράματα σε μέσες χωρικά τιμές



**Σχήμα 6.9β.** Συγκριτικά διαγράμματα ταχύτητας νέου μοντέλου και πειραματικών δεδομένων για όλα τα πειράματα σε μέσες χωρικά τιμές



## 7) Συμπεράσματα και προτάσεις

### 7.1. Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκε η συμπεριφορά του πεδίου ταχυτήτων σε ένα ανοικτό αγωγό παρουσία βλάστησης στο υδροδυναμικό καθεστώς στο οποίο βρίσκεται αυτή, δηλαδή εξετάζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της που συνδέονται με αυτό όπως η γεωμετρία, η πυκνότητα και η ακαμψία. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό κανάλι μήκους 16 m και πλάτους 0,50 m ενώ για την προσομοίωση βλάστησης χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι στοιχείων, που μιμούνται βυθισμένα μικρά φυτά με άκαμπτους μίσχους και πυκνό ή αραιό φύλλωμα ή χωρίς φύλλωμα: (α) Απλές ράβδοι διαμέτρου 0,5 cm και ύψους 4 cm, β) Σύνθετα στοιχεία αποτελούμενα από πλαστικές σφαίρες διαμέτρου 3,0 cm που στερεώνονται πάνω από λεπτές ράβδους διαμέτρου 0,8 cm και ύψους 5 cm, γ) Σύνθετα στοιχεία που αποτελούνται από εύκαμπτες βελόνες διατεταγμένες αξονο-συμμετρικά πάνω από τις ίδιες ράβδους. Για όλους τους τύπους στοιχείων, δοκιμάστηκαν δύο μοτίβα τοποθέτησης, σε παράλληλο και κλιμακωτό πλέγμα 10x10 cm, αποδίδοντας αντίστοιχες πυκνότητες 100 και 200 στελεχών/m<sup>2</sup>.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι η παρουσία βλάστησης επηρεάζει σημαντικά το πεδίο ροής. Τα κύρια συμπεράσματα μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

α) Υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις συνθήκες τοπικής ροής ανάλογα με τη θέση εντός της συστοιχίας βλάστησης, την εγγύτητα σε στοιχεία και τον τύπο του στοιχείου. Για όλους τους τύπους στοιχείων, η επίδραση της βλάστησης στις μετρούμενες παραμέτρους ροής βρέθηκε να αυξάνεται με την πυκνότητά της.

β) Γενικά, σοβαρή μείωση της ταχύτητας εμφανίζεται εντός της συστοιχίας κάτω από την κορυφή των στοιχείων όπου η παρουσία της βλάστησης προκαλεί εμφανείς παρεκκλίσεις των κατανομών ταχυτήτων από τη βασική μορφή χωρίς βλάστηση. Αυτό είναι πιο έντονο για τα σύνθετα στοιχεία σε σύγκριση με τα απλά στελέχη και ποικίλλει ανάλογα με τη θέση στη διάταξη. Οι ελάχιστες ταχύτητες για τα σύνθετα στοιχεία παρατηρούνται στο επίπεδο του φυλλώματος, δηλαδή στο ανώτερο (πιο ογκώδες) μέρος και μπορεί να τείνουν στο μηδέν σε ορισμένες θέσεις εκτός της ευθυγράμμισης των στοιχείων. Η μείωση της ταχύτητας είναι πιο έντονη για το κλιμακωτό (πυκνότερο) μοτίβο και για τα στοιχεία με ημιάκαμπτο φύλλωμα. Δηλαδή η μείωση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη είτε πιο κοντά στα στοιχεία, είτε για τη μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων είτε για τα μεγαλύτερα στοιχεία και επομένως η χρήση μέσης χωρικά κατανομής δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική, όπως είχε επισημάνει και ο Liu (2008), λόγω της σαφούς διαφοροποίησης της κατανομής ταχυτήτων από θέση σε θέση εντός της συστάδας.

γ) Οι τυρβώδεις διατμητικές τάσεις είναι εξαιρετικά ανομοιόμορφα κατανομημένες, ιδιαίτερα στο επίπεδο του άνω μέρους των στοιχείων, και πολύ μεγαλύτερες πάνω από την κορυφή παρά μέσα στη συστοιχία της βλάστησης. Στην πραγματικότητα, εντός της συστοιχίας είναι ως επί το πλείστον μικρότερες από ό,τι στην περίπτωση χωρίς βλάστηση. Οι τυρβώδεις διατμητικές τάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς βλάστηση, καθώς η επίδραση της βλάστησης εκτείνεται πολύ πάνω από την κορυφή της συστάδας. Οι τάσεις είναι μεγαλύτερες για τα σύνθετα στοιχεία σε σύγκριση με τα απλά στελέχη και για το κλιμακωτό (πυκνότερο) μοτίβο σε σύγκριση με το παράλληλο. Οι κατανομές των τυρβωδών τάσεων στα περισσότερα πειράματα είναι παραπλήσιες και παρουσιάζουν μέγιστα ή αιχμές στην κορυφή της συστάδας ή πλησίον αυτής, ενώ παραπάνω παρατηρείται σταδιακή μείωση, όπως και στους Souliotis & Prinos (2008).

δ) Η ένταση της τύρβης στα πειράματα με απλούς μίσχους χωρίς φύλλωμα είναι κάπως μεγαλύτερη από ό,τι χωρίς βλάστηση ειδικά στα κλιμακωτά (πυκνότερα) μοτίβα και μειώνεται σταδιακά με την απόσταση από τον πυθμένα, ενώ παρουσία φυλλώματος είναι πολύ μεγαλύτερη εντός της συστοιχίας, λόγω σοβαρής μείωσης της τοπικής μέσης ταχύτητας σε αυτή την περιοχή. Επίσης είναι γενικά μικρότερη στην περίπτωση της παράλληλης διάταξη απλών ράβδων (Πείραμα 1) σε σχέση με τα υπόλοιπα καθώς αντιστοιχεί στη μικρότερη πυκνότητα και μέγεθος στοιχείων, ενώ παρουσιάζει μέγιστα ή αιχμές κοντά στην κορυφή της συστάδας, σε συμφωνία με τον Fairbanks (1998), και πιο πάνω η κατανομή είναι ομοιόμορφη, ιδιαίτερα όσο πιο απομακρυσμένη είναι η θέση από τα στοιχεία.

ε) Συνολικά, η επίδραση του φυλλώματος και της πυκνότητας βλάστησης στο πεδίο ροής είναι πολύ σημαντική, προκαλώντας σημαντικά μεγαλύτερη μείωση της ταχύτητας, υψηλότερες διατμητικές τάσεις και ένταση τύρβης σε σύγκριση με απλούς μίσχους χωρίς φύλλωμα.

στ) Η παρουσία βλάστησης επηρεάζει το πεδίο ροής κατάντη και το αποτέλεσμα είναι εντονότερο για τα στοιχεία με φύλλωμα και για το πιο πυκνό μοτίβο. Η απόσταση που επηρεάζεται είναι τουλάχιστον διπλάσια από το πλάτος της βλάστησης και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Ωστόσο, ο τύπος του φυλλώματος, δηλαδή άκαμπτο ή ημι-εύκαμπτο περίπου παρόμοιου μεγέθους, φαίνεται να είναι μικρής σημασίας δηλαδή φαίνεται να υπάρχει περιορισμένη διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο τύπων σύνθετων στοιχείων που δοκιμάστηκαν.

ζ) Τέλος, η σύγκριση με τα αποτελέσματα των Fairbanks (1998) και Dunn et al (1996) είναι αρκετά ικανοποιητική. Οι αποκλίσεις αποδίδονται στο ότι αμφότεροι είχαν μόνο κλιμακωτή διάταξη αλλά με διαφορετικές πυκνότητες, και επίσης ο μεν πρώτος είχε σημαντικά μικρότερη βύθιση των στοιχείων ενώ οι δεύτεροι παρουσίασαν μόνο μέσες χωρικά κατανομές.

Από την ανάλυση των μοντέλων κατανομής ταχυτήτων επιβεβαιώνονται κατ' αρχήν προηγούμενες παρατηρήσεις ότι η κατανομή της ταχύτητας πάνω από τη συστάδα ακολουθεί ικανοποιητικά έναν λογαριθμικό νόμο, αλλά αποκαλύπτουν σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τον τύπο των στοιχείων και την εγγύτητα με την ευθυγράμμιση των στοιχείων. Επίσης, σε αραιές συστάδες, μια μοναδική μαθηματική έκφραση για ολόκληρη την κατανομή της ταχύτητας καθ' ύψος δεν είναι αντιπροσωπευτική. Το πεδίο ροής τείνει να είναι πιο μεταβλητό πάνω από απλούς μίσχους χωρίς φύλλωμα και λιγότερο μεταβλητό πάνω από τη σύνθετη ημιεύκαμπτη βλάστηση. Από τη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με τρεις διαφορετικούς τύπους στοιχείων βλάστησης για την αξιολόγηση των επιδράσεων της γεωμετρίας και της πυκνότητας των στοιχείων προέκυψαν τα ακόλουθα:

1. Η λογαριθμική κατανομή που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Raupach (1994) για τη ροή πάνω από τις επίγειες συστάδες είναι ικανή να περιγράφει καλά το προφίλ ταχύτητας στο στρώμα πάνω από την υδρόβια βλάστηση, με σωστό προσδιορισμό των παραμέτρων του. Διαπιστώθηκε ότι αυτές εξαρτώνται από τον τύπο και την πυκνότητα των στοιχείων της βλάστησης καθώς και από τη σχετική θέση σε σχέση με την ευθυγράμμιση των στοιχείων. Αντίθετα, το μοντέλο της Nepf (2012b), αν και ακολουθεί την ίδια λογική, δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην παρούσα περίπτωση όπου το βάθος ροής είναι ελεγχόμενο και όχι διαμορφούμενο από τη ροή.

2. Για βλάστηση χωρίς φύλλωμα, δηλαδή απλούς μίσχους, η ταχύτητα γενικά μειώνεται σταδιακά προς τον πυθμένα, εκτός από θέσεις που βρίσκονται κοντά στα στοιχεία όπου εμφανίζεται απότομη μείωση. Έτσι, εξαιρουμένων αυτών των θέσεων, μια ενοποιημένη κατανομή ταχύτητας, όπως αυτή που προτείνεται από τους Carollo et al. (2002), παρέχει καλή εφαρμογή με τις μετρήσεις σε ολόκληρη τη στήλη νερού.

3. Για βλάστηση με φύλλωμα, η κατανομή της ταχύτητας κάτω από την κορυφή της συστάδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχετική θέση στη συστοιχία βλάστησης και σε μικρότερο βαθμό από τη διάταξη/πυκνότητα. Σε πολλές θέσεις, η κατανομή παρουσιάζει μια ελάχιστη τιμή στο επίπεδο του φυλλώματος, με τη μείωση της ταχύτητας να είναι πιο έντονη μεταξύ της ευθυγράμμισης των στοιχείων. Αυτή ακριβώς η συμπεριφορά του προφίλ της ταχύτητας όταν πρόκειται για σύνθετα στοιχεία είναι μάλλον αδύνατο να περιγραφεί από ένα ενοποιημένο μοντέλο καθιστώντας αναγκαία την δημιουργία ενός σύνθετου μοντέλου κατανομής ταχύτητας βασισμένο στην διαστρωμάτωση της ροής.

4. Ο τύπος φυλλώματος παρόμοιου μεγέθους, δηλαδή πυκνό/άκαμπτο ή αραιό/εύκαμπτο, φαίνεται να έχει δευτερεύουσα σημασία όσον αφορά τα κύρια χαρακτηριστικά της κατανομής της ταχύτητας, όπως η μέγιστη μείωση της ταχύτητας στο επίπεδο του φυλλώματος και η ταχύτητα διάτμησης που προσφέρεται στο ανώτερο ελεύθερο στρώμα.

Δοκιμάστηκε ένα αναλυτικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας για βλάστηση με σφαιρικό φύλλωμα που δομήθηκε με βάση προκαταρκτικά πειράματα της παρούσας εργασίας και θεωρητικές παραδοχές για το διαχωρισμό της κατανομής ταχυτήτων σε ζώνες και την αναλυτική μορφή των επιμέρους κατανομών. Αν και το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει καλά την κίνηση της ροής υπό την επίδραση σφαιρικής βλάστησης, ορισμένοι περιορισμοί και αδυναμίες παραμένουν να αντιμετωπιστούν σε μελλοντικές μελέτες. Κατ' αρχήν χρησιμοποιούνται πολλές προσδιοριστέες παράμετροι, οι τιμές των οποίων καθορίστηκαν εδώ ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη προσαρμογή με τα αποτελέσματα περιορισμένου αριθμού πειραμάτων με συγκεκριμένη βλάστηση σφαιρικού σχήματος. Επομένως για διαφορετικές μορφολογίες βλάστησης, ή ακόμα και για διαφορετικές πυκνότητες και γεωμετρίες, αυτές οι παράμετροι πιθανότατα απαιτούν τροποποίηση με περαιτέρω διερεύνηση. Το γεγονός αυτό κάνει το μοντέλο δύσχρηστο για γενικότερη εφαρμογή, όπως όλα τα μοντέλα που βασίζονται στην βελτιστοποίηση πάνω σε πειραματικά δεδομένα.

Τέλος παρουσιάστηκε ένα νέο πιο απλοποιημένο και πιο γενικό μοντέλο κατανομής ταχύτητας, που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για κάθε γεωμετρία βλάστησης και το οποίο προκύπτει από συνδυασμό θεωριών. Ακολουθήθηκε μια διαδικασία διαχωρισμού της ροής σε ζώνες κατά την κατακόρυφη διεύθυνση: (α) στη βαθύτερη ζώνη η κατανομή ταχύτητας θεωρείται ομοιόμορφη και εφαρμόζεται η εξίσωση σταθερής ταχύτητας σύμφωνα με τη Nepf (2012b) και άλλους ερευνητές, (β) στην ενδιάμεση ζώνη η ταχύτητα βαίνει μειούμενη μέχρι το ελάχιστό της που εντοπίζεται πίσω από το πιο ογκώδες μέρος της βλάστησης (φύλλωμα) και εφαρμόζεται η μέθοδος σειρών σύμφωνα με τους Wang et al. (2023), (γ) η ανώτερη ζώνη περιλαμβάνει την περιοχή της βλάστησης πάνω από το ελάχιστο και την ανεμπόδιστη ροή στην οποία η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια λογαριθμικά σύμφωνα με το μοντέλο του Raupach (1994). Το νέο μοντέλο κατανομής ταχύτητας φαίνεται να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διατριβής έχοντας σαν πλεονέκτημα την απλότητα στην εφαρμογή του. Θα πρέπει όμως να τονιστεί η αναγκαιότητα εφαρμογής του και σε πειράματα με βλάστηση διαφορετικής γεωμετρίας για να επαληθευτεί η εγκυρότητα του.

Τα παρόντα συμπεράσματα περιορίζονται, κατ' αρχήν, από την εξιδανικευμένη μορφή των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Η φυσική βλάστηση με πιο σύνθετη γεωμετρία και τυχαιότητα μοτίβων είναι πιθανό να εισάγει πρόσθετη μεταβλητότητα για τις συνθήκες ροής. Τα συμπεράσματα μπορούν να έχουν πρακτική φυσική σημασία, όπως να βοηθήσουν στον εντοπισμό επικίνδυνων ή κατάλληλων περιοχών για καταφύγιο υδρόβιων ειδών.

## **7.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Η πειραματική διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ροής-βλάστησης πραγματοποιήθηκε

για συγκεκριμένες συνθήκες. Γενικότερα, η μελλοντική έρευνα πρέπει να επικεντρωθεί στην συγκριτική μελέτη πολλών και ποικίλων γεωμετριών βλάστησης με περισσότερα σημεία μέτρησης και διαφορετικές συνθήκες ροής και πυκνότητας ώστε να επαληθευτεί η εγκυρότητα του νέου μοντέλου κατανομής ταχύτητας. Συγκεκριμένα, θα ήταν απαραίτητο να γίνουν πιο πυκνές μετρήσεις όσο πιο κοντά γίνεται και γύρω από τα στοιχεία βλάστησης με ακόμα μεγαλύτερης ακρίβειας ταχύμετρα (π.χ. λέιζερ) ώστε να εμφανιστεί πλήρως η εξέλιξη του πεδίου ροής σε εγγύτητα με το στοιχείο. Επίσης αυτά τα στοιχεία πρέπει να ποικίλουν σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενώ ενδιαφέρον θα είχε να εξεταστούν σαν σύμπλεγμα και όχι μόνο σαν μεμονωμένα στοιχεία, σε διάφορες διατάξεις (πυκνότητες) με πιο τυχαία μοτίβα τοποθέτησης ή πιο ρεαλιστικά, όπως λωρίδες ή συμπλέγματα πυκνής βλάστησης με όμορες περιοχές χωρίς βλάστηση. Επιπλέον, θα ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν πειράματα σε αγωγό μεγαλύτερου πλάτους ή μεγαλύτερου λόγου πλάτους προς βάθος από 2 που είναι στην παρούσα μελέτη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των πλευρικών ορίων. Πέρα από αυτά, το νέο μοντέλο κατανομής ταχύτητας θα πρέπει να δοκιμαστεί και σε διαφορετικές συνθήκες ροής πιο ρηχές ή ακόμα και αναδυόμενες σε αντίθεση με τις βαθιές συνθήκες ροής της παρούσας εργασίας, ώστε να ερευνηθεί αν μπορεί να επεκταθεί σε αυτές.

Τέλος, στην παρούσα εργασία επιδιώχθηκε μια προκαταρκτική διερεύνηση της περιοχής κατάντη της βλάστησης καθώς είναι λογικό το πεδίο των ταχυτήτων να μη μπορεί να επανέλθει άμεσα μετά το πέρας της περιοχής βλάστησης. Γενικά η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη στο θέμα αυτό και για αυτό επιχειρήθηκε η διερεύνηση του. Από τα αποτελέσματα καταδείχθηκε ότι η επίδραση της περιοχής βλάστησης επεκτείνεται έξω από αυτήν προς τα κατάντη ενώ φαίνεται επίσης να συμβάλουν στην επίδραση αυτή η πυκνότητα και το είδος των στοιχείων βλάστησης. Έτσι σε μελλοντική έρευνα θα πρέπει να διερευνηθεί αυτή τη περιοχή λεπτομερώς ως προς την έκταση της για ποικίλα είδη και πυκνότητες βλάστησης, κάνοντας μετρήσεις σε ένα πυκνό πλέγμα θέσεων σε αυτή τη περιοχή σκιαγραφώντας την εξέλιξη του πεδίου ταχυτήτων και διατμητικών τάσεων που θα φανερώσει την υπό έρευνα επίδραση.

## Δημοσιεύσεις από τη διατριβή

### Διεθνή επιστημονικά περιοδικά μετά από κρίση

- Wang W-J., Zhao F., Mavrommatis A., Christodoulou G., Stamou A., Jia F-C., (2023) Velocity distribution characteristics for rigid vegetation model with spherical canopy: An analytical study adopting multiple mathematical methods, *Journal of Hydrology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129376>
- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2022) Comparative experimental study of flow through various types of simulated vegetation. *Environmental Processes*, 9, 33. <https://doi.org/10.1007/s40710-022-00576-w> (Πλήθος ετεροαναφορών: 5)
- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2022) Velocity distribution in channels with submerged vegetation, *Fluids*, 7, 290. <https://doi.org/10.3390/fluids7090290> (Πλήθος ετεροαναφορών: 1)
- Zhao F., Mavrommatis A., Stamou A., Wenxin H., Zhonghua Y. (2018), Experiments on characteristics of open-channel flow through submerged rigid vegetation with ball-like canopy, *Shuili Xuebao*, 49 (3), 353-361. doi : 10.13243/j.cnki.slx.20170778 (Πλήθος ετεροαναφορών: 2)

### Πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων μετά από κρίση

- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2022), Velocity distribution above different types of simulated vegetation, *Proceedings of 7th IAHR Europe Congress*, 7–9 September 2022, Athens, Greece
- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2020) Experimental study of flow through vegetation stems with foliage. *Proceedings of 15th International Conference on Protection and Restoration of the Environment*, Patras, Greece, 129-136
- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2019) Comparative study of flow through vegetation stems with and without foliage. *Proceedings of 16th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST2019)*, Rhodes, Greece (Πλήθος ετεροαναφορών: 1)
- Mavrommatis A. and Christodoulou G. (2016) Flow field experiments in a channel with artificial vegetation. *Proceedings of 13th International Conference on Protection and Restoration of the Environment*, Mykonos, Greece, 26-31

## **Πρακτικά πανελληνίων επιστημονικών συνεδρίων μετά από κρίση**

- Μαυρομμάτης Α. και Χριστοδούλου Γ. (2019), Επίδραση της μορφής και διάταξης βυθισμένης άκαμπτης βλάστησης στο πεδίο ροής, *Πρακτικά του 14<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης*, 16-17 Μαΐου, Βόλος, Ελλάδα, 441-450.

## Αναφορές

- Aberle J., Järvelä J. (2013), Flow resistance of emergent rigid and flexible floodplain vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, 51 (1), 33-45
- Anderson B.G., Western A.W. and Rutherford I.D. (2005), ROVER: Introducing a unified model to estimate the hydraulic resistance of vegetation, *Computer Science*, 2876-2882
- Carollo F. G., Ferro V., and Termini D. (2002), Flow velocity measurements in vegetated channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (7), 664-673
- Carollo F. G., Ferro V., and Termini D. (2005), Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (7), 554-564
- Chen C. (1976), Flow resistance in broad shallow grassed channels, *Journal of The Hydraulics Division*, HY3 (3), 307-322
- Chen L., Stone M. C., Acharya K., Steinhaus K. A. (2011), Mechanical analysis for emergent vegetation in flowing fluids, *Journal of Hydraulic Research*, 49 (6), 766-774
- Chen S.C., Kuo Y.M., Li Y.H. (2011), Flow characteristics within different configurations of submerged flexible vegetation, *Journal of Hydrology*, 398, 124–134
- Chen Y. C., Kao S. P., Lin J. Y., Yang H. C. (2009), Retardance coefficient of vegetated channels estimated by the Froude number, *Ecological Engineering*, 35, 1027–1035
- Choi S. and Kang H. (2016), Characteristics of mean flow and turbulence statistics of depth-limited flows with submerged vegetation in a rectangular open-channel, *Journal of Hydraulic Research*, 54 (5), 527–540
- Chow V. T. (1959), *Open-channel hydraulics*, McGraw–Hill, New York
- Christodoulou G. C. (2014), Equivalent roughness of submerged obstacles in open-channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (2), 226-230
- Csuka Z., Olšiak R. (2016), The profile of shear stress in the liquid at turbulent flow, *AIP Conference Proceedings*, 1768, 020032, <https://doi.org/10.1063/1.4963054>
- Dijkstra J., Uittenbogaard R., (2010) Modeling the interaction between flow and highly flexible aquatic vegetation. *Water Resour. Res.*, 46 (12)
- Dunn C., Lopez F. and Garcia M.H. (1996) Mean flow and turbulence in a



laboratory channel with simulated vegetation, *Hydraulic Eng. Ser. 51*, University of Illinois, Urbana, IL, USA, 162 pp

- Erduran K. S. and Kutija V. (2003), Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation, *Journal of Hydroinformatics*, 05.3, 189–202

- Fairbanks J.D. (1998) Velocity and turbulence characteristics in flows through rigid vegetation, *MSc Dissertation*, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA, USA, 190 pp

- Ghazvinizadeh S., Jamali M. (2010), Effects of depth variation of vegetation density on vertical mixing, in *Environmental Hydraulics*, Christodoulou and Stamou (eds), Balkema, 247-252

- Ghisalberti M, Nepf HM (2002) Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *Journal of Geophysical Research* 107(C2):3-1—3-11. doi: 10.1029/2001JC000871

- Green J. C. (2005), Velocity and turbulence distribution around lotic macrophytes, *Aquatic Ecology*, 39, 1–10

- Huai W.X., Zeng Y.H., Xu Z.G., Yang Z.H. (2009), Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation, *Advances in Water Resources*, 32, 487–492

- Huai W., Chen G., Zeng Y., (2013a) Predicting apparent shear stress in prismatic compound open channels using artificial neural networks, *J. Hydroinf.*, 15 (1),138–146.

- Huai W.X., Wang W., Zeng Y.H. (2013b), Two-layer model for open channel flow with submerged flexible vegetation, *J. Hydraul. Res.*, 2013, 51, 708–718

- Huthoff F., Augustijn D. C. M., and Hulscher S. J. M. H. (2007), Analytical solution of the depth-averaged flow velocity in case of submerged rigid cylindrical vegetation, *Water Resour. Res.*, 43

- Järvelä J. (2002), Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants, *Journal of Hydrology*, 269, 44–54

- Klopstra, D.; Barneveld, H.J.; van Noortwijk, J.M.; van Velzen, E.H. (1997), Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation. In *Proceedings of the 27th Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Theme A, Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance, San Francisco, CA, USA, 10–15 August, pp. 775–780.

- Kouwen N., and Unny T. E. (1973), Flexible roughness in open channels, *J. Hydraul. Div., A.S.C.E.*, 99 (5), 713–728
- Kouwen N., Unny T. E., Hill H. M. (1969), Flow retardance in vegetated channels, *Journal of The Irrigation And Drainage Division, A.S.C.E.*, 95 (2), 329-343
- Li Y., Wang Y., Anim D. O., Tang C., Du W., NiβL., Yu Z., Acharya K. (2014), Flow characteristics in different densities of submerged flexible vegetation from an open-channel flume study of artificial plants, *Geomorphology*, 204, 314–324
- Liu D, Diplas P, Fairbanks JD, Hodges CC (2008) An experimental study of flow through rigid vegetation, *Journal of Geophysical Research*, 113: F04015, doi:10.1029/2008JF001042
- Liu D. (2008), Flow through rigid vegetation hydrodynamics, *MSc Dissertation*, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA, USA, 82 pp
- Lou S, Chen M, Ma G, Liu S, Zhong G, Zhang H (2021) Modelling of stem-scale turbulence and sediment suspension in vegetated flow, *Journal of Hydraulic Research*, 59(3):355-377. doi: 10.1080/00221686.2020.1780491
- Luhar M., Nepf H. M. (2011), Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation, *Limnology And Oceanography*, 56(6), 2003–2017
- Luhar M., Nepf H. M. (2012), From the blade scale to the reach scale: A characterization of aquatic vegetative drag, *Advances In Water Resources*, 51, 305-316
- Mulahasan S, Stoesser T (2017) Flow resistance of in-line vegetation in open channel flow, *International Journal of River Basin Management*, 15 (3):329–334
- Nepf H. M. (1999), Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, *Water Resource Research*, 35, 479-489
- Nepf H. M. (2012a), Hydrodynamics of vegetated channels, *Journal of Hydraulic Research*, 50 (3), 262-279
- Nepf H. M. (2012b), Flow and transport in regions with aquatic vegetation, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 44, 123–142
- Nepf H.M., Vivoni ER (2000) Flow structure in depth-limited, vegetated flow, *Journal of Geophysical Research*, 105, 28547–28557
- Nikora N. (2017) Drag and Reynolds stress distribution within submerged vegetation canopies, In: *Proc. 37th IAHR World Congress*, pp 2793- 2802, Kuala Lumpur, Malaysia.

- Nikora V., Larned S., Nikora N., Debnath K., Cooper G. and Reid M. (2008), Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field Study, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (9), 1326-1332
- Nikuradse J.(1933) Strömungsgesetze in rauhen Röhren. *Forschungsheft*361. Ausgabe B. Band 4
- Okamoto T., Nezu I. (2010), Resistance and turbulence structure in open-channel flows with flexible vegetations, in *Environmental Hydraulics*, Christodoulou and Stamou (eds), Balkema, 215-220
- Petryk S., Bosmajian G. (1975), Analysis of flow through vegetation, *Journal of The Hydraulics Division*, A.S.C.E., HY7 (7), 871-884
- Poggi D., Porporato A., Ridolfi L., Albertson J. D. and Katul G. G.(2004) The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, 111, 565–587
- Raupach M. R. (1994), Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index, *Boundary-Layer Meteorology*, 71, 211-216
- Raupach, M.R. (1992), Drag and drag partition on rough surfaces, *Bound.-Layer Meteorol.*, 60, 375–395.
- Rhee D. S., Woo H., Kwon B. A. and Ahn H. K. (2008), Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows, *River Research And Applications*, 24, 673–687
- Righetti M., Armanini A. (2002), Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes, *Journal of Hydrology*, 269, 55–64
- Shi H., Liang X., Huai W., Wang Y. (2019), Predicting the bulk average velocity of open-channel flow with submerged rigid vegetation, *Journal of Hydrology*, 572, 213–225
- Shi J.Z., Li Y.H., Hughes J.M.R., Zhao M. (2010), Laboratory measurement and analysis of hydraulic parameters in vegetated river flows, in *Environmental Hydraulics*, Christodoulou and Stamou (eds), Balkema, 221-226
- Shi Z. and Hughes J. M. R. (2002), Laboratory flume studies of microflow environments of aquatic plants, *Hydrological Processes*, 16, 3279–3289
- Shimizu Y., Tsujimoto T., Nakagawa H., Kitamura T., (1991) Experimental study on flow over rigid vegetation simulated by cylinders with equi-spacing, *Doboku*

*Gakkai Ronbunshu*, 438, 31–40.

- Siniscalchi F., Nikora V.(2013), Dynamic reconfiguration of aquatic plants and its interrelations with upstream turbulence and drag forces, *Journal of Hydraulic Research*, 51 (1), 46-55

- Sonnenwald F., Stovin V.& Guymer I. (2019) Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, 57 (4), 591-597

- Souliotis D, Prinos P (2008) Turbulence in vegetated flows: Volume-average analysis and modelling aspects, *Acta Geophys*, 56:894–917

- Souliotis D., Prinos P. (2010), Effect of blockage factor on vegetated channel resistance, in *Environmental Hydraulics*, Christodoulou and Stamou (eds), Balkema, 227-232

- Stamou A.I., Papadonikolaki G, Gkesouli A, Nikolettopoulos A (2012) Modeling the effect of vegetation on river floodplain hydraulics, *Global NEST J* 14(3):371–377

- Stephan U. and Gutkecht D. (2002), Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation, *Journal of Hydrology*, 269, 27-43

- Stone B. M., Shen H. T. (2002), Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (5), 500-506

- Tanaka T. and Ohmoto T. (2017) Influence of longitudinally discontinuous vegetation arrangement pattern on turbulent structure in open channel, In: *Proc. 37th IAHR World Congress*, pp 2793- 2802, Kuala Lumpur, Malaysia

- Tanino Y. and Nepf H. M. (2008), Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (1), 34-41

- Tsihrintzis V. A. (2001), Discussion of “Variation on roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 241

- Tsihrintzis V. A. and Madiedo E. E. (2000), Hydraulic resistance determination in marsh wetlands, *Water Resources Management*, 14, 285–309

- Valyrakis M., Yagci O., Watt S. (2014), Experimental investigation of the effects of different types of aquatic vegetation on the flow field, *Proceedings of the 7th International Symposium on Environmental Hydraulics*

- Velasco D., Bateman A., Redondo J. and Demedina V. (2003), An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization

over flexible vegetated linings, *Flow Turbulence And Combustion*, 70, 69-88

- Wang W.J., Huai W.X., Thompson S., Katul G.G., (2015) Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation, *Water Resour. Res.*, 51 (12), 10047–10064

- Wang W-J., Zhao F., Mavrommatis A., Christodoulou G., Stamou A., Jia F-C., (2023) Velocity distribution characteristics for rigid vegetation model with spherical canopy: An analytical study adopting multiple mathematical methods, *Journal of Hydrology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129376>

- Wilson C. A. M. E., Stoesser T., Bates P. D., and Batemann Pinzen A. (2003), Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (11), 847-853

- Wu F. C., Shen H. W., Chou Y. J. (1999), Variation of on roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (9), 934-942

- Μαυρομάτης Α. (2011) Πειραματική προσομοίωση βλάστησης σε ανοικτό αγωγό, MSc *Διπλωματική*, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Ελλάδα, 108σελ

- Νουτσόπουλος, Γ. και Χριστοδούλου, Γ. (1996), *Μαθήματα μηχανικής των ρευστών*, ΕΜΠ, Αθήνα

- Παπανικολάου Π. Ν., (2010), *Στοιχεία μηχανικής των ρευστών*, Διδακτικές σημειώσεις, Αθήνα

- Στάμου Α. (2011), *Εφαρμοσμένη υδραυλική, ροή υπό πίεση και με ελεύθερη επιφάνεια*, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

## **Παράρτημα (Appendix)**

**Πίνακες πειραματικών αποτελεσμάτων  
(Tables of experimental results)**

Πίνακας γενικών πληροφοριών πειραμάτων  
(Table of general information of experiments)

| exp. | vegetation pattern | vegetation type      | vegetation density       | Κοινά βασικά μεγέθη<br>(Common basic parameters) |
|------|--------------------|----------------------|--------------------------|--|
| Exp0 |                    |                      |                          | H (cm) =25                                       |
| Exp1 | parallel           | simple rigid         | 100 stems/m <sup>2</sup> | b (cm) =50                                       |
| Exp2 | staggered          | simple rigid         | 200 stems/m <sup>2</sup> | Q (m <sup>3</sup> /sec)=0.04094                  |
| Exp3 | parallel           | complex semiflexible | 100 stems/m <sup>2</sup> | V=Q/(bH)(m/s)=<br>0.32752                        |
| Exp4 | staggered          | complex semiflexible | 200 stems/m <sup>2</sup> |  |
| Exp5 | parallel           | complex rigid        | 100 stems/m <sup>2</sup> |  |
| Exp6 | staggered          | complex rigid        | 200 stems/m <sup>2</sup> |  |

### Πείραμα (Experiment) 0

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|--|--|---|--|--|--|
| 0.510  | 26.099   | -0.628   | -0.050   | -0.965   | -1.419   | -0.128  | 10.032   | 6.710  | 1.549  |
| 1.030  | 27.437   | -0.536   | -0.008   | -1.293   | -1.428   | -0.251  | 10.683   | 6.308  | 1.547  |
| 1.550  | 27.645   | -0.587   | 0.026    | -1.535   | -1.351   | -0.054  | 10.921   | 5.950  | 1.793  |
| 2.060  | 28.481   | -0.605   | 0.106    | -1.575   | -1.714   | -0.074  | 10.409   | 5.713  | 1.946  |
| 2.540  | 29.728   | -0.736   | 0.104    | -1.205   | -1.264   | -0.259  | 13.354   | 6.188  | 1.859  |
| 2.990  | 29.964   | -0.556   | 0.166    | -1.859   | -1.572   | -0.020  | 11.299   | 5.625  | 1.991  |
| 4.040  | 30.727   | -0.537   | 0.256    | -1.597   | -1.492   | -0.150  | 11.342   | 6.879  | 1.975  |
| 5.010  | 31.646   | -0.538   | 0.416    | -1.532   | -1.277   | -0.232  | 12.000   | 7.317  | 2.086  |
| 6.040  | 32.613   | -0.592   | 0.417    | -1.504   | -1.280   | -0.230  | 10.662   | 6.478  | 2.069  |
| 7.030  | 33.402   | -0.508   | 0.428    | -1.782   | -0.963   | -0.230  | 9.398  | 5.676  | 2.169  |
| 8.010  | 33.695   | -0.457   | 0.584    | -1.645   | -1.194   | -0.088  | 9.535  | 6.568  | 2.074  |
| 9.050  | 33.701   | -0.374   | 0.584    | -2.008   | -0.649   | -0.035  | 8.996  | 6.370  | 1.937  |
| 10.020 | 33.922   | -0.304   | 0.592    | -1.778   | -0.580   | -0.012  | 8.936  | 6.265  | 2.006  |
| 11.010 | 34.153   | -0.148   | 0.639    | -1.191   | -0.638   | -0.072  | 8.510  | 6.333  | 2.079  |
| 12.040 | 34.272   | -0.106   | 0.573    | -1.098   | -0.410   | -0.204  | 8.318  | 5.945  | 2.104  |
| 13.040 | 34.440   | 0.016    | 0.569    | -0.868   | -0.147   | -0.360  | 8.798  | 6.131  | 1.937  |
| 14.040 | 34.535   | -0.046   | 0.480    | -5.009   | 0.343  | 0.970   | 25.184   | 19.483   | 2.694  |
| 15.000 | 34.718   | 0.224    | 0.366    | -0.065   | -0.350   | -0.504  | 6.684  | 6.916  | 2.060  |
| 16.010 | 34.580   | 0.401    | 0.153    | 0.201  | 0.901  | -0.228  | 19.792   | 11.919   | 2.410  |
| 17.000 | 34.547   | 0.300    | 0.018    | 0.356  | -0.535   | -0.467  | 6.016  | 6.141  | 1.984  |
| 18.010 | 34.396   | 0.359    | -0.135   | -0.361   | -0.360   | -0.255  | 6.158  | 5.416  | 1.877  |
| 19.020 | 34.279   | 0.436    | 0.452    | -0.101   | -0.334   | -0.256  | 4.624  | 4.393  | 1.634  |

## Πείραμα (Experiment) 1

### ΘΕΣΗ (POSITION) A

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.510  | 13.731   | -0.267   | 0.630    | -1.309  | 1.556   | 0.076  | 14.565  | 3.739   | 1.072   |
| 1.020  | 16.123   | -2.444   | 0.225    | -1.773  | 1.209   | 2.528  | 13.587  | 10.414  | 2.107   |
| 1.530  | 18.304   | -0.791   | 0.058    | -3.876  | -0.724  | 1.124  | 13.930  | 9.494   | 3.523   |
| 1.990  | 19.464   | -0.854   | 0.250    | -1.552  | -2.529  | -0.245   | 16.878  | 11.948  | 4.667   |
| 2.510  | 16.714   | 0.112    | 1.315    | -1.121  | 2.625   | -0.317   | 15.958  | 2.647   | 1.639   |
| 3.050  | 9.914    | -2.024   | -0.072   | -2.257  | 0.985   | 1.156  | 31.343  | 7.093   | 1.508   |
| 3.510  | 15.988   | -1.505   | -0.257   | -3.644  | -3.230  | 0.802  | 17.756  | 9.298   | 2.813   |
| 4.000  | 26.400   | -0.514   | 0.468    | -2.803  | -3.218  | -0.681   | 17.741  | 9.628   | 4.391   |
| 4.500  | 26.814   | -0.603   | 0.308    | -3.000  | -3.487  | -0.222   | 16.738  | 10.072  | 4.537   |
| 5.000  | 27.475   | -0.421   | 0.248    | -2.850  | -2.658  | -0.386   | 15.281  | 9.719   | 4.188   |
| 5.500  | 28.583   | -0.440   | 0.090    | -2.491  | -3.106  | -0.701   | 16.345  | 10.363  | 4.295   |
| 6.000  | 28.738   | -0.290   | 0.346    | -2.352  | -2.951  | -0.217   | 14.717  | 10.114  | 4.415   |
| 6.500  | 29.399   | -0.276   | 0.369    | -2.881  | -2.659  | -0.119   | 13.894  | 9.462   | 4.293   |
| 7.000  | 29.503   | -0.177   | 0.370    | -2.329  | -2.505  | -0.363   | 13.444  | 9.189   | 4.184   |
| 7.500  | 29.657   | -0.214   | 0.479    | -2.832  | -2.351  | -0.396   | 13.953  | 9.152   | 4.412   |
| 8.000  | 29.858   | -0.186   | 0.522    | -1.867  | -2.515  | -0.436   | 12.829  | 8.775   | 4.849   |
| 8.500  | 29.911   | -0.043   | 0.503    | -1.453  | -2.571  | -0.216   | 12.700  | 8.517   | 4.392   |
| 9.000  | 30.259   | 0.006    | 0.577    | -1.824  | -2.442  | -0.478   | 12.439  | 8.393   | 4.414   |
| 9.500  | 30.770   | 0.035    | 0.646    | -1.352  | -2.042  | -0.261   | 11.069  | 8.147   | 4.430   |
| 10.000 | 30.966   | -0.023   | 0.428    | -1.395  | -2.064  | -0.389   | 11.353  | 7.243   | 4.185   |
| 10.500 | 31.479   | 0.081    | 0.449    | -1.443  | -2.280  | -0.319   | 11.626  | 7.852   | 4.648   |
| 11.000 | 31.513   | 0.050    | 0.548    | -1.587  | -2.228  | -0.179   | 11.642  | 8.059   | 4.288   |
| 11.500 | 31.981   | 0.160    | 0.471    | -1.437  | -1.682  | -0.411   | 10.310  | 7.241   | 4.384   |
| 12.000 | 32.552   | 0.155    | 0.335    | -1.695  | -2.281  | -0.538   | 11.420  | 7.394   | 4.517   |
| 13.000 | 32.528   | 0.114    | 0.365    | -0.932  | -1.792  | -0.316   | 9.383   | 6.432   | 4.171   |
| 14.000 | 33.284   | 0.304    | 0.235    | -0.255  | -1.583  | -0.416   | 9.178   | 6.521   | 3.938   |
| 15.000 | 33.507   | 0.326    | 0.216    | -0.467  | -1.679  | -0.150   | 8.885   | 6.120   | 3.867   |
| 16.000 | 33.856   | 0.168    | -0.002   | -0.024  | -2.157  | -0.164   | 8.018   | 6.112   | 3.843   |
| 17.000 | 34.445   | 0.326    | -0.179   | -0.077  | -2.130  | -0.177   | 8.400   | 5.786   | 3.814   |
| 18.000 | 35.274   | 0.303    | -0.499   | -0.002  | -1.850  | -0.276   | 7.256   | 5.176   | 3.405   |
| 19.000 | 35.759   | 0.288    | -0.243   | -0.441  | -2.087  | 0.048  | 7.993   | 4.862   | 3.203   |



## ΘΕΣΗ (POSITION) B

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 18.380   | -0.828   | -0.062   | -4.380  | -1.002  | 0.279   | 16.081  | 11.059  | 2.964   |
| 1.010  | 18.875   | -0.714   | -0.331   | -3.766  | -1.145  | -0.400  | 19.940  | 11.881  | 3.850   |
| 1.540  | 19.084   | -0.408   | -0.324   | -3.505  | -2.120  | -0.983  | 20.841  | 13.342  | 4.913   |
| 2.010  | 20.151   | -0.432   | -0.577   | -3.218  | -2.396  | -1.235  | 20.296  | 11.787  | 4.926   |
| 2.520  | 22.270   | -0.346   | -0.665   | -3.748  | -3.132  | -1.835  | 21.835  | 12.859  | 5.671   |
| 3.040  | 23.454   | -0.784   | -0.427   | -3.201  | -3.021  | -1.120  | 18.814  | 10.808  | 4.484   |
| 3.530  | 24.478   | -0.751   | -0.244   | -3.722  | -2.818  | -0.969  | 19.599  | 10.346  | 4.203   |
| 4.040  | 26.080   | -0.810   | -0.166   | -3.300  | -2.706  | -0.664  | 16.654  | 10.180  | 4.411   |
| 4.510  | 26.183   | -0.609   | 0.100    | -3.407  | -3.019  | -0.423  | 15.980  | 9.383   | 4.433   |
| 5.020  | 27.064   | -0.837   | 0.196    | -3.304  | -3.138  | -0.900  | 17.137  | 9.590   | 4.859   |
| 5.540  | 27.290   | -0.514   | 0.188    | -2.743  | -2.250  | -0.756  | 14.939  | 9.283   | 4.310   |
| 6.030  | 27.883   | -0.397   | 0.318    | -3.213  | -2.031  | -0.420  | 14.320  | 8.896   | 3.941   |
| 6.530  | 28.081   | -0.315   | 0.364    | -2.491  | -2.749  | -0.683  | 15.348  | 8.818   | 4.401   |
| 7.020  | 28.985   | -0.439   | 0.355    | -3.524  | -2.490  | -0.270  | 15.807  | 8.921   | 4.543   |
| 7.540  | 28.652   | -0.322   | 0.561    | -2.044  | -2.110  | -0.577  | 11.977  | 8.399   | 4.328   |
| 8.040  | 29.212   | -0.182   | 0.617    | -1.996  | -1.882  | -0.345  | 12.154  | 8.514   | 4.453   |
| 8.540  | 29.600   | -0.124   | 0.429    | -2.233  | -2.418  | -0.429  | 12.769  | 8.197   | 4.744   |
| 9.050  | 29.278   | -0.045   | 0.566    | -1.876  | -2.441  | -0.425  | 12.451  | 7.825   | 4.937   |
| 9.550  | 30.369   | -0.045   | 0.351    | -2.050  | -1.444  | -0.425  | 10.292  | 7.791   | 4.031   |
| 10.010 | 29.726   | -0.069   | 0.652    | -1.944  | -2.255  | -0.400  | 11.513  | 7.483   | 4.630   |
| 10.530 | 30.232   | 0.133    | 0.463    | -1.388  | -1.919  | -0.140  | 9.655   | 7.405   | 4.444   |
| 11.020 | 30.606   | 0.125    | 0.362    | -1.797  | -2.249  | -0.549  | 10.901  | 7.500   | 4.702   |
| 11.550 | 30.951   | 0.190    | 0.532    | -1.096  | -1.963  | -0.245  | 9.365   | 7.078   | 4.603   |
| 12.030 | 31.480   | 0.118    | 0.427    | -1.326  | -2.092  | -0.371  | 11.044  | 7.106   | 4.599   |
| 13.020 | 31.991   | 0.096    | 0.326    | -1.168  | -1.711  | -0.412  | 9.145   | 7.015   | 4.024   |
| 14.030 | 32.623   | 0.279    | 0.230    | -0.786  | -2.004  | -0.242  | 8.199   | 6.434   | 4.150   |
| 15.040 | 32.904   | 0.443    | 0.121    | -0.192  | -2.030  | -0.480  | 9.099   | 6.353   | 3.965   |
| 16.040 | 33.914   | 0.367    | 0.021    | -0.044  | -1.929  | -0.113  | 8.010   | 5.964   | 3.974   |
| 17.050 | 34.337   | 0.380    | -0.184   | 0.437   | -2.640  | -0.114  | 9.065   | 5.827   | 4.096   |
| 18.030 | 34.953   | 0.275    | -0.514   | -0.046  | -2.237  | -0.064  | 8.708   | 5.368   | 3.556   |
| 19.030 | 36.019   | 0.163    | -0.548   | 0.260   | -2.242  | -0.041  | 7.957   | 5.062   | 3.159   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) C

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.550  | 8.933    | -3.621   | 0.280    | 5.755   | -2.515  | -1.930  | 24.926  | 18.343  | 1.629   |
| 1.020  | 13.170   | -4.265   | 0.247    | 0.908   | -4.064  | -0.050  | 40.274  | 24.847  | 3.247   |
| 1.540  | 9.887    | -3.007   | -0.023   | 2.621   | -3.909  | -1.184  | 32.905  | 19.711  | 2.446   |
| 2.020  | 15.866   | -2.392   | 0.576    | 1.001   | -1.005  | 0.133   | 52.619  | 24.896  | 3.548   |
| 2.510  | 12.044   | -1.342   | 0.452    | 1.289   | -0.744  | -1.681  | 45.818  | 17.257  | 2.906   |
| 3.060  | 9.544    | -0.225   | 0.513    | -0.489  | 1.790   | -1.168  | 31.496  | 6.617   | 1.426   |
| 3.530  | 16.916   | -1.464   | 0.267    | -1.958  | 1.067   | 0.758   | 13.487  | 7.026   | 1.850   |
| 4.000  | 26.544   | -1.106   | 0.026    | -3.190  | -2.098  | -0.135  | 15.716  | 9.988   | 4.225   |
| 4.500  | 27.055   | -0.568   | 0.235    | -3.010  | -2.717  | -0.596  | 15.853  | 10.062  | 4.735   |
| 5.000  | 26.821   | -0.357   | 0.391    | -2.677  | -2.279  | -0.735  | 15.402  | 10.070  | 3.983   |
| 5.500  | 27.288   | -0.464   | 0.607    | -2.940  | -2.774  | -0.131  | 15.862  | 10.686  | 4.485   |
| 6.000  | 28.091   | -0.432   | 0.490    | -2.556  | -2.636  | -0.075  | 14.626  | 9.523   | 4.529   |
| 6.500  | 28.333   | -0.479   | 0.525    | -3.359  | -2.546  | -0.208  | 14.864  | 9.591   | 4.703   |
| 7.000  | 28.577   | -0.366   | 0.591    | -2.336  | -2.129  | -0.185  | 13.974  | 8.830   | 4.372   |
| 7.500  | 29.322   | -0.353   | 0.561    | -2.890  | -2.587  | -0.520  | 15.003  | 9.179   | 4.690   |
| 8.000  | 29.489   | -0.317   | 0.693    | -2.419  | -2.284  | -0.779  | 13.966  | 9.719   | 5.059   |
| 8.500  | 29.947   | -0.188   | 0.562    | -2.782  | -2.215  | -0.071  | 13.713  | 8.566   | 4.448   |
| 9.000  | 30.232   | -0.142   | 0.578    | -1.782  | -2.225  | -0.333  | 12.245  | 8.681   | 4.724   |
| 9.500  | 30.390   | -0.096   | 0.763    | -2.349  | -1.506  | -0.147  | 10.643  | 8.610   | 4.562   |
| 10.000 | 30.405   | -0.050   | 0.558    | -1.351  | -1.757  | -0.458  | 11.400  | 8.408   | 4.640   |
| 10.500 | 30.555   | 0.040    | 0.649    | -1.697  | -1.692  | -0.402  | 10.219  | 7.458   | 4.395   |
| 11.000 | 31.222   | 0.101    | 0.496    | -1.581  | -1.892  | -0.653  | 11.122  | 8.094   | 4.465   |
| 11.500 | 30.979   | 0.012    | 0.611    | -1.490  | -1.939  | -0.207  | 10.144  | 8.590   | 4.496   |
| 12.000 | 31.361   | 0.227    | 0.573    | -1.023  | -2.058  | -0.234  | 10.692  | 7.585   | 4.382   |
| 13.000 | 31.970   | 0.100    | 0.481    | 0.711   | -2.419  | -0.772  | 11.366  | 9.383   | 4.541   |
| 14.000 | 32.471   | 0.259    | 0.396    | -0.677  | -2.215  | -0.227  | 9.575   | 8.037   | 4.825   |
| 15.000 | 33.310   | 0.237    | 0.169    | -0.257  | -2.403  | -0.273  | 10.065  | 7.505   | 4.487   |
| 16.000 | 33.945   | 0.156    | 0.072    | 0.312   | -2.247  | -0.392  | 9.742   | 7.248   | 4.052   |
| 17.000 | 34.799   | 0.145    | -0.189   | -0.299  | -2.378  | -0.178  | 9.180   | 5.773   | 3.698   |
| 18.000 | 35.484   | 0.188    | -0.390   | -0.123  | -2.594  | -0.101  | 8.919   | 5.733   | 3.812   |
| 19.000 | 35.848   | 0.173    | -0.467   | 0.200   | -2.395  | -0.209  | 9.235   | 5.526   | 3.667   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.520  | 24.933   | -0.331   | -0.464   | -2.021  | -1.994  | -0.141  | 16.699  | 8.424   | 2.434   |
| 1.040  | 25.299   | -0.452   | -0.405   | -1.861  | -2.029  | -0.374  | 15.054  | 8.138   | 2.961   |
| 1.550  | 26.513   | -0.253   | -0.239   | -3.208  | -3.075  | -0.059  | 17.714  | 9.216   | 3.817   |
| 1.970  | 26.084   | -0.387   | -0.537   | -2.707  | -3.286  | -0.316  | 19.199  | 9.875   | 3.897   |
| 2.560  | 27.402   | -0.798   | -0.338   | -2.763  | -3.195  | -0.600  | 17.999  | 8.087   | 4.243   |
| 3.040  | 28.903   | -0.945   | -0.229   | -2.873  | -3.531  | -0.475  | 19.149  | 8.457   | 4.304   |
| 3.510  | 29.039   | -1.398   | -0.222   | -2.590  | -2.924  | -0.332  | 16.270  | 8.957   | 4.746   |
| 4.040  | 29.973   | -0.965   | -0.347   | -2.050  | -3.251  | -0.691  | 14.958  | 9.648   | 4.874   |
| 4.520  | 30.776   | -0.698   | -0.413   | -2.741  | -2.794  | -0.687  | 15.171  | 8.753   | 4.737   |
| 5.000  | 31.069   | -0.799   | -0.495   | -2.054  | -3.549  | -0.859  | 16.850  | 8.665   | 5.109   |
| 5.520  | 32.130   | -0.841   | -0.646   | -2.523  | -2.991  | -0.860  | 16.230  | 9.093   | 4.906   |
| 6.020  | 32.457   | -0.742   | -0.493   | -2.582  | -3.341  | -0.586  | 16.187  | 8.742   | 4.868   |
| 6.550  | 32.686   | -0.657   | -0.434   | -3.034  | -2.701  | -0.578  | 14.245  | 8.783   | 4.662   |
| 7.030  | 32.998   | -0.652   | -0.446   | -2.684  | -2.338  | -0.433  | 14.748  | 8.503   | 4.827   |
| 7.530  | 33.656   | -0.543   | -0.459   | -3.209  | -2.870  | -0.169  | 15.617  | 8.490   | 4.354   |
| 8.000  | 33.444   | -0.500   | -0.322   | -3.389  | -2.520  | -0.397  | 15.133  | 8.217   | 4.811   |
| 8.500  | 34.159   | -0.351   | -0.418   | -2.627  | -1.994  | -0.679  | 14.067  | 7.221   | 4.242   |
| 9.050  | 34.180   | -0.322   | -0.489   | -3.485  | -1.341  | -0.504  | 13.730  | 7.560   | 4.411   |
| 9.520  | 34.579   | -0.425   | -0.389   | -3.146  | -1.560  | -0.762  | 12.487  | 7.471   | 4.495   |
| 10.000 | 34.430   | -0.206   | -0.548   | -2.670  | -1.411  | -0.345  | 11.574  | 6.828   | 3.888   |
| 10.500 | 34.598   | -0.140   | -0.461   | -2.842  | -1.045  | -0.403  | 12.062  | 7.261   | 4.292   |
| 11.020 | 34.466   | -0.014   | -0.288   | -2.905  | -1.857  | -0.080  | 13.030  | 6.893   | 4.078   |
| 11.550 | 34.652   | -0.078   | -0.235   | -2.862  | -0.909  | -0.387  | 11.817  | 7.326   | 4.052   |
| 12.030 | 34.960   | 0.028    | -0.400   | -2.761  | -1.291  | -0.348  | 9.917   | 7.013   | 4.064   |
| 13.020 | 34.891   | 0.188    | -0.383   | -2.322  | -0.404  | -0.363  | 9.989   | 6.350   | 3.748   |
| 14.000 | 35.149   | 0.243    | -0.322   | -1.801  | -0.869  | -0.321  | 8.970   | 5.976   | 3.847   |
| 15.050 | 35.484   | 0.365    | -0.442   | -1.366  | -1.008  | -0.275  | 8.606   | 6.058   | 4.017   |
| 16.000 | 35.447   | 0.420    | -0.376   | -1.137  | -0.888  | -0.465  | 7.895   | 5.126   | 3.407   |
| 17.040 | 35.785   | 0.526    | -0.507   | -0.836  | -1.584  | -0.216  | 7.376   | 5.322   | 3.600   |
| 18.030 | 35.749   | 0.522    | -0.754   | -0.936  | -1.481  | -0.254  | 7.199   | 5.274   | 3.632   |
| 19.020 | 36.133   | 0.529    | -0.796   | -0.581  | -1.345  | -0.427  | 7.353   | 4.533   | 3.156   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| 0.560  | 25.516      | -1.032      | -0.491      | -1.551   | -2.180   | -0.151   | 14.932   | 8.868  | 2.505  |
| 1.040  | 25.942      | -0.879      | -0.490      | -1.562   | -2.733   | -0.627   | 17.538   | 9.133  | 3.209  |
| 1.530  | 26.867      | -0.991      | -0.394      | -2.178   | -3.348   | -0.428   | 17.015   | 9.424  | 3.970  |
| 2.020  | 27.160      | -0.928      | -0.432      | -2.372   | -3.321   | -0.222   | 17.448   | 9.937  | 3.968  |
| 2.540  | 28.450      | -1.111      | -0.313      | -2.444   | -4.086   | -0.274   | 19.361   | 8.513  | 4.472  |
| 3.040  | 29.021      | -1.157      | -0.535      | -2.281   | -3.505   | -0.435   | 17.070   | 9.486  | 4.566  |
| 3.540  | 29.873      | -1.050      | -0.457      | -1.424   | -3.231   | -0.521   | 14.844   | 8.784  | 4.693  |
| 4.010  | 30.809      | -1.148      | -0.585      | -1.880   | -3.682   | -0.874   | 18.453   | 9.190  | 5.055  |
| 4.520  | 31.440      | -1.228      | -0.567      | -2.237   | -3.964   | -0.582   | 18.445   | 9.825  | 5.173  |
| 5.000  | 31.639      | -1.178      | -0.465      | -2.211   | -3.571   | -0.582   | 16.928   | 8.920  | 4.959  |
| 5.510  | 31.999      | -0.883      | -0.591      | -2.426   | -3.383   | -0.727   | 18.345   | 9.930  | 4.775  |
| 6.010  | 32.003      | -0.865      | -0.453      | -2.601   | -3.254   | -0.831   | 15.737   | 9.010  | 5.000  |
| 6.550  | 33.556      | -0.936      | -0.597      | -2.602   | -2.677   | -0.935   | 15.597   | 8.873  | 4.678  |
| 7.010  | 33.448      | -0.720      | -0.446      | -2.707   | -2.308   | -0.560   | 13.220   | 9.276  | 4.490  |
| 7.550  | 34.585      | -0.791      | -0.560      | -2.621   | -2.367   | -0.765   | 13.157   | 8.272  | 4.779  |
| 8.020  | 33.999      | -0.656      | -0.433      | -2.852   | -1.996   | -0.582   | 14.456   | 7.967  | 4.687  |
| 8.510  | 34.231      | -0.550      | -0.450      | -3.335   | -1.935   | -0.490   | 14.557   | 8.192  | 4.480  |
| 9.040  | 34.766      | -0.505      | -0.467      | -3.158   | -1.437   | -0.413   | 13.778   | 7.852  | 4.102  |
| 9.510  | 35.166      | -0.319      | -0.508      | -2.758   | -0.854   | -0.397   | 11.588   | 7.311  | 4.108  |
| 10.050 | 35.314      | -0.254      | -0.371      | -3.020   | -1.719   | -0.240   | 13.197   | 7.395  | 4.248  |
| 10.540 | 35.517      | -0.395      | -0.506      | -2.743   | -1.213   | -0.555   | 11.107   | 7.240  | 4.499  |
| 11.000 | 35.917      | -0.256      | -0.555      | -2.465   | -1.064   | -0.318   | 10.213   | 6.448  | 3.818  |
| 11.520 | 35.788      | -0.074      | -0.471      | -2.648   | -0.729   | -0.319   | 10.940   | 6.477  | 3.897  |
| 12.050 | 35.139      | 0.042       | -0.189      | -2.537   | -1.155   | -0.175   | 11.028   | 7.308  | 4.176  |
| 13.040 | 35.327      | -0.011      | -0.351      | -2.233   | -0.936   | -0.076   | 10.672   | 6.699  | 3.806  |
| 14.050 | 35.215      | 0.206       | -0.392      | -1.958   | -1.109   | -0.326   | 9.303  | 6.036  | 3.907  |
| 15.040 | 35.459      | 0.237       | -0.396      | -1.523   | -0.787   | -0.388   | 9.503  | 6.353  | 3.686  |
| 16.030 | 35.653      | 0.455       | -0.521      | -1.146   | -1.176   | -0.391   | 7.107  | 6.012  | 3.970  |
| 17.040 | 36.169      | 0.520       | -0.660      | -1.164   | -0.993   | -0.617   | 7.601  | 5.920  | 3.616  |
| 18.050 | 35.907      | 0.256       | -0.764      | -0.354   | -1.007   | -0.491   | 7.121  | 5.492  | 3.321  |
| 19.020 | 36.304      | 0.495       | -0.537      | -0.845   | -1.311   | -0.303   | 6.767  | 4.788  | 2.916  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.540  | 25.372   | -0.833   | -0.366   | -1.178  | -2.170  | -0.191  | 13.446  | 8.688   | 2.600   |
| 1.040  | 26.465   | -0.896   | -0.483   | -2.374  | -2.181  | -0.439  | 14.650  | 9.373   | 3.216   |
| 1.520  | 27.212   | -0.595   | -0.338   | -1.369  | -3.415  | -0.198  | 17.873  | 9.768   | 3.982   |
| 2.000  | 27.357   | -1.075   | -0.315   | -2.730  | -3.341  | -0.193  | 18.042  | 9.959   | 3.753   |
| 2.540  | 27.007   | -0.915   | -0.201   | -2.643  | -3.256  | -0.345  | 18.224  | 9.770   | 4.454   |
| 3.020  | 27.783   | -1.535   | -0.066   | -3.334  | -3.166  | -0.411  | 18.687  | 9.296   | 4.884   |
| 3.540  | 28.917   | -1.704   | -0.129   | -3.307  | -3.016  | 0.116   | 16.781  | 8.751   | 4.997   |
| 4.050  | 29.851   | -1.309   | -0.273   | -3.445  | -3.860  | -0.445  | 19.314  | 10.046  | 5.011   |
| 4.540  | 30.437   | -1.082   | -0.239   | -2.950  | -3.838  | -0.787  | 18.018  | 10.344  | 5.457   |
| 5.000  | 31.019   | -1.012   | -0.360   | -2.756  | -2.786  | -0.945  | 15.776  | 10.637  | 5.122   |
| 5.500  | 31.862   | -0.959   | -0.429   | -2.698  | -3.410  | -0.709  | 16.480  | 9.175   | 4.819   |
| 6.000  | 32.652   | -0.953   | -0.428   | -2.841  | -3.312  | -0.444  | 16.834  | 8.238   | 4.883   |
| 6.500  | 33.073   | -0.814   | -0.584   | -2.695  | -2.129  | -0.679  | 13.050  | 8.703   | 4.895   |
| 7.000  | 32.734   | -0.675   | -0.360   | -2.919  | -2.482  | -0.860  | 14.662  | 8.510   | 5.008   |
| 7.500  | 32.883   | -0.603   | -0.193   | -2.824  | -1.832  | -0.605  | 14.264  | 8.166   | 4.606   |
| 8.040  | 33.678   | -0.682   | -0.292   | -3.025  | -2.017  | -0.604  | 14.691  | 7.997   | 4.433   |
| 8.540  | 33.357   | -0.544   | -0.167   | -3.097  | -2.207  | -0.417  | 15.332  | 8.354   | 4.518   |
| 9.030  | 33.780   | -0.438   | -0.178   | -3.260  | -1.886  | -0.429  | 14.822  | 7.391   | 4.151   |
| 9.530  | 33.804   | -0.244   | -0.341   | -3.162  | -1.815  | -0.262  | 13.526  | 7.302   | 4.355   |
| 10.050 | 34.168   | -0.405   | -0.202   | -3.162  | -1.145  | -0.625  | 13.619  | 7.476   | 4.184   |
| 10.530 | 34.076   | -0.180   | -0.159   | -2.790  | -1.148  | -0.528  | 11.446  | 7.466   | 4.084   |
| 11.020 | 34.057   | -0.145   | -0.081   | -2.574  | -1.605  | -0.204  | 12.463  | 7.451   | 4.176   |
| 11.500 | 34.127   | -0.100   | -0.066   | -2.122  | -1.405  | -0.789  | 10.969  | 7.240   | 4.756   |
| 12.000 | 34.128   | 0.021    | 0.028    | -2.375  | -1.426  | -0.423  | 11.024  | 7.535   | 4.223   |
| 13.000 | 34.365   | 0.016    | 0.023    | -1.973  | -1.332  | -0.489  | 10.632  | 7.194   | 3.971   |
| 14.000 | 34.745   | 0.219    | -0.100   | -1.733  | -1.327  | -0.119  | 10.030  | 6.185   | 4.289   |
| 15.000 | 34.810   | 0.323    | -0.305   | -1.270  | -1.177  | -0.443  | 8.536   | 6.377   | 3.880   |
| 16.030 | 34.696   | 0.285    | -0.252   | -1.169  | -1.858  | -0.194  | 9.204   | 6.615   | 4.072   |
| 17.050 | 35.329   | 0.362    | -0.329   | -0.943  | -1.430  | -0.194  | 7.251   | 5.770   | 3.990   |
| 18.040 | 35.942   | 0.499    | -0.713   | -0.720  | -1.631  | -0.188  | 7.714   | 5.136   | 3.564   |
| 19.020 | 36.440   | 0.285    | -0.594   | -0.810  | -1.632  | -0.427  | 7.723   | 5.602   | 3.509   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 26.022   | -0.839   | -0.340   | 0.923   | -2.470  | 0.066  | 13.916  | 9.254   | 2.762   |
| 1.030  | 26.769   | -0.921   | -0.385   | 0.844   | -3.267  | -0.116   | 14.894  | 9.000   | 3.224   |
| 1.530  | 28.177   | -0.998   | -0.470   | 0.524   | -3.673  | -0.484   | 16.637  | 9.491   | 4.082   |
| 2.040  | 29.070   | -0.964   | -0.570   | 0.334   | -4.338  | -0.335   | 18.398  | 10.876  | 4.617   |
| 2.560  | 28.680   | -0.889   | -0.302   | 0.512   | -4.201  | -0.470   | 17.358  | 9.587   | 4.707   |
| 3.160  | 30.291   | -1.103   | -0.570   | -0.741  | -4.627  | -0.194   | 18.890  | 8.989   | 5.039   |
| 3.540  | 30.565   | -1.035   | -0.614   | -1.195  | -4.312  | -0.465   | 17.672  | 9.157   | 5.062   |
| 4.060  | 31.341   | -0.820   | -0.598   | -2.198  | -3.835  | -0.379   | 17.757  | 10.633  | 4.827   |
| 4.540  | 32.137   | -0.920   | -0.720   | -1.663  | -3.613  | -0.355   | 16.537  | 9.628   | 5.150   |
| 5.090  | 32.256   | -0.677   | -0.749   | -2.591  | -3.480  | -0.446   | 17.534  | 9.753   | 5.057   |
| 5.540  | 33.159   | -0.931   | -0.778   | -2.880  | -3.146  | -0.378   | 16.555  | 9.338   | 5.016   |
| 6.020  | 33.683   | -0.618   | -0.829   | -2.566  | -2.976  | -0.315   | 16.487  | 8.444   | 4.693   |
| 6.550  | 34.154   | -0.509   | -0.791   | -2.513  | -2.713  | -0.402   | 15.536  | 8.231   | 4.929   |
| 7.000  | 34.871   | -0.697   | -0.812   | -2.905  | -2.382  | -0.186   | 14.973  | 7.947   | 4.576   |
| 7.540  | 34.868   | -0.512   | -0.773   | -2.662  | -1.900  | -0.372   | 13.877  | 7.810   | 4.279   |
| 8.050  | 35.201   | -0.520   | -0.795   | -3.229  | -1.863  | -0.574   | 13.776  | 8.361   | 4.796   |
| 8.560  | 35.931   | -0.464   | -0.831   | -2.957  | -1.489  | -0.397   | 15.804  | 6.892   | 4.218   |
| 9.030  | 35.453   | -0.336   | -0.792   | -2.604  | -2.138  | -0.619   | 13.741  | 7.507   | 4.787   |
| 9.560  | 35.686   | -0.260   | -0.778   | -3.200  | -1.682  | -0.363   | 13.860  | 7.279   | 4.682   |
| 10.050 | 35.862   | -0.292   | -0.751   | -3.520  | -1.571  | -0.351   | 14.823  | 7.050   | 4.074   |
| 10.550 | 36.784   | -0.229   | -0.839   | -2.638  | -0.492  | -0.522   | 13.203  | 6.794   | 4.385   |
| 11.000 | 36.502   | -0.134   | -0.776   | -2.550  | -0.563  | -0.582   | 11.576  | 6.588   | 4.062   |
| 11.560 | 36.112   | 0.105    | -0.891   | -3.034  | -1.030  | -0.348   | 12.829  | 6.804   | 4.290   |
| 12.060 | 36.634   | 0.105    | -0.835   | -1.917  | -0.752  | -0.446   | 9.855   | 6.045   | 3.650   |
| 13.050 | 36.805   | 0.222    | -0.855   | -2.338  | -1.005  | -0.355   | 11.370  | 6.558   | 3.962   |
| 14.030 | 36.358   | 0.401    | -0.872   | -1.553  | -0.963  | -0.509   | 9.224   | 6.375   | 4.044   |
| 15.030 | 36.736   | 0.571    | -0.819   | -2.227  | -1.545  | -0.210   | 11.527  | 6.528   | 4.171   |
| 16.050 | 36.763   | 0.610    | -0.915   | -1.658  | -1.419  | -0.329   | 9.237   | 6.151   | 3.788   |
| 17.030 | 36.928   | 0.794    | -0.927   | -1.057  | -1.404  | -0.099   | 8.715   | 5.491   | 3.473   |
| 18.040 | 37.587   | 0.597    | -1.217   | -0.884  | -1.563  | -0.247   | 7.898   | 5.699   | 3.557   |
| 19.040 | 37.653   | 0.693    | -0.728   | -1.126  | -1.426  | -0.258   | 7.474   | 5.591   | 3.111   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) H

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.520  | 25.747   | -1.026   | -0.349   | 0.407   | -2.555  | -0.017  | 15.442  | 9.196   | 2.527   |
| 1.030  | 27.220   | -0.996   | -0.644   | 0.213   | -3.057  | -0.227  | 16.096  | 8.111   | 3.121   |
| 1.530  | 26.865   | -1.063   | -0.404   | 0.671   | -3.682  | -0.454  | 15.717  | 9.641   | 3.984   |
| 2.020  | 28.118   | -1.030   | -0.507   | -0.833  | -4.165  | -0.266  | 17.816  | 9.504   | 4.324   |
| 2.550  | 28.242   | -0.972   | -0.395   | -0.756  | -4.225  | -0.380  | 17.586  | 9.341   | 4.878   |
| 3.050  | 29.250   | -1.116   | -0.431   | -1.506  | -3.757  | -0.287  | 15.540  | 9.221   | 5.323   |
| 3.590  | 30.202   | -0.936   | -0.524   | -1.010  | -3.693  | -0.452  | 15.882  | 8.480   | 4.686   |
| 4.050  | 31.278   | -1.082   | -0.664   | -1.890  | -4.454  | 0.041   | 19.416  | 8.860   | 4.964   |
| 4.520  | 31.583   | -0.908   | -0.652   | -2.809  | -4.160  | -0.066  | 17.681  | 10.331  | 5.461   |
| 5.020  | 31.547   | -0.833   | -0.444   | -2.355  | -3.896  | -0.297  | 16.678  | 9.584   | 5.443   |
| 5.560  | 32.525   | -0.927   | -0.589   | -3.051  | -2.973  | -0.496  | 16.980  | 9.213   | 4.979   |
| 6.020  | 32.698   | -0.827   | -0.676   | -2.438  | -2.351  | -0.590  | 14.258  | 8.178   | 4.883   |
| 6.540  | 33.446   | -0.904   | -0.546   | -2.493  | -2.457  | -0.415  | 13.721  | 8.148   | 4.765   |
| 7.020  | 33.448   | -0.669   | -0.583   | -3.178  | -2.023  | -0.272  | 15.109  | 8.250   | 4.853   |
| 7.560  | 33.937   | -0.707   | -0.580   | -2.975  | -1.665  | -0.357  | 13.792  | 7.248   | 4.230   |
| 8.040  | 33.768   | -0.532   | -0.654   | -3.940  | -1.870  | -0.520  | 16.479  | 7.895   | 4.546   |
| 8.540  | 33.886   | -0.369   | -0.556   | -2.702  | -1.292  | -0.528  | 13.008  | 7.162   | 4.589   |
| 9.040  | 33.953   | -0.353   | -0.366   | -3.003  | -1.498  | -0.395  | 12.974  | 7.955   | 4.544   |
| 9.520  | 34.591   | -0.221   | -0.589   | -2.398  | -0.916  | -0.504  | 12.148  | 7.308   | 4.519   |
| 10.060 | 34.216   | -0.022   | -0.562   | -3.153  | -1.672  | -0.410  | 13.825  | 7.612   | 4.909   |
| 10.530 | 34.210   | 0.058    | -0.403   | -3.063  | -1.720  | -0.289  | 12.403  | 7.121   | 4.589   |
| 11.040 | 34.510   | -0.019   | -0.465   | -2.887  | -1.710  | -0.144  | 13.617  | 7.358   | 4.951   |
| 11.550 | 34.225   | 0.162    | -0.435   | -2.376  | -1.331  | -0.551  | 12.098  | 7.420   | 4.513   |
| 12.050 | 34.268   | 0.200    | -0.370   | -2.341  | -1.361  | -0.147  | 11.072  | 6.995   | 4.534   |
| 13.030 | 34.264   | 0.344    | -0.323   | -1.665  | -2.055  | -0.495  | 12.121  | 7.792   | 4.837   |
| 14.010 | 34.843   | 0.354    | -0.338   | -1.671  | -2.184  | -0.328  | 11.503  | 7.074   | 4.933   |
| 15.040 | 35.036   | 0.413    | -0.454   | -1.659  | -1.828  | -0.454  | 11.432  | 7.142   | 4.431   |
| 16.020 | 35.710   | 0.493    | -0.587   | -1.252  | -1.852  | -0.398  | 9.635   | 6.125   | 4.377   |
| 17.030 | 36.216   | 0.673    | -0.725   | -1.072  | -2.063  | -0.607  | 9.906   | 6.732   | 4.128   |
| 18.000 | 36.559   | 0.383    | -0.931   | -1.036  | -1.805  | -0.228  | 10.086  | 6.263   | 3.626   |
| 19.030 | 36.586   | 0.425    | -0.755   | -0.910  | -2.184  | -0.264  | 9.806   | 6.457   | 3.568   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.550  | 26.133   | -0.874   | -0.334   | 0.546   | -2.263  | 0.099   | 13.160  | 9.298   | 2.466   |
| 1.010  | 26.908   | -0.957   | -0.276   | 0.964   | -3.249  | -0.328  | 15.490  | 9.301   | 3.256   |
| 1.540  | 28.269   | -1.038   | -0.452   | 1.191   | -3.763  | -0.237  | 17.698  | 9.170   | 4.028   |
| 2.000  | 28.353   | -0.866   | -0.457   | -0.233  | -3.951  | 0.071   | 16.754  | 10.063  | 4.087   |
| 2.550  | 29.782   | -1.172   | -0.526   | -0.606  | -3.786  | -0.242  | 17.282  | 9.507   | 4.476   |
| 3.020  | 30.213   | -1.013   | -0.595   | 0.303   | -4.443  | -0.219  | 16.559  | 9.953   | 4.928   |
| 3.670  | 30.919   | -1.142   | -0.551   | -0.164  | -4.027  | -0.311  | 17.115  | 9.308   | 4.583   |
| 4.050  | 31.511   | -1.049   | -0.589   | -1.562  | -4.194  | -0.210  | 18.318  | 9.634   | 4.984   |
| 4.540  | 31.938   | -0.852   | -0.607   | -1.251  | -3.966  | -0.615  | 17.664  | 9.711   | 5.119   |
| 5.000  | 32.726   | -0.850   | -0.678   | -2.264  | -3.886  | -0.225  | 17.542  | 8.825   | 5.125   |
| 5.560  | 33.621   | -1.020   | -0.637   | -1.866  | -3.293  | -0.250  | 14.669  | 8.634   | 4.720   |
| 6.060  | 34.204   | -0.918   | -0.789   | -2.245  | -3.429  | -0.394  | 15.064  | 9.021   | 5.373   |
| 6.500  | 34.208   | -0.844   | -0.663   | -2.620  | -3.057  | -0.462  | 16.203  | 8.283   | 4.963   |
| 6.990  | 35.019   | -0.832   | -0.757   | -2.663  | -2.179  | -0.283  | 13.974  | 7.845   | 4.467   |
| 7.490  | 35.114   | -0.685   | -0.761   | -3.081  | -1.953  | -0.681  | 13.320  | 8.628   | 4.858   |
| 8.060  | 35.142   | -0.700   | -0.701   | -2.965  | -2.131  | -0.320  | 14.890  | 7.032   | 4.659   |
| 8.520  | 35.771   | -0.528   | -0.710   | -3.109  | -1.411  | -0.427  | 13.038  | 8.162   | 4.046   |
| 9.040  | 35.403   | -0.401   | -0.644   | -3.504  | -1.518  | -0.456  | 15.596  | 7.799   | 4.494   |
| 9.560  | 35.523   | -0.437   | -0.612   | -2.645  | -1.169  | -0.481  | 12.449  | 7.303   | 3.983   |
| 10.070 | 35.484   | -0.372   | -0.642   | -2.977  | -0.937  | -0.384  | 12.713  | 6.952   | 4.200   |
| 10.540 | 36.007   | -0.324   | -0.640   | -2.752  | -0.913  | -0.414  | 11.050  | 7.013   | 4.019   |
| 11.040 | 35.962   | -0.252   | -0.676   | -2.708  | -0.958  | -0.271  | 10.957  | 6.646   | 3.972   |
| 11.540 | 36.151   | -0.186   | -0.652   | -2.957  | -0.412  | -0.345  | 11.496  | 6.527   | 3.621   |
| 12.060 | 36.180   | -0.072   | -0.641   | -2.335  | -0.725  | -0.391  | 9.976   | 6.609   | 4.370   |
| 13.030 | 36.116   | 0.153    | -0.686   | -1.915  | -1.140  | -0.246  | 10.877  | 6.684   | 3.941   |
| 14.000 | 36.306   | 0.203    | -0.773   | -1.338  | -0.914  | -0.590  | 9.639   | 7.119   | 4.237   |
| 15.050 | 36.330   | 0.333    | -0.676   | -1.770  | -0.980  | -0.317  | 9.449   | 6.560   | 4.024   |
| 16.030 | 36.609   | 0.254    | -0.830   | -1.735  | -1.653  | -0.220  | 9.840   | 5.939   | 3.988   |
| 17.060 | 36.657   | 0.535    | -0.860   | -1.369  | -1.651  | -0.165  | 8.783   | 5.889   | 3.576   |
| 18.010 | 37.082   | 0.467    | -1.074   | -1.258  | -1.460  | -0.251  | 9.428   | 5.351   | 3.373   |
| 19.030 | 37.519   | 0.386    | -0.940   | -1.094  | -1.695  | -0.276  | 8.550   | 5.501   | 3.411   |



## ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.540  | 26.314   | -0.961   | -0.407   | 1.411   | -2.612  | -0.165  | 15.632  | 10.383  | 2.627   |
| 1.030  | 26.431   | -0.564   | -0.288   | 0.789   | -3.245  | 0.076   | 16.642  | 10.478  | 3.123   |
| 1.520  | 27.803   | -0.874   | -0.446   | 1.204   | -3.425  | 0.123   | 16.254  | 10.692  | 3.997   |
| 2.050  | 28.655   | -0.880   | -0.355   | 0.864   | -3.647  | -0.305  | 17.282  | 10.947  | 3.964   |
| 2.540  | 29.594   | -0.871   | -0.408   | 0.171   | -4.443  | -0.136  | 16.760  | 10.524  | 4.913   |
| 3.070  | 30.403   | -0.854   | -0.368   | 0.112   | -4.401  | -0.025  | 17.392  | 9.426   | 4.786   |
| 3.520  | 31.334   | -0.886   | -0.497   | -0.479  | -4.716  | 0.018   | 17.528  | 10.094  | 5.368   |
| 4.000  | 31.653   | -0.805   | -0.716   | -1.570  | -4.057  | -0.093  | 17.924  | 10.121  | 4.738   |
| 4.530  | 32.744   | -0.731   | -0.670   | -0.986  | -3.647  | -0.353  | 15.770  | 9.522   | 4.848   |
| 5.060  | 33.465   | -0.756   | -0.805   | -1.342  | -3.967  | 0.010   | 17.008  | 8.878   | 4.977   |
| 5.560  | 34.083   | -0.685   | -0.744   | -1.527  | -3.332  | -0.590  | 15.556  | 9.533   | 4.730   |
| 6.030  | 34.823   | -0.748   | -0.818   | -1.669  | -3.360  | -0.446  | 16.402  | 8.878   | 4.602   |
| 6.520  | 35.481   | -0.646   | -0.944   | -2.337  | -2.506  | -0.329  | 14.107  | 8.642   | 4.452   |
| 7.020  | 36.086   | -0.644   | -0.847   | -1.722  | -2.102  | -0.569  | 12.823  | 8.649   | 3.882   |
| 7.510  | 36.193   | -0.614   | -0.908   | -2.499  | -2.187  | -0.119  | 13.204  | 7.823   | 4.247   |
| 8.040  | 36.291   | -0.495   | -0.897   | -1.806  | -2.177  | -0.471  | 13.074  | 7.667   | 4.251   |
| 8.520  | 37.217   | -0.642   | -0.931   | -1.460  | -1.586  | -0.297  | 11.514  | 6.931   | 3.727   |
| 9.030  | 37.242   | -0.402   | -0.979   | -2.377  | -0.797  | -0.674  | 10.960  | 7.459   | 3.714   |
| 9.540  | 37.288   | -0.385   | -0.965   | -2.133  | -0.981  | -0.342  | 10.876  | 6.631   | 3.724   |
| 10.040 | 37.637   | -0.398   | -0.976   | -2.042  | -0.866  | -0.140  | 10.311  | 6.062   | 3.423   |
| 10.540 | 37.439   | -0.159   | -1.010   | -2.463  | -0.356  | -0.275  | 9.818   | 6.476   | 3.413   |
| 11.060 | 37.231   | -0.081   | -0.873   | -2.263  | -0.749  | -0.295  | 10.255  | 6.872   | 3.539   |
| 11.510 | 37.466   | -0.205   | -0.898   | -1.919  | -0.566  | -0.513  | 9.463   | 6.105   | 3.218   |
| 12.050 | 37.369   | 0.069    | -0.929   | -1.773  | -0.452  | -0.135  | 9.270   | 5.641   | 3.330   |
| 13.010 | 37.611   | -0.010   | -0.926   | -1.219  | -0.396  | -0.412  | 8.434   | 5.840   | 3.385   |
| 14.000 | 37.346   | 0.169    | -0.776   | -1.428  | -0.441  | -0.272  | 9.070   | 6.467   | 3.429   |
| 15.040 | 37.018   | 0.362    | -0.848   | -1.232  | -0.558  | -0.151  | 7.674   | 5.696   | 3.192   |
| 16.000 | 37.196   | 0.358    | -0.921   | -1.287  | -0.657  | 0.000   | 7.870   | 5.397   | 3.219   |
| 17.050 | 37.014   | 0.684    | -0.922   | -0.791  | -0.776  | 0.035   | 6.866   | 4.893   | 2.903   |
| 18.010 | 37.513   | 0.679    | -1.178   | -0.873  | -1.055  | -0.234  | 6.832   | 4.969   | 2.871   |
| 19.040 | 37.538   | 0.610    | -0.662   | -0.846  | -0.945  | -0.238  | 6.767   | 5.313   | 2.580   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 23.583   | -1.206   | -0.324   | -1.926  | -1.875  | -0.251   | 13.524  | 9.707   | 2.542   |
| 1.040  | 24.286   | -1.164   | -0.267   | -2.519  | -1.607  | -0.475   | 13.773  | 10.899  | 2.881   |
| 1.510  | 24.826   | -1.033   | -0.337   | -2.568  | -2.029  | -0.526   | 14.737  | 9.970   | 3.505   |
| 2.020  | 25.076   | -0.968   | -0.410   | -2.839  | -2.242  | -0.444   | 17.513  | 9.748   | 3.612   |
| 2.540  | 25.644   | -0.928   | -0.488   | -2.875  | -2.604  | -0.763   | 16.819  | 9.417   | 4.038   |
| 3.050  | 26.191   | -0.861   | -0.510   | -2.435  | -2.893  | -0.651   | 15.320  | 8.595   | 4.349   |
| 4.040  | 26.972   | -0.791   | -0.354   | -2.638  | -2.956  | -0.409   | 16.497  | 9.687   | 4.354   |
| 5.040  | 27.677   | -0.530   | -0.455   | -3.239  | -3.949  | 0.173  | 16.660  | 9.351   | 5.093   |
| 6.040  | 28.150   | -0.515   | -0.185   | -2.490  | -3.766  | -0.064   | 16.312  | 9.010   | 4.765   |
| 7.020  | 28.280   | -0.403   | -0.289   | -2.388  | -3.761  | -0.251   | 17.408  | 9.375   | 4.941   |
| 8.020  | 29.301   | -0.316   | -0.193   | -1.561  | -2.790  | -0.256   | 14.619  | 8.541   | 4.235   |
| 9.010  | 30.142   | -0.220   | -0.273   | -2.474  | -2.996  | -0.154   | 13.720  | 8.105   | 4.621   |
| 10.030 | 30.293   | -0.057   | -0.155   | -1.487  | -2.938  | -0.243   | 14.862  | 8.295   | 4.274   |
| 11.020 | 31.256   | -0.019   | -0.361   | -1.603  | -2.436  | -0.525   | 12.446  | 7.791   | 4.079   |
| 12.040 | 31.169   | -0.061   | -0.284   | -1.483  | -2.026  | -0.525   | 12.002  | 7.174   | 4.352   |
| 13.010 | 31.205   | 0.295    | -0.268   | -1.628  | -2.062  | 0.070  | 11.110  | 7.726   | 4.061   |
| 14.010 | 31.967   | 0.200    | -0.378   | -1.469  | -1.993  | -0.544   | 9.992   | 6.959   | 4.268   |
| 15.040 | 32.581   | 0.265    | -0.545   | -0.806  | -1.729  | -0.480   | 9.830   | 7.480   | 4.024   |
| 16.010 | 33.050   | 0.138    | -0.542   | -0.628  | -1.626  | -0.341   | 8.309   | 6.287   | 3.555   |
| 17.060 | 33.595   | 0.106    | -0.741   | -0.631  | -2.277  | -0.254   | 10.272  | 6.040   | 3.470   |
| 18.050 | 33.837   | 0.296    | -0.813   | -0.474  | -1.403  | -0.361   | 7.929   | 5.590   | 3.054   |
| 19.000 | 34.520   | 0.171    | -1.032   | -0.513  | -1.623  | -0.229   | 7.781   | 5.094   | 3.094   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.550  | 22.621   | -0.949   | -0.233   | -1.502  | -1.270  | -0.131   | 10.839  | 7.371   | 1.800   |
| 1.040  | 24.622   | -1.144   | -0.362   | -2.186  | -1.594  | -0.236   | 13.007  | 7.652   | 2.112   |
| 1.550  | 24.973   | -0.987   | -0.279   | -1.891  | -1.765  | -0.181   | 12.542  | 7.490   | 2.544   |
| 2.040  | 25.953   | -1.075   | -0.325   | -2.323  | -2.311  | -0.448   | 13.939  | 8.886   | 3.036   |
| 2.540  | 25.681   | -1.019   | -0.328   | -2.204  | -2.459  | -0.008   | 13.529  | 7.158   | 3.245   |
| 3.030  | 26.604   | -0.965   | -0.554   | -2.420  | -1.772  | -0.539   | 13.330  | 7.740   | 3.504   |
| 4.020  | 26.765   | -0.702   | -0.258   | -2.081  | -2.293  | -0.128   | 13.762  | 7.754   | 3.755   |
| 5.080  | 27.776   | -0.782   | -0.354   | -2.358  | -2.257  | -0.082   | 12.447  | 7.923   | 3.748   |
| 6.020  | 27.623   | -0.145   | -0.293   | -1.921  | -2.498  | -0.253   | 12.930  | 8.318   | 4.216   |
| 7.030  | 27.844   | -0.229   | -0.155   | -1.957  | -2.263  | -0.312   | 11.831  | 8.224   | 4.440   |
| 8.010  | 27.912   | -0.142   | -0.043   | -2.051  | -2.577  | -0.085   | 12.215  | 8.106   | 4.277   |
| 9.040  | 29.224   | -0.080   | -0.208   | -2.647  | -2.508  | -0.117   | 12.017  | 7.857   | 4.739   |
| 10.020 | 29.275   | 0.080    | -0.266   | -1.601  | -2.355  | -0.082   | 11.736  | 7.484   | 4.321   |
| 11.020 | 29.940   | 0.034    | -0.251   | -1.238  | -2.356  | 0.089  | 11.725  | 7.329   | 4.224   |
| 12.010 | 30.148   | 0.064    | -0.315   | -1.500  | -2.726  | -0.081   | 12.243  | 7.381   | 4.094   |
| 13.020 | 30.498   | 0.089    | -0.269   | -0.691  | -1.934  | -0.262   | 11.750  | 7.557   | 3.990   |
| 14.030 | 31.256   | 0.157    | -0.449   | -0.890  | -2.043  | -0.200   | 9.978   | 6.698   | 3.869   |
| 15.050 | 31.663   | 0.014    | -0.429   | -0.964  | -2.003  | -0.272   | 9.664   | 6.819   | 3.680   |
| 16.030 | 32.539   | 0.207    | -0.701   | -0.796  | -1.832  | -0.209   | 9.003   | 6.511   | 3.597   |
| 17.030 | 32.947   | 0.073    | -0.732   | -0.591  | -1.800  | -0.104   | 8.381   | 5.695   | 3.337   |
| 18.020 | 33.310   | 0.227    | -0.993   | -0.904  | -1.772  | -0.099   | 8.046   | 6.025   | 3.052   |
| 19.020 | 33.505   | 0.246    | -1.158   | -0.447  | -1.465  | -0.359   | 7.781   | 5.137   | 2.747   |

## Πείραμα (Experiment) 2

### ΘΕΣΗ (POSITION) A

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.510  | 8.186    | -0.565   | 0.369    | 0.763   | 5.449   | 0.068   | 52.699  | 4.891   | 1.535   |
| 1.030  | 4.448    | 1.093    | 0.112    | 0.526   | 2.550   | -0.729  | 25.966  | 2.652   | 0.822   |
| 1.550  | 8.077    | 0.534    | 0.779    | -0.712  | 6.979   | 1.005   | 55.346  | 4.419   | 1.493   |
| 2.020  | 17.356   | 0.144    | 1.822    | 0.412   | 6.881   | 0.240   | 46.854  | 4.537   | 1.890   |
| 2.510  | 9.918    | 0.014    | 1.198    | 0.101   | 3.466   | -0.088  | 26.749  | 0.777   | 0.693   |
| 3.040  | 3.209    | -1.223   | -0.070   | 2.129   | 1.369   | -0.675  | 19.491  | 4.479   | 0.696   |
| 3.500  | 11.538   | -0.304   | 0.011    | -2.249  | -3.675  | 0.256   | 21.576  | 8.744   | 2.584   |
| 4.000  | 23.807   | -0.606   | 0.994    | -0.289  | -5.496  | -0.695  | 31.459  | 24.956  | 5.853   |
| 4.500  | 24.445   | -0.717   | 1.109    | -3.800  | -4.983  | -0.216  | 33.991  | 23.576  | 6.626   |
| 5.000  | 26.215   | -0.472   | 0.594    | -2.285  | -5.038  | 0.135   | 26.454  | 16.468  | 6.512   |
| 5.500  | 26.260   | -0.425   | 1.032    | -3.963  | -4.795  | 0.475   | 34.806  | 17.372  | 7.437   |
| 6.000  | 26.662   | -0.110   | 1.040    | -2.692  | -5.297  | 0.311   | 25.334  | 17.096  | 7.135   |
| 6.500  | 26.814   | -0.176   | 1.039    | -0.696  | -5.472  | -0.812  | 30.543  | 25.303  | 7.566   |
| 7.000  | 28.018   | -0.406   | 0.998    | -1.619  | -4.929  | -0.238  | 23.528  | 17.766  | 7.315   |
| 7.500  | 28.384   | -0.374   | 1.019    | -2.002  | -4.620  | -0.212  | 30.774  | 28.324  | 7.084   |
| 8.000  | 28.280   | -0.041   | 1.013    | -3.178  | -4.365  | -0.158  | 33.250  | 24.880  | 7.431   |
| 8.500  | 28.418   | -0.025   | 1.188    | -1.752  | -5.031  | -0.051  | 29.497  | 26.043  | 7.821   |
| 9.000  | 29.555   | -0.018   | 0.859    | -2.741  | -4.433  | 0.287   | 31.158  | 25.232  | 6.959   |
| 9.500  | 30.019   | -0.237   | 0.902    | -1.606  | -4.066  | -0.449  | 30.333  | 26.944  | 6.785   |
| 10.000 | 30.620   | 0.066    | 0.953    | -5.428  | -4.077  | 0.877   | 32.053  | 33.427  | 6.852   |
| 10.500 | 30.423   | -0.066   | 0.916    | -1.606  | -4.212  | -0.453  | 25.024  | 21.705  | 7.561   |
| 11.000 | 30.778   | 0.176    | 0.778    | -0.966  | -3.274  | -1.125  | 24.988  | 20.099  | 7.596   |
| 11.500 | 31.399   | 0.079    | 0.888    | -0.853  | -3.399  | -0.815  | 25.101  | 23.011  | 6.914   |
| 12.000 | 32.063   | 0.102    | 0.677    | -0.687  | -2.869  | -0.443  | 26.439  | 23.082  | 6.493   |
| 13.000 | 32.387   | 0.250    | 0.674    | 0.135   | -3.265  | -0.920  | 25.236  | 21.393  | 6.760   |
| 14.000 | 32.378   | 0.141    | 0.631    | -1.349  | -2.171  | -0.192  | 39.473  | 27.221  | 7.243   |
| 15.000 | 33.197   | 0.173    | 0.349    | 0.606   | -2.781  | -0.973  | 24.500  | 23.950  | 6.099   |
| 16.000 | 33.566   | 0.498    | 0.161    | 0.905   | -1.693  | 0.013   | 34.887  | 30.431  | 6.114   |
| 17.000 | 34.067   | 0.535    | -0.017   | 5.273   | -3.410  | -2.361  | 35.653  | 49.189  | 6.257   |
| 18.000 | 34.500   | -0.415   | 0.075    | 1.203   | -3.291  | -0.975  | 51.997  | 47.155  | 6.317   |
| 18.500 | 34.483   | 0.379    | 0.382    | 0.134   | -2.371  | -0.528  | 20.548  | 21.727  | 4.971   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) B

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|---|--|--|--|
| 0.540  | 11.782      | 1.163       | 0.667       | -1.567   | 0.219  | 0.425   | 8.449  | 7.694  | 1.451  |
| 1.000  | 16.555      | -0.478      | 0.295       | -0.826   | -1.828   | 0.045   | 25.300   | 24.921   | 5.237  |
| 1.500  | 16.874      | -0.351      | 0.205       | -2.225   | -4.409   | 0.257   | 53.611   | 73.030   | 6.749  |
| 2.040  | 18.368      | -0.350      | -0.126      | 0.599  | -3.497   | -0.202  | 24.885   | 19.532   | 6.202  |
| 2.520  | 19.866      | -0.292      | -0.354      | -0.925   | -4.933   | 0.578   | 29.090   | 18.615   | 6.729  |
| 3.030  | 20.417      | -0.617      | 0.024       | 3.048  | -6.042   | -1.011  | 39.006   | 28.780   | 6.604  |
| 3.470  | 23.159      | -0.675      | 0.126       | -3.307   | -6.407   | 0.338   | 35.707   | 24.979   | 6.446  |
| 4.040  | 23.761      | -0.885      | 0.399       | 2.736  | -5.839   | -1.417  | 39.941   | 32.533   | 6.702  |
| 4.510  | 24.357      | -0.884      | 0.707       | -1.820   | 0.639  | -0.699  | 81.850   | 31.907   | 7.617  |
| 5.020  | 25.054      | -0.632      | 0.761       | -2.063   | -5.556   | -0.098  | 32.016   | 21.882   | 6.604  |
| 5.530  | 25.840      | -0.497      | 0.902       | -1.299   | -5.187   | -0.653  | 26.394   | 18.786   | 7.359  |
| 6.000  | 26.826      | -0.533      | 0.871       | -2.138   | -4.698   | 0.185   | 27.139   | 18.737   | 6.733  |
| 6.500  | 27.747      | -0.572      | 0.774       | -2.942   | -4.770   | -0.494  | 24.195   | 18.950   | 6.980  |
| 7.020  | 27.938      | -0.280      | 0.866       | -3.459   | -4.796   | 0.606   | 24.672   | 16.852   | 7.152  |
| 7.540  | 28.605      | -0.293      | 0.909       | -2.407   | -4.777   | 0.242   | 31.794   | 27.178   | 7.317  |
| 8.020  | 29.193      | -0.202      | 0.686       | -1.288   | -4.736   | -0.294  | 24.319   | 17.680   | 6.470  |
| 8.530  | 29.564      | -0.430      | 0.949       | -1.845   | -4.142   | 0.171   | 26.140   | 17.443   | 7.223  |
| 9.060  | 29.296      | -0.276      | 0.925       | -3.029   | -3.728   | -0.347  | 36.348   | 32.174   | 7.996  |
| 9.500  | 29.978      | -0.060      | 0.965       | -2.549   | -2.956   | -0.380  | 35.499   | 28.839   | 7.382  |
| 10.000 | 30.068      | -0.570      | 0.911       | -1.203   | -4.589   | -0.912  | 32.492   | 29.876   | 7.321  |
| 10.500 | 30.746      | 0.100       | 0.751       | -1.293   | -3.261   | -0.689  | 28.855   | 28.854   | 7.311  |
| 11.000 | 31.085      | 0.082       | 0.862       | -0.452   | -3.321   | -1.144  | 24.523   | 22.648   | 7.149  |
| 11.500 | 31.373      | 0.024       | 0.815       | -0.262   | -3.206   | -0.815  | 22.112   | 22.956   | 6.952  |
| 11.950 | 31.772      | -0.282      | 0.855       | 0.618  | -3.131   | -1.138  | 22.883   | 20.531   | 6.523  |
| 12.980 | 32.452      | 0.177       | 0.640       | -0.312   | -2.129   | -0.242  | 30.260   | 19.377   | 6.419  |
| 13.950 | 31.893      | 0.191       | 0.517       | 1.884  | 5.351  | -0.478  | 82.611   | 26.203   | 7.859  |
| 14.960 | 33.413      | 0.352       | 0.313       | 0.411  | -2.215   | -1.122  | 27.089   | 25.558   | 6.816  |
| 15.920 | 33.484      | 0.456       | 0.348       | 1.956  | -2.394   | -1.490  | 36.414   | 31.309   | 6.383  |
| 16.930 | 34.216      | 0.740       | -0.153      | 7.137  | -4.899   | -2.322  | 38.317   | 49.445   | 6.207  |
| 17.900 | 34.502      | 0.985       | -0.310      | 2.240  | -3.859   | 0.148   | 62.028   | 73.063   | 6.763  |
| 18.430 | 34.435      | 0.434       | 0.462       | -5.247   | -3.003   | 1.078   | 20.017   | 25.106   | 5.012  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) C

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|---|--|--|--|
| 0.510  | 0.136       | 0.317       | -0.014      | -9.113   | -3.400   | 2.677   | 11.910   | 18.139   | 1.046  |
| 1.020  | 0.985       | -0.143      | -0.090      | -6.202   | -2.780   | 2.106   | 11.424   | 16.049   | 1.117  |
| 1.510  | 0.219       | 0.856       | -0.009      | -11.254  | -4.329   | 3.786   | 19.311   | 25.971   | 1.897  |
| 2.010  | 0.205       | -0.665      | 0.065       | -9.381   | -4.427   | 3.462   | 20.841   | 24.888   | 2.075  |
| 2.510  | 2.956       | -1.014      | -0.703      | -16.478  | -13.544  | 5.641   | 50.994   | 101.987  | 4.722  |
| 3.030  | 3.428       | 0.039       | 0.358       | 1.310  | -0.612   | -0.311  | 5.882  | 6.452  | 0.348  |
| 3.490  | 12.804      | 0.831       | 0.668       | -1.039   | 1.850  | -0.380  | 22.119   | 4.607  | 1.336  |
| 4.000  | 24.861      | -0.747      | 0.329       | -3.977   | -6.643   | 0.711   | 36.451   | 31.752   | 6.360  |
| 4.500  | 24.651      | -0.889      | 0.838       | -4.203   | -4.565   | 1.446   | 25.213   | 17.999   | 5.981  |
| 5.000  | 26.348      | -0.342      | 0.613       | 0.950  | -5.873   | -1.103  | 34.361   | 34.124   | 6.782  |
| 5.500  | 26.158      | -0.812      | 0.858       | -3.151   | -5.719   | -0.396  | 29.721   | 18.923   | 6.481  |
| 6.000  | 27.498      | -0.442      | 0.973       | -1.922   | -4.971   | 0.158   | 26.646   | 20.224   | 6.681  |
| 6.500  | 26.777      | -0.483      | 1.064       | -4.073   | -4.229   | 0.407   | 26.359   | 17.550   | 6.646  |
| 7.000  | 28.054      | -0.736      | 0.997       | -1.905   | -4.392   | -0.050  | 25.122   | 17.908   | 7.164  |
| 7.500  | 28.312      | -0.283      | 1.090       | -0.225   | -5.133   | -1.262  | 35.134   | 31.796   | 7.967  |
| 8.000  | 28.865      | -0.518      | 0.983       | -2.399   | -4.852   | -0.510  | 34.493   | 30.214   | 7.339  |
| 8.500  | 28.854      | -0.255      | 1.033       | -2.355   | -4.426   | 0.127   | 30.628   | 24.777   | 7.013  |
| 9.000  | 29.339      | -0.101      | 1.011       | -0.796   | -4.736   | -0.581  | 24.461   | 20.568   | 7.416  |
| 9.500  | 29.584      | -0.348      | 1.162       | 0.729  | -4.328   | -0.804  | 24.944   | 25.152   | 7.358  |
| 10.000 | 30.260      | -0.143      | 0.990       | -4.036   | -4.645   | 0.766   | 27.506   | 28.247   | 7.410  |
| 10.500 | 30.747      | -0.019      | 1.069       | -2.774   | -3.409   | -0.566  | 24.917   | 21.756   | 6.785  |
| 11.000 | 30.535      | 0.063       | 1.099       | -1.410   | -3.978   | -0.886  | 25.997   | 24.593   | 6.944  |
| 11.500 | 30.784      | -0.203      | 1.111       | 0.166  | -3.921   | -1.010  | 28.204   | 31.111   | 7.074  |
| 12.000 | 31.373      | 0.265       | 0.894       | -0.420   | -3.482   | -0.394  | 23.158   | 21.948   | 7.781  |
| 13.000 | 32.371      | 0.132       | 0.748       | -1.441   | -3.124   | -0.477  | 23.133   | 18.938   | 6.610  |
| 14.000 | 32.305      | 0.053       | 0.696       | 1.898  | -2.832   | -1.034  | 36.788   | 25.992   | 7.163  |
| 15.000 | 33.144      | 0.211       | 0.440       | 0.445  | -2.721   | -0.883  | 27.306   | 20.308   | 6.904  |
| 16.000 | 33.224      | 0.255       | 0.324       | 1.644  | -2.536   | -1.198  | 31.325   | 30.428   | 6.680  |
| 17.000 | 34.135      | 0.329       | -0.029      | 6.948  | -4.414   | -2.887  | 40.199   | 55.308   | 7.109  |
| 18.000 | 34.382      | 0.775       | -0.166      | 4.181  | -1.090   | -1.615  | 57.619   | 50.822   | 6.459  |
| 18.500 | 34.630      | 0.338       | 0.462       | -1.014   | -2.267   | -0.284  | 18.989   | 18.709   | 5.119  |

ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|---|--|--|--|
| 0.530  | 19.920      | -1.075      | -0.229      | 4.256  | -2.697   | -1.884  | 29.924   | 33.110   | 3.610  |
| 1.030  | 21.404      | -0.945      | -0.261      | 0.064  | -3.032   | -0.940  | 27.630   | 21.295   | 4.373  |
| 1.550  | 21.398      | -0.511      | -0.051      | -0.177   | -3.514   | -0.772  | 22.762   | 14.111   | 4.671  |
| 2.010  | 21.219      | -0.424      | 0.205       | 14.648   | -5.511   | -5.049  | 43.081   | 50.209   | 5.939  |
| 2.540  | 16.084      | -0.516      | -0.221      | -1.627   | -5.487   | -0.211  | 36.343   | 13.037   | 4.677  |
| 2.990  | 20.824      | -2.759      | 0.443       | -4.984   | -4.547   | 4.082   | 40.165   | 27.758   | 5.752  |
| 3.520  | 24.204      | -2.545      | 0.704       | -6.755   | -3.612   | 3.289   | 34.698   | 24.505   | 6.419  |
| 4.050  | 26.326      | -0.687      | 0.252       | -6.034   | -6.209   | 0.337   | 48.395   | 36.327   | 7.984  |
| 4.500  | 26.789      | -0.619      | 0.270       | -4.297   | -5.069   | -0.193  | 43.835   | 28.285   | 8.012  |
| 5.050  | 27.490      | -0.784      | 0.105       | -2.265   | -5.016   | -0.494  | 45.811   | 26.983   | 7.192  |
| 5.530  | 27.523      | -0.566      | 0.362       | -4.316   | -6.921   | -0.628  | 43.043   | 35.925   | 7.627  |
| 6.000  | 28.525      | -0.495      | 0.183       | -4.076   | -4.922   | -0.355  | 28.678   | 20.836   | 7.365  |
| 6.500  | 28.768      | -0.406      | 0.559       | -2.928   | -5.362   | -0.363  | 39.359   | 27.377   | 7.552  |
| 7.000  | 28.956      | -0.572      | 0.510       | -1.113   | -5.452   | -0.982  | 36.477   | 30.443   | 7.780  |
| 7.500  | 29.335      | -0.494      | 0.575       | -4.821   | -3.931   | -0.134  | 39.713   | 35.422   | 7.765  |
| 8.000  | 30.356      | -0.208      | 0.431       | -3.143   | -3.653   | -0.716  | 45.492   | 32.320   | 7.143  |
| 8.440  | 30.104      | -0.107      | 0.416       | 1.710  | 7.554  | -2.121  | 134.227  | 40.443   | 9.732  |
| 8.970  | 30.824      | -0.060      | 0.530       | 3.919  | 5.459  | -1.363  | 124.489  | 39.949   | 9.113  |
| 9.500  | 31.414      | -0.137      | 0.584       | -5.271   | -3.438   | 1.237   | 43.633   | 27.208   | 7.686  |
| 10.000 | 30.406      | 0.094       | 0.574       | -5.453   | -3.403   | 1.182   | 39.069   | 16.517   | 6.981  |
| 10.430 | 31.522      | -0.110      | 0.409       | -3.452   | -3.120   | -0.259  | 25.845   | 22.543   | 7.077  |
| 11.000 | 32.005      | -0.094      | 0.641       | -3.795   | -2.926   | -0.829  | 32.096   | 28.243   | 7.040  |
| 11.500 | 32.178      | -0.062      | 0.450       | -1.772   | -3.709   | -0.392  | 33.420   | 27.886   | 7.380  |
| 11.880 | 32.497      | -0.096      | 0.402       | -2.694   | -3.119   | -0.653  | 27.435   | 24.073   | 6.764  |
| 13.000 | 33.384      | 0.135       | 0.190       | -0.787   | -1.516   | -1.095  | 29.435   | 20.461   | 6.695  |
| 13.860 | 32.553      | 0.221       | 0.216       | -0.711   | 9.574  | -0.772  | 124.668  | 33.526   | 8.468  |
| 14.930 | 33.780      | 0.515       | 0.125       | 11.350   | -3.846   | -3.823  | 43.238   | 49.642   | 7.630  |
| 16.000 | 33.761      | 0.248       | 0.094       | -1.445   | -1.701   | -0.280  | 34.876   | 29.059   | 6.769  |
| 16.870 | 34.395      | 0.731       | -0.254      | 2.616  | -3.033   | -0.348  | 49.472   | 51.412   | 7.020  |
| 18.000 | 34.148      | -0.198      | -0.501      | -14.262  | -6.970   | 1.319   | 69.971   | 124.816  | 7.175  |
| 18.360 | 34.718      | 0.661       | 0.247       | -0.650   | -2.153   | -0.567  | 24.953   | 23.340   | 5.127  |

ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| 0.470  | 20.404      | -0.923      | -0.169      | -8.014   | -0.020   | 2.000  | 93.763   | 71.732   | 5.828  |
| 1.000  | 21.477      | -1.114      | -0.152      | -1.321   | -3.027   | 0.230  | 30.317   | 23.536   | 4.765  |
| 1.500  | 20.348      | -2.439      | 0.132       | -3.702   | -2.751   | 2.045  | 28.626   | 19.878   | 4.667  |
| 2.080  | 22.302      | -1.856      | 0.161       | -3.789   | -3.225   | 1.347  | 28.806   | 19.853   | 5.765  |
| 2.570  | 14.999      | -2.702      | -0.307      | -3.796   | -6.504   | 1.812  | 44.893   | 18.671   | 4.636  |
| 3.040  | 20.856      | 0.336       | 0.256       | 7.312  | -4.572   | -4.544   | 40.504   | 33.728   | 6.081  |
| 3.500  | 23.598      | 0.596       | 0.727       | 6.499  | -2.810   | -4.817   | 40.718   | 31.806   | 6.009  |
| 4.000  | 25.946      | -0.899      | 0.419       | -2.624   | -7.274   | -0.182   | 44.636   | 32.306   | 8.452  |
| 4.500  | 26.626      | -1.007      | 0.258       | -2.381   | -6.055   | -0.294   | 40.054   | 25.223   | 7.988  |
| 5.000  | 27.355      | -0.927      | 0.408       | -5.267   | -6.267   | 0.325  | 40.612   | 26.912   | 7.484  |
| 5.500  | 27.934      | -0.790      | 0.302       | -4.037   | -5.272   | -0.303   | 34.094   | 18.600   | 6.985  |
| 6.000  | 28.669      | -0.383      | 0.221       | -3.438   | -5.241   | -0.289   | 29.084   | 18.925   | 6.933  |
| 6.500  | 29.117      | -0.536      | 0.567       | -3.957   | -4.303   | 0.189  | 40.298   | 22.160   | 7.932  |
| 7.000  | 29.679      | -0.617      | 0.274       | -3.253   | -4.638   | -0.203   | 30.283   | 18.493   | 7.334  |
| 7.500  | 29.423      | -0.735      | 0.474       | -1.586   | -5.083   | -0.917   | 47.400   | 36.135   | 8.042  |
| 8.000  | 30.558      | -0.329      | 0.377       | -4.269   | -4.076   | -0.274   | 26.283   | 17.981   | 6.430  |
| 8.500  | 30.614      | -0.256      | 0.536       | 0.727  | -4.060   | -1.644   | 28.966   | 27.090   | 7.379  |
| 9.000  | 30.793      | -0.075      | 0.512       | -0.140   | -5.608   | -0.867   | 30.618   | 34.776   | 7.648  |
| 9.490  | 31.622      | -0.331      | 0.342       | -6.119   | -4.089   | 0.647  | 30.251   | 25.022   | 7.456  |
| 10.000 | 31.069      | 0.445       | 0.697       | -4.663   | -3.865   | 0.075  | 28.530   | 21.666   | 7.265  |
| 10.500 | 31.962      | -0.178      | 0.415       | -2.986   | -2.756   | -0.137   | 23.790   | 16.059   | 6.661  |
| 11.000 | 32.431      | -0.239      | 0.535       | -2.922   | -3.126   | -0.184   | 29.826   | 26.082   | 7.294  |
| 11.480 | 32.815      | 0.031       | 0.486       | -2.468   | -3.461   | -0.548   | 26.271   | 25.580   | 6.836  |
| 11.970 | 32.626      | 0.264       | 0.385       | -2.611   | -2.701   | -0.066   | 24.886   | 21.880   | 6.494  |
| 13.000 | 33.515      | 0.138       | 0.445       | -2.553   | -2.597   | -0.241   | 28.292   | 21.403   | 7.019  |
| 13.920 | 34.834      | 0.126       | 0.012       | 3.904  | 1.513  | 0.069  | 430.976  | 38.977   | 13.094   |
| 14.930 | 33.824      | 0.508       | 0.016       | -0.640   | 0.552  | -0.091   | 50.886   | 34.187   | 6.513  |
| 15.890 | 34.664      | 0.334       | 0.133       | -0.412   | -1.188   | -0.767   | 35.727   | 34.792   | 6.272  |
| 16.850 | 34.700      | 0.644       | -0.295      | -1.937   | -1.961   | -0.265   | 49.861   | 46.092   | 6.693  |
| 17.840 | 35.296      | 0.095       | -0.483      | 36.667   | -8.452   | -10.804  | 105.182  | 164.786  | 8.973  |
| 18.360 | 35.433      | 0.808       | 0.175       | 50.366   | -10.460  | -14.244  | 49.387   | 107.680  | 7.127  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.530  | 19.420   | -1.282   | 0.108    | -0.776  | -1.215  | 0.432   | 17.393  | 12.598  | 2.431   |
| 1.010  | 20.794   | -0.924   | -0.065   | -2.356  | -2.735  | 0.502   | 31.098  | 24.543  | 4.241   |
| 1.510  | 21.003   | -0.530   | 0.255    | -3.542  | -4.030  | 0.470   | 29.966  | 25.014  | 4.647   |
| 2.050  | 20.343   | -1.348   | 0.233    | -0.812  | -4.123  | -0.270  | 29.775  | 16.035  | 5.109   |
| 2.490  | 22.949   | -1.059   | 0.479    | -1.729  | -5.359  | -0.005  | 27.162  | 15.372  | 5.689   |
| 2.990  | 23.161   | -2.024   | 0.423    | -9.523  | -0.814  | 6.759   | 41.894  | 34.667  | 5.534   |
| 3.500  | 23.301   | -2.512   | 0.741    | -9.157  | -2.363  | 5.298   | 37.734  | 27.727  | 5.973   |
| 3.980  | 25.298   | -0.678   | 0.481    | -4.309  | -6.003  | 0.299   | 40.541  | 25.865  | 7.520   |
| 4.500  | 26.088   | -0.863   | 0.522    | -8.069  | -5.525  | 1.458   | 43.385  | 35.572  | 7.877   |
| 5.040  | 26.917   | -0.855   | 0.541    | -2.992  | -5.217  | -0.054  | 34.674  | 24.809  | 6.795   |
| 5.500  | 26.748   | -0.713   | 0.773    | -4.164  | -5.700  | -0.246  | 30.998  | 19.454  | 7.000   |
| 6.020  | 27.823   | -0.571   | 0.600    | -1.612  | -4.399  | -0.577  | 28.221  | 19.112  | 6.759   |
| 6.500  | 28.251   | -0.511   | 0.725    | -4.169  | -5.011  | -0.113  | 27.358  | 18.341  | 7.197   |
| 7.000  | 28.883   | -0.391   | 0.908    | -6.111  | -5.016  | 0.460   | 28.566  | 20.772  | 7.254   |
| 7.500  | 28.589   | -0.225   | 0.746    | -3.937  | -4.492  | 0.513   | 49.604  | 33.917  | 7.987   |
| 7.960  | 29.644   | -0.278   | 0.772    | -2.254  | -4.189  | -0.482  | 40.223  | 30.149  | 7.722   |
| 8.500  | 30.113   | -0.373   | 0.635    | 0.804   | -4.838  | -1.398  | 35.200  | 33.874  | 7.588   |
| 9.000  | 30.199   | -0.179   | 0.877    | -1.957  | -4.863  | -0.640  | 36.041  | 34.123  | 7.547   |
| 9.500  | 31.143   | -0.276   | 0.836    | -4.245  | -3.654  | -0.416  | 30.576  | 28.463  | 7.505   |
| 10.000 | 30.930   | -0.376   | 0.695    | -6.705  | -4.957  | 0.979   | 33.887  | 32.515  | 7.356   |
| 10.500 | 31.087   | -0.068   | 0.734    | -3.454  | -3.482  | -0.442  | 28.892  | 24.185  | 7.370   |
| 11.000 | 31.001   | 0.117    | 0.771    | -0.630  | -3.587  | -0.197  | 33.974  | 32.952  | 7.966   |
| 11.500 | 31.063   | 0.115    | 0.656    | -1.384  | -3.530  | -0.475  | 29.463  | 29.599  | 7.680   |
| 12.000 | 31.303   | 0.056    | 0.873    | -0.785  | -3.173  | -0.408  | 27.604  | 25.705  | 7.619   |
| 12.990 | 32.127   | 0.064    | 0.759    | -1.320  | -2.908  | -0.645  | 24.887  | 23.008  | 7.194   |
| 14.000 | 32.160   | 0.285    | 0.552    | 0.883   | -1.541  | -0.768  | 43.422  | 34.379  | 7.907   |
| 14.940 | 32.987   | 0.431    | 0.334    | -0.489  | -1.652  | -0.597  | 30.855  | 29.644  | 6.434   |
| 15.900 | 33.367   | 0.419    | 0.268    | -0.756  | -2.511  | -0.210  | 37.017  | 33.667  | 7.012   |
| 17.000 | 34.164   | 0.330    | -0.113   | 1.487   | -3.115  | -0.673  | 44.017  | 45.173  | 6.918   |
| 18.000 | 34.722   | 0.730    | -0.250   | 0.959   | -2.095  | -1.136  | 51.151  | 57.254  | 6.474   |
| 18.500 | 34.669   | 0.508    | 0.383    | 0.162   | -2.685  | -0.803  | 20.706  | 20.307  | 4.954   |



## ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.520  | 18.149   | -1.109   | 0.033    | -2.624  | -1.212  | 0.931   | 30.313  | 30.182  | 5.587   |
| 1.000  | 18.330   | -0.829   | -0.030   | -5.101  | -2.816  | -0.479  | 42.837  | 41.723  | 7.425   |
| 1.510  | 18.895   | -1.156   | -0.532   | -2.993  | -4.684  | -0.058  | 53.378  | 47.822  | 8.955   |
| 1.780  | 21.791   | -1.117   | -1.440   | -0.175  | -6.771  | -0.721  | 37.167  | 27.824  | 9.890   |
| 2.470  | 23.811   | -1.105   | -1.406   | -28.435   | -12.557   | 8.436   | 72.529  | 86.137  | 11.136  |
| 3.020  | 26.611   | -1.431   | -1.349   | -4.317  | -8.053  | 0.502   | 49.522  | 46.252  | 8.167   |
| 3.530  | 28.025   | -1.060   | -1.096   | -1.509  | -4.856  | -1.552  | 43.540  | 32.237  | 7.114   |
| 3.970  | 29.010   | -1.308   | -0.787   | -2.497  | -7.099  | -1.498  | 37.351  | 30.259  | 7.937   |
| 4.480  | 29.936   | -1.188   | -0.670   | -3.852  | -5.667  | -0.572  | 36.492  | 23.396  | 7.558   |
| 4.940  | 30.286   | -1.184   | -0.571   | -2.586  | -5.181  | -0.708  | 37.238  | 25.964  | 7.946   |
| 5.490  | 30.584   | -0.814   | -0.599   | -3.300  | -5.162  | -0.457  | 29.944  | 18.062  | 7.574   |
| 5.950  | 31.556   | -0.908   | -0.453   | -4.847  | -4.184  | -1.021  | 29.032  | 18.747  | 7.465   |
| 6.450  | 31.859   | -0.942   | -0.436   | -3.746  | -4.467  | -0.137  | 25.728  | 16.770  | 6.712   |
| 6.950  | 32.293   | -0.712   | -0.496   | -5.236  | -3.931  | -0.079  | 27.061  | 17.239  | 6.980   |
| 7.450  | 33.082   | -0.549   | -0.620   | -4.587  | -3.617  | -0.750  | 24.953  | 16.944  | 6.764   |
| 7.940  | 33.342   | -0.439   | -0.482   | -5.009  | -4.481  | -0.217  | 29.387  | 22.713  | 6.939   |
| 8.500  | 32.623   | -0.422   | -0.145   | -4.360  | -4.648  | -0.520  | 30.540  | 16.640  | 7.034   |
| 9.000  | 33.768   | -0.405   | -0.260   | -3.970  | -2.980  | -0.343  | 24.767  | 14.428  | 6.748   |
| 9.500  | 33.441   | -0.326   | -0.256   | -3.840  | -2.765  | -0.396  | 24.184  | 13.400  | 5.900   |
| 10.000 | 33.896   | -0.507   | -0.180   | 7.829   | -5.769  | -4.540  | 48.119  | 57.895  | 7.613   |
| 10.500 | 34.519   | -0.164   | -0.244   | 3.194   | -3.979  | -2.497  | 38.588  | 42.839  | 7.286   |
| 11.000 | 34.335   | -0.008   | -0.264   | -2.552  | -3.514  | -0.608  | 33.773  | 30.545  | 7.058   |
| 11.500 | 34.886   | -0.138   | -0.301   | -3.629  | -2.330  | -0.557  | 27.310  | 24.210  | 6.431   |
| 11.850 | 34.723   | -0.058   | -0.373   | -4.098  | -1.886  | -0.324  | 27.366  | 23.935  | 7.121   |
| 12.960 | 35.098   | 0.251    | -0.294   | -1.149  | 0.276   | -0.860  | 49.944  | 24.982  | 6.457   |
| 13.870 | 35.186   | 0.337    | -0.402   | -2.047  | 9.117   | 0.602   | 120.655   | 32.157  | 7.847   |
| 14.920 | 35.455   | 0.344    | -0.412   | 0.140   | -1.301  | -0.607  | 35.392  | 34.709  | 7.105   |
| 15.850 | 35.863   | 0.726    | -0.375   | 0.881   | -1.910  | -0.895  | 46.255  | 38.316  | 6.167   |
| 16.850 | 35.492   | 0.784    | -0.711   | 2.364   | -1.898  | -1.453  | 58.160  | 63.888  | 6.991   |
| 17.830 | 36.186   | 1.092    | -0.818   | 16.476  | -6.807  | -6.586  | 64.560  | 99.686  | 7.173   |
| 18.380 | 36.349   | 0.760    | -0.214   | 1.526   | -1.751  | -1.040  | 22.373  | 21.523  | 4.552   |

ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| 0.550  | 18.709      | -0.614      | 0.069       | -0.149   | -0.901   | -1.007   | 20.579   | 18.151   | 4.807  |
| 1.040  | 19.426      | -0.926      | -0.353      | -0.690   | -1.969   | -0.195   | 25.515   | 18.828   | 5.914  |
| 1.510  | 20.887      | -1.003      | -0.653      | 0.371  | -5.353   | -1.030   | 27.562   | 20.897   | 7.883  |
| 2.030  | 22.918      | -1.405      | -1.012      | -1.903   | -5.579   | -1.084   | 27.622   | 20.677   | 7.680  |
| 2.510  | 24.260      | -0.918      | -0.789      | -1.497   | -7.284   | -0.652   | 32.479   | 21.402   | 7.585  |
| 3.030  | 26.068      | -1.213      | -0.806      | -2.446   | -6.233   | -1.521   | 29.529   | 19.025   | 6.877  |
| 3.520  | 27.106      | -1.463      | -0.572      | -2.747   | -4.794   | -1.152   | 44.958   | 33.720   | 7.452  |
| 4.000  | 27.493      | 0.241       | -0.302      | -30.295  | -6.060   | 7.391  | 98.186   | 97.941   | 10.168   |
| 4.560  | 28.916      | -1.232      | -0.460      | -2.303   | -5.892   | -0.687   | 34.867   | 29.950   | 7.903  |
| 5.050  | 29.851      | -0.934      | -0.432      | -4.646   | -6.341   | -0.625   | 36.103   | 26.302   | 7.873  |
| 5.490  | 30.517      | -1.154      | -0.491      | -3.598   | -5.103   | 0.019  | 29.719   | 19.269   | 7.173  |
| 5.970  | 31.146      | -0.882      | -0.411      | -3.805   | -4.429   | -0.419   | 26.929   | 17.938   | 7.039  |
| 6.480  | 31.801      | -0.934      | -0.493      | -4.601   | -4.480   | -0.991   | 25.704   | 19.413   | 7.244  |
| 6.990  | 31.950      | -0.766      | -0.302      | -4.264   | -3.561   | -0.305   | 25.322   | 17.512   | 7.235  |
| 7.490  | 32.429      | -0.625      | -0.391      | -2.909   | -3.928   | -1.068   | 25.185   | 16.696   | 6.830  |
| 8.000  | 32.562      | -0.644      | -0.252      | -3.600   | -3.418   | -1.158   | 29.946   | 24.441   | 7.021  |
| 8.460  | 32.797      | -0.478      | -0.216      | -3.828   | -3.792   | -1.366   | 32.053   | 27.800   | 7.633  |
| 8.950  | 33.025      | -0.275      | -0.091      | -3.055   | -4.792   | -0.695   | 36.604   | 41.808   | 7.920  |
| 9.470  | 32.914      | -0.168      | -0.085      | -2.067   | -3.380   | -0.631   | 34.009   | 16.755   | 7.272  |
| 9.990  | 32.795      | 0.561       | 0.043       | 5.428  | -6.249   | -3.453   | 44.013   | 53.648   | 7.956  |
| 10.510 | 33.193      | -0.256      | 0.065       | 10.163   | -5.649   | -4.049   | 38.407   | 49.938   | 7.774  |
| 11.000 | 33.718      | -0.159      | -0.181      | -1.711   | -2.910   | -0.574   | 33.472   | 27.050   | 7.140  |
| 11.500 | 33.662      | -0.026      | -0.014      | -3.343   | -2.822   | -0.549   | 29.338   | 23.780   | 6.641  |
| 11.950 | 34.227      | 0.039       | -0.165      | -2.926   | -2.329   | 0.014  | 26.723   | 23.766   | 6.422  |
| 12.990 | 34.370      | 0.007       | -0.011      | -3.044   | -1.903   | 0.170  | 27.078   | 22.934   | 6.761  |
| 13.950 | 34.321      | 0.131       | -0.202      | -2.787   | -0.862   | -0.639   | 39.977   | 28.123   | 7.092  |
| 15.000 | 34.515      | 0.491       | -0.186      | -0.343   | -2.391   | -1.099   | 26.512   | 26.150   | 6.265  |
| 16.000 | 34.536      | 0.531       | -0.364      | 0.753  | -0.684   | -1.375   | 49.293   | 36.479   | 6.600  |
| 16.930 | 35.045      | 0.692       | -0.562      | -1.366   | -2.890   | -1.020   | 43.366   | 53.038   | 6.330  |
| 17.880 | 35.827      | 0.189       | -0.796      | 8.727  | -4.780   | -2.012   | 68.705   | 78.029   | 7.720  |
| 18.420 | 35.394      | 0.758       | 0.008       | 0.978  | -2.356   | -1.257   | 20.009   | 21.887   | 5.157  |

ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.580  | 13.108   | -0.933   | -0.043   | -0.612  | 0.788   | 0.120   | 17.769  | 14.237  | 2.352   |
| 1.060  | 18.674   | -0.789   | -0.178   | -0.303  | -1.101  | -0.159  | 20.510  | 20.753  | 5.669   |
| 1.540  | 19.711   | -1.184   | -0.655   | -0.319  | -4.441  | -0.420  | 42.905  | 44.983  | 8.254   |
| 2.030  | 21.867   | -1.119   | -1.008   | -0.118  | -7.388  | -1.785  | 50.259  | 46.213  | 10.245  |
| 2.510  | 23.640   | -1.177   | -1.126   | -4.873  | -8.959  | 0.407   | 54.181  | 38.562  | 9.740   |
| 3.000  | 25.035   | -1.167   | -1.060   | -3.236  | -6.748  | -0.564  | 47.716  | 32.067  | 7.905   |
| 3.500  | 27.568   | -1.362   | -1.075   | -1.424  | -6.457  | -1.886  | 39.649  | 30.478  | 7.518   |
| 3.980  | 28.339   | -1.307   | -0.654   | -2.398  | -5.593  | -1.134  | 38.353  | 25.265  | 6.704   |
| 4.510  | 28.549   | -1.062   | -0.530   | -3.479  | -5.258  | -0.537  | 37.370  | 26.799  | 7.424   |
| 5.000  | 29.722   | -1.297   | -0.445   | -1.038  | -6.327  | -1.810  | 35.199  | 27.729  | 8.128   |
| 5.510  | 30.962   | -1.017   | -0.595   | -6.002  | -6.237  | 0.177   | 40.064  | 34.643  | 7.843   |
| 5.990  | 31.380   | -0.768   | -0.467   | -4.803  | -5.775  | -0.681  | 37.295  | 27.440  | 8.078   |
| 6.490  | 31.665   | -0.760   | -0.457   | -2.139  | -6.153  | -0.796  | 37.542  | 34.309  | 7.610   |
| 7.020  | 31.710   | -0.649   | -0.490   | -5.546  | -4.221  | -0.134  | 34.588  | 22.436  | 6.868   |
| 7.510  | 32.061   | -0.710   | -0.365   | -1.256  | -4.101  | -1.208  | 40.509  | 32.279  | 8.185   |
| 8.030  | 32.649   | -0.301   | -0.444   | -0.920  | -4.472  | -0.798  | 40.217  | 33.432  | 7.270   |
| 8.530  | 33.473   | -0.595   | -0.408   | -0.411  | -4.651  | -1.570  | 39.340  | 34.201  | 7.200   |
| 9.020  | 33.324   | -0.276   | -0.405   | -0.181  | -2.953  | -1.449  | 38.818  | 29.571  | 7.049   |
| 9.500  | 33.774   | -0.301   | -0.334   | -4.542  | -3.339  | -0.336  | 45.690  | 38.481  | 7.483   |
| 10.000 | 34.222   | -0.541   | -0.357   | 2.080   | -3.673  | -2.293  | 39.060  | 44.496  | 7.300   |
| 10.500 | 34.412   | -0.049   | -0.379   | 0.371   | -3.385  | -1.327  | 30.890  | 32.527  | 6.675   |
| 11.000 | 35.001   | 0.095    | -0.378   | -3.000  | -2.761  | -0.410  | 27.018  | 22.718  | 6.488   |
| 11.450 | 34.601   | 0.001    | -0.317   | -3.320  | -2.790  | -0.022  | 29.006  | 22.591  | 6.735   |
| 11.950 | 34.713   | 0.138    | -0.190   | -2.282  | -3.019  | -0.710  | 25.694  | 22.659  | 6.638   |
| 12.890 | 35.124   | 0.100    | -0.282   | -2.051  | -1.757  | -0.694  | 28.645  | 23.052  | 6.452   |
| 13.900 | 34.886   | 0.452    | -0.396   | -1.351  | 4.405   | 1.089   | 82.704  | 31.818  | 7.407   |
| 14.920 | 35.132   | 0.522    | -0.391   | -4.482  | -1.310  | 0.150   | 45.602  | 34.799  | 6.347   |
| 15.870 | 35.667   | 0.638    | -0.301   | 0.075   | -2.193  | -0.456  | 35.193  | 34.285  | 6.053   |
| 16.860 | 35.102   | 0.792    | -0.681   | -6.072  | -5.895  | 1.120   | 78.991  | 99.177  | 8.101   |
| 17.870 | 35.822   | 0.403    | -0.672   | 39.622  | -5.179  | -11.377   | 75.452  | 104.511   | 7.684   |
| 18.370 | 35.480   | 0.768    | -0.049   | 1.282   | -2.520  | -0.814  | 23.728  | 24.976  | 5.210   |

ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 21.547   | -1.045   | 0.057    | -1.733  | -2.496  | -0.365   | 27.287  | 24.072  | 3.862   |
| 1.050  | 21.942   | -1.088   | 0.250    | -12.943   | -5.167  | 3.112  | 47.814  | 55.333  | 5.569   |
| 1.570  | 22.686   | -1.255   | 0.051    | -3.866  | -3.260  | -0.815   | 37.537  | 39.618  | 6.129   |
| 2.030  | 22.417   | -1.028   | 0.312    | -6.245  | -2.918  | 0.788  | 35.563  | 28.812  | 5.609   |
| 2.550  | 22.987   | -0.884   | 0.174    | -6.914  | -4.590  | 1.156  | 33.130  | 29.479  | 5.971   |
| 3.020  | 24.305   | -1.023   | 0.041    | -5.854  | -5.738  | 0.099  | 36.875  | 29.604  | 6.892   |
| 4.030  | 24.348   | -0.663   | 0.426    | -4.204  | -4.647  | 0.465  | 29.236  | 24.509  | 6.497   |
| 5.000  | 24.789   | -0.411   | 0.218    | -7.158  | -4.985  | 1.164  | 31.013  | 26.503  | 6.997   |
| 6.000  | 25.511   | -0.320   | 0.423    | -3.232  | -4.845  | -0.248   | 27.654  | 20.311  | 7.657   |
| 7.010  | 25.932   | -0.682   | 0.217    | -4.169  | -3.698  | 0.543  | 24.818  | 15.263  | 6.891   |
| 8.000  | 26.969   | -0.350   | 0.368    | 5.540   | -5.957  | -2.752   | 37.430  | 47.123  | 8.101   |
| 9.000  | 27.493   | 0.306    | 0.311    | -1.582  | -4.007  | -0.597   | 29.285  | 21.901  | 7.465   |
| 10.000 | 28.165   | 0.165    | 0.278    | -1.011  | -4.326  | 0.131  | 27.233  | 21.595  | 7.595   |
| 11.010 | 28.928   | 0.168    | 0.078    | -0.745  | -3.756  | -0.385   | 26.206  | 20.951  | 7.239   |
| 12.050 | 29.430   | 0.242    | 0.145    | -1.692  | -3.717  | -0.290   | 24.504  | 18.939  | 6.565   |
| 13.060 | 29.947   | 0.285    | 0.055    | -0.771  | -2.702  | -0.749   | 29.263  | 21.772  | 6.652   |
| 14.050 | 30.394   | 0.089    | 0.049    | 0.119   | -4.877  | -1.014   | 33.739  | 33.936  | 7.498   |
| 15.040 | 30.753   | 0.356    | -0.082   | 0.554   | -3.104  | -1.588   | 25.622  | 25.974  | 6.289   |
| 16.000 | 31.557   | 0.141    | -0.438   | 6.895   | -0.344  | -2.892   | 88.553  | 74.603  | 7.902   |
| 17.000 | 32.142   | 0.312    | -0.415   | 0.342   | -3.148  | -0.558   | 21.438  | 19.578  | 5.817   |
| 18.010 | 32.146   | 0.301    | -0.488   | 2.272   | -2.286  | -1.155   | 32.773  | 23.746  | 5.931   |
| 19.000 | 32.648   | 0.437    | -0.054   | 0.305   | -2.787  | -0.593   | 19.882  | 16.716  | 4.994   |

ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.500  | 20.633   | -1.480   | -0.139   | -2.596  | -0.377  | -0.367   | 26.634  | 19.559  | 2.391   |
| 1.010  | 23.798   | -1.179   | -0.198   | 0.567   | -1.720  | -2.057   | 50.941  | 49.676  | 4.277   |
| 1.550  | 24.457   | -1.106   | -0.297   | -3.344  | -2.427  | -0.186   | 39.264  | 37.221  | 4.826   |
| 2.050  | 25.179   | -1.334   | -0.406   | -3.592  | -1.262  | -0.949   | 41.237  | 35.110  | 5.020   |
| 2.570  | 25.278   | -1.324   | -0.163   | -3.158  | -2.070  | -1.028   | 38.090  | 35.944  | 5.140   |
| 3.070  | 25.421   | -1.291   | -0.146   | -0.951  | -2.462  | -0.560   | 35.719  | 33.063  | 5.928   |
| 4.030  | 26.616   | -0.999   | -0.280   | -1.516  | -3.022  | -0.678   | 30.414  | 22.308  | 5.264   |
| 5.040  | 26.867   | -0.508   | -0.297   | -3.085  | -3.507  | -0.434   | 32.815  | 27.432  | 6.620   |
| 6.080  | 27.120   | -0.590   | -0.320   | -4.318  | -3.851  | 0.157  | 30.700  | 26.510  | 6.589   |
| 6.990  | 27.334   | -0.311   | -0.271   | -4.324  | -3.699  | 0.423  | 27.832  | 25.564  | 6.605   |
| 8.060  | 27.337   | 0.132    | -0.043   | 10.219  | -6.179  | -3.231   | 46.751  | 61.862  | 7.568   |
| 9.020  | 27.925   | -0.013   | -0.114   | -2.588  | -3.932  | -0.312   | 34.223  | 29.066  | 6.764   |
| 10.020 | 27.814   | -0.023   | -0.081   | -3.831  | -3.920  | -0.792   | 33.608  | 29.367  | 6.903   |
| 11.050 | 29.242   | 0.082    | -0.278   | -1.401  | -4.314  | -0.347   | 33.858  | 27.255  | 7.044   |
| 12.020 | 29.760   | 0.142    | -0.320   | -2.435  | -3.739  | -0.210   | 32.778  | 26.136  | 6.957   |
| 13.020 | 29.206   | 0.124    | -0.186   | -2.392  | -1.775  | -0.138   | 52.329  | 29.599  | 7.293   |
| 14.050 | 30.106   | 0.455    | -0.371   | 3.852   | -1.572  | -1.386   | 69.098  | 56.461  | 7.329   |
| 15.060 | 30.293   | 0.188    | -0.392   | -1.130  | -3.862  | -0.623   | 46.765  | 44.131  | 7.388   |
| 16.000 | 31.385   | 0.324    | -0.665   | 10.980  | -6.458  | -0.892   | 145.861   | 182.005   | 10.188  |
| 17.040 | 31.754   | 0.547    | -0.839   | -1.593  | -2.693  | -0.407   | 37.314  | 37.006  | 6.144   |
| 18.050 | 32.326   | 0.299    | -0.931   | 0.676   | -1.474  | -0.979   | 47.073  | 41.532  | 6.233   |
| 19.060 | 32.300   | 0.541    | -0.366   | -0.595  | -1.637  | -0.543   | 39.154  | 38.109  | 5.663   |

### Πείραμα (Experiment) 3

#### ΘΕΣΗ (POSITION) B

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.510  | 12.821   | -0.193   | 0.405    | 3.636   | 1.604   | 0.078  | 28.550  | 21.964  | 4.569   |
| 1.030  | 12.838   | -0.542   | 0.321    | 1.465   | -0.263  | 0.597  | 23.863  | 23.653  | 5.144   |
| 1.530  | 13.937   | -0.466   | 0.455    | 1.058   | 0.079   | 0.709  | 24.263  | 27.019  | 6.506   |
| 2.020  | 14.403   | -0.450   | 0.165    | -1.067  | -0.671  | 0.357  | 30.633  | 32.589  | 6.812   |
| 2.540  | 14.188   | -0.248   | 0.478    | 0.682   | -0.396  | 0.179  | 27.842  | 31.739  | 7.047   |
| 3.070  | 14.902   | 0.902    | 0.592    | 47.991  | -3.803  | -12.636  | 144.195   | 185.268   | 11.866  |
| 3.530  | 12.756   | 0.350    | 0.491    | 1.803   | 0.480   | 0.174  | 52.065  | 59.441  | 7.504   |
| 4.030  | 13.294   | 0.211    | 0.832    | 10.779  | 12.745  | -1.417   | 153.497   | 70.179  | 9.826   |
| 4.520  | 11.634   | 0.040    | 0.493    | 5.154   | -1.304  | -0.832   | 49.762  | 49.168  | 9.191   |
| 5.030  | 13.714   | -0.342   | 0.278    | -1.246  | -5.128  | 1.189  | 61.342  | 46.971  | 9.856   |
| 5.500  | 15.880   | -0.596   | 0.223    | 0.204   | -8.663  | 0.038  | 40.311  | 29.320  | 8.009   |
| 6.000  | 19.649   | -0.273   | 0.011    | -2.610  | -10.442   | 0.546  | 49.939  | 28.718  | 8.749   |
| 6.500  | 22.016   | -0.548   | 0.350    | -5.325  | -7.680  | -0.382   | 39.001  | 26.108  | 7.986   |
| 7.010  | 23.667   | -0.624   | 0.514    | -3.313  | -8.289  | -0.341   | 35.686  | 25.649  | 9.331   |
| 7.500  | 24.328   | -0.512   | 0.442    | -5.461  | -7.840  | 0.010  | 76.772  | 74.816  | 12.352  |
| 8.000  | 25.804   | -0.842   | 0.646    | -6.141  | -9.498  | -0.029   | 81.849  | 67.977  | 13.077  |
| 8.500  | 26.102   | -0.549   | 0.635    | -4.596  | -7.944  | -0.418   | 60.460  | 50.017  | 12.250  |
| 9.000  | 26.375   | -0.268   | 0.939    | -3.263  | -7.699  | -0.401   | 49.707  | 28.905  | 10.689  |
| 9.500  | 27.024   | -0.654   | 0.830    | -3.637  | -8.368  | -0.257   | 58.209  | 44.890  | 13.548  |
| 10.000 | 27.720   | -0.538   | 0.905    | -2.424  | -7.792  | -1.455   | 55.920  | 29.076  | 10.363  |
| 10.500 | 27.113   | -0.213   | 0.780    | -1.095  | -5.564  | 0.594  | 124.157   | 28.200  | 10.350  |
| 11.000 | 28.289   | -0.258   | 0.343    | 3.534   | -9.085  | -0.025   | 36.253  | 40.322  | 9.113   |
| 11.500 | 29.606   | -0.060   | 0.979    | 13.441  | -3.430  | -4.451   | 139.488   | 106.346   | 15.359  |
| 12.000 | 30.298   | 0.170    | 0.755    | 3.949   | -11.344   | -2.063   | 112.384   | 126.490   | 15.647  |
| 13.000 | 30.740   | 0.105    | 0.683    | 16.583  | -7.758  | -5.140   | 111.361   | 106.804   | 14.763  |
| 14.000 | 32.124   | 0.222    | 0.743    | 7.850   | -8.225  | -2.519   | 80.451  | 83.729  | 13.353  |
| 15.000 | 34.090   | 0.100    | 0.266    | 0.621   | -3.517  | -1.199   | 92.132  | 65.939  | 12.944  |
| 16.000 | 34.868   | 0.375    | -0.056   | 17.517  | -3.901  | -6.083   | 140.869   | 121.014   | 15.109  |
| 17.000 | 32.122   | 0.477    | 0.168    | 0.999   | -7.055  | -1.738   | 37.900  | 31.550  | 10.069  |
| 18.000 | 37.485   | 0.324    | -0.114   | 3.034   | -0.861  | -3.335   | 128.642   | 74.564  | 13.565  |
| 19.000 | 36.196   | -0.183   | 0.263    | -9.461  | 25.993  | 2.659  | 310.569   | 63.631  | 15.589  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.520  | 19.473   | 0.482    | -0.205   | -4.682  | -3.450  | 0.846  | 43.240  | 53.200  | 4.980   |
| 1.080  | 19.583   | 0.754    | -0.216   | -3.342  | -2.226  | 0.211  | 26.375  | 30.820  | 4.696   |
| 1.570  | 20.422   | -0.906   | -0.198   | -4.970  | -3.481  | -0.105   | 33.029  | 21.330  | 5.997   |
| 2.080  | 18.714   | -0.622   | 0.123    | -0.405  | -0.884  | -2.903   | 30.262  | 21.661  | 5.370   |
| 2.540  | 18.892   | 3.221    | -0.052   | -1.510  | 1.248   | -4.324   | 25.176  | 20.888  | 4.367   |
| 3.010  | 5.948    | 0.847    | 0.306    | 18.723  | -1.647  | -5.794   | 32.449  | 33.233  | 1.609   |
| 3.550  | 2.558    | -0.295   | 0.199    | -0.451  | 0.471   | 0.106  | 8.849   | 1.395   | 0.238   |
| 4.070  | 1.627    | -0.940   | -0.107   | -2.323  | -0.327  | 0.771  | 5.508   | 4.306   | 0.275   |
| 4.510  | 1.475    | -0.540   | -0.007   | -6.442  | -0.482  | 1.989  | 11.336  | 11.401  | 0.514   |
| 5.000  | 2.628    | -0.141   | 0.322    | -1.864  | 0.663   | 0.661  | 15.508  | 8.285   | 0.441   |
| 5.500  | 0.264    | -0.143   | 0.040    | 1.285   | -0.245  | -0.360   | 6.045   | 5.394   | 0.210   |
| 6.000  | 4.521    | -0.776   | 0.077    | -1.934  | -0.092  | 0.398  | 14.338  | 4.013   | 0.581   |
| 6.500  | 22.321   | -0.939   | 0.695    | -6.079  | -5.123  | -0.125   | 35.754  | 27.938  | 9.500   |
| 7.000  | 24.724   | -0.846   | 0.109    | 8.971   | -12.650   | -0.234   | 44.493  | 60.838  | 8.879   |
| 7.500  | 24.905   | -0.837   | -0.139   | 5.829   | -10.229   | 0.998  | 49.096  | 74.727  | 8.170   |
| 8.000  | 26.351   | -0.523   | -0.519   | 8.419   | -13.389   | 2.019  | 47.614  | 68.547  | 7.881   |
| 8.500  | 27.973   | -0.501   | 0.460    | -3.318  | -10.502   | -1.162   | 38.845  | 32.131  | 12.502  |
| 9.000  | 28.985   | -0.823   | 0.474    | -2.912  | -7.748  | -3.483   | 39.163  | 31.268  | 12.630  |
| 9.500  | 29.270   | -0.890   | 0.161    | -3.085  | -11.201   | -0.490   | 43.399  | 36.063  | 12.990  |
| 10.000 | 29.958   | -0.374   | 0.237    | -15.023   | -10.352   | 4.281  | 40.540  | 35.678  | 12.280  |
| 10.500 | 29.959   | -0.258   | 0.354    | -2.030  | -8.172  | -1.280   | 36.648  | 28.882  | 12.425  |
| 11.000 | 30.612   | -0.284   | 0.153    | -2.928  | -8.487  | 0.385  | 36.091  | 27.831  | 11.628  |
| 11.500 | 31.464   | -0.099   | 0.073    | 1.082   | -7.214  | 0.287  | 33.706  | 28.780  | 10.991  |
| 12.000 | 31.491   | -0.219   | -0.038   | 1.034   | -9.055  | 0.901  | 37.440  | 37.618  | 11.566  |
| 13.000 | 33.542   | -0.019   | -0.586   | 7.885   | -6.934  | 0.046  | 34.986  | 39.808  | 9.150   |
| 14.000 | 33.894   | 0.510    | -0.026   | -2.661  | -4.634  | -2.548   | 85.907  | 63.543  | 13.893  |
| 15.000 | 34.780   | 0.191    | -0.212   | -3.894  | -6.701  | -0.392   | 54.680  | 48.322  | 12.317  |
| 16.000 | 35.565   | 0.389    | -0.238   | 4.999   | -3.022  | -1.950   | 120.167   | 81.219  | 12.940  |
| 17.000 | 36.257   | 0.682    | -0.217   | -0.730  | -6.509  | -2.885   | 50.258  | 45.867  | 12.222  |
| 18.000 | 37.246   | 0.117    | -0.593   | 1.563   | -4.313  | -2.220   | 67.424  | 62.176  | 10.969  |
| 19.000 | 37.248   | 0.624    | -0.388   | -1.293  | 11.422  | -0.705   | 164.091   | 45.943  | 11.709  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.580  | 13.356   | -0.883   | -0.087   | -1.921  | -0.351  | -0.197   | 18.624  | 8.950   | 1.830   |
| 1.090  | 19.327   | -1.161   | -0.101   | -2.787  | -1.570  | -0.610   | 22.391  | 15.303  | 4.132   |
| 1.500  | 20.558   | -0.910   | -0.057   | -3.918  | -2.597  | -0.489   | 46.163  | 40.550  | 6.056   |
| 2.050  | 20.198   | -1.142   | 0.161    | -1.731  | -2.137  | -0.790   | 50.294  | 41.399  | 6.821   |
| 2.580  | 20.505   | -1.127   | 0.291    | -4.286  | -2.523  | -0.331   | 26.788  | 16.940  | 6.380   |
| 3.060  | 20.307   | -1.376   | 0.373    | -5.424  | -3.794  | 0.316  | 29.322  | 17.883  | 7.576   |
| 3.570  | 20.942   | -1.515   | 0.183    | -6.791  | -3.826  | 0.729  | 49.163  | 30.449  | 8.929   |
| 4.030  | 21.029   | -1.065   | 0.248    | -1.169  | -4.350  | -0.961   | 60.003  | 46.563  | 11.372  |
| 4.510  | 21.726   | -1.751   | 0.446    | -5.707  | -4.454  | 0.049  | 58.227  | 35.325  | 10.273  |
| 5.010  | 22.202   | -1.157   | 0.279    | -9.200  | -6.307  | -0.658   | 54.273  | 39.071  | 11.667  |
| 5.500  | 23.533   | -1.282   | 0.254    | -6.584  | -7.077  | -1.236   | 43.190  | 24.464  | 12.451  |
| 6.040  | 24.131   | -1.266   | 0.291    | -6.508  | -8.780  | -1.002   | 44.889  | 21.927  | 11.738  |
| 6.530  | 24.558   | -1.090   | 0.213    | -5.027  | -8.581  | -1.348   | 49.353  | 26.946  | 11.956  |
| 7.020  | 25.774   | -0.881   | 0.332    | -4.047  | -8.475  | -0.907   | 45.754  | 26.136  | 12.748  |
| 7.550  | 26.377   | -0.743   | 0.337    | 9.881   | -11.355   | -5.763   | 64.225  | 75.160  | 13.444  |
| 8.020  | 27.340   | -0.546   | 0.345    | 6.883   | -10.551   | -3.626   | 63.219  | 61.238  | 14.414  |
| 8.550  | 27.877   | -0.798   | 0.214    | -0.671  | -9.066  | -1.569   | 59.823  | 46.747  | 12.898  |
| 9.000  | 28.584   | -0.598   | 0.213    | 6.203   | -8.475  | -3.707   | 61.811  | 58.810  | 13.175  |
| 9.500  | 28.796   | -0.569   | 0.366    | -3.689  | -9.472  | -1.467   | 38.321  | 25.152  | 13.123  |
| 10.000 | 30.053   | -0.312   | 0.238    | -6.974  | -7.560  | -0.431   | 54.689  | 40.459  | 12.596  |
| 10.500 | 30.661   | -0.489   | 0.064    | -5.465  | -7.692  | -0.915   | 44.961  | 36.248  | 13.083  |
| 11.000 | 30.766   | -0.079   | 0.174    | -6.605  | -6.478  | -1.360   | 44.180  | 34.015  | 12.978  |
| 11.500 | 31.613   | 0.158    | 0.020    | -9.871  | -9.240  | 1.121  | 63.687  | 62.100  | 13.129  |
| 12.000 | 31.870   | -0.037   | 0.244    | -8.796  | -7.426  | -1.079   | 59.441  | 60.487  | 13.798  |
| 13.000 | 33.118   | 0.185    | 0.286    | 2.932   | -8.798  | -3.661   | 74.252  | 80.713  | 14.851  |
| 14.000 | 33.980   | 0.272    | -0.063   | -2.826  | -3.474  | -1.191   | 75.679  | 49.183  | 12.723  |
| 15.000 | 34.892   | 0.269    | -0.194   | -6.083  | -2.966  | -0.474   | 71.062  | 48.882  | 13.107  |
| 16.000 | 35.328   | 0.297    | -0.212   | -1.167  | -2.068  | -1.341   | 99.270  | 81.590  | 12.446  |
| 17.000 | 37.086   | 1.255    | -0.530   | 11.295  | -6.631  | -5.712   | 49.504  | 56.303  | 10.364  |
| 18.000 | 36.833   | 1.435    | -0.583   | 17.808  | -6.898  | -5.254   | 79.359  | 67.007  | 11.288  |
| 19.000 | 38.580   | 0.697    | -0.074   | 55.565  | -11.653   | -17.752  | 88.267  | 134.270   | 11.692  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.580  | 16.368   | -5.931   | 0.520    | 33.386  | -7.374  | -9.717  | 50.387  | 79.440  | 5.055   |
| 1.030  | 14.623   | -10.733  | 1.588    | -2.744  | 1.544   | 5.518   | 30.646  | 35.646  | 2.606   |
| 1.550  | 18.284   | -5.404   | 0.646    | -0.206  | 3.847   | 6.917   | 30.492  | 31.123  | 2.352   |
| 2.030  | 16.532   | -3.785   | 0.642    | -2.591  | 0.623   | 5.204   | 26.328  | 29.285  | 3.242   |
| 2.540  | 15.024   | 0.983    | -0.155   | 1.157   | -3.466  | -2.472  | 31.545  | 30.290  | 4.348   |
| 3.020  | 6.640    | 0.267    | -0.197   | 10.182  | -2.826  | -3.990  | 38.127  | 23.525  | 2.154   |
| 3.580  | 3.858    | 1.298    | -0.026   | 1.599   | 0.216   | -0.895  | 15.171  | 4.196   | 0.561   |
| 4.070  | 3.736    | -0.871   | 0.048    | -4.537  | -0.029  | 1.612   | 14.515  | 9.669   | 0.583   |
| 4.560  | 3.396    | -0.704   | 0.216    | -10.900   | -0.323  | 2.881   | 19.103  | 17.632  | 0.706   |
| 5.000  | 1.040    | -0.525   | -0.046   | -2.052  | -0.078  | 0.384   | 7.462   | 2.382   | 0.219   |
| 5.500  | 10.095   | -1.990   | 0.414    | 1.044   | 2.175   | 0.596   | 26.893  | 6.463   | 2.007   |
| 6.000  | 22.585   | -1.586   | 0.857    | -3.927  | -1.469  | -0.587  | 33.658  | 15.797  | 8.210   |
| 6.500  | 25.219   | -1.152   | 0.729    | -4.338  | -7.759  | -0.560  | 46.526  | 20.937  | 10.668  |
| 7.000  | 25.693   | -0.553   | 0.609    | -4.803  | -8.705  | -1.907  | 37.093  | 28.331  | 11.580  |
| 7.500  | 26.381   | -0.647   | 0.390    | -1.205  | -8.318  | -1.034  | 35.017  | 32.752  | 10.937  |
| 8.000  | 27.147   | -0.743   | 0.538    | -4.294  | -7.266  | -1.045  | 33.299  | 22.432  | 11.500  |
| 8.500  | 27.763   | -0.643   | 0.597    | -5.079  | -8.920  | -1.431  | 35.101  | 26.843  | 13.339  |
| 9.000  | 28.690   | -0.565   | 0.286    | -4.853  | -9.312  | -0.683  | 41.741  | 38.228  | 13.720  |
| 9.500  | 29.407   | -0.379   | 0.408    | -4.406  | -7.877  | -0.793  | 45.212  | 33.298  | 12.298  |
| 10.000 | 29.791   | -0.720   | 0.283    | -7.049  | -8.374  | -0.436  | 51.532  | 36.027  | 12.063  |
| 10.500 | 30.497   | -0.469   | 0.354    | -5.394  | -8.348  | -0.869  | 43.746  | 28.757  | 12.880  |
| 11.000 | 30.921   | 0.124    | 0.312    | -5.173  | -7.262  | -0.971  | 41.138  | 30.100  | 12.169  |
| 11.500 | 31.577   | 0.151    | 0.167    | -6.218  | -7.563  | -1.196  | 41.205  | 31.750  | 13.033  |
| 12.000 | 31.963   | -0.059   | 0.267    | -4.330  | -6.111  | -1.335  | 42.537  | 29.710  | 13.032  |
| 13.000 | 33.535   | -0.137   | 0.130    | -1.994  | -5.373  | -1.101  | 63.372  | 45.616  | 13.152  |
| 14.000 | 34.064   | 0.304    | 0.317    | -2.857  | -6.343  | -2.200  | 55.385  | 40.293  | 12.792  |
| 15.000 | 35.617   | 0.139    | -0.238   | -3.050  | -6.073  | -0.852  | 52.132  | 34.092  | 11.898  |
| 16.000 | 35.481   | 0.222    | -0.138   | -6.956  | -2.362  | -0.680  | 74.512  | 39.313  | 12.964  |
| 17.000 | 36.557   | 0.280    | -0.326   | -4.598  | -4.171  | -1.266  | 35.621  | 30.712  | 11.016  |
| 18.000 | 37.819   | 1.035    | -0.366   | 2.460   | -4.040  | -3.053  | 44.804  | 38.476  | 9.706   |
| 19.000 | 38.013   | 0.610    | 0.086    | -2.548  | -2.817  | -0.572  | 35.855  | 26.942  | 8.886   |



ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 21.582   | -1.180   | -0.322   | 1.441   | -1.627  | -0.034  | 15.611  | 9.483   | 3.309   |
| 1.030  | 21.134   | -1.156   | -0.187   | 2.199   | -2.600  | -0.807  | 18.472  | 10.262  | 3.914   |
| 1.500  | 21.868   | -1.145   | -0.318   | 1.396   | -4.094  | -0.730  | 20.283  | 10.835  | 5.221   |
| 2.000  | 23.002   | -1.183   | -0.457   | 1.286   | -4.101  | -0.695  | 21.368  | 14.162  | 6.858   |
| 2.550  | 22.626   | -1.082   | -0.591   | 0.579   | -5.399  | -0.831  | 22.204  | 12.411  | 7.374   |
| 3.070  | 23.016   | -1.151   | -0.407   | 0.387   | -5.753  | -0.530  | 22.410  | 12.488  | 8.797   |
| 3.550  | 23.861   | -1.338   | -0.436   | 0.723   | -6.253  | -0.039  | 24.883  | 14.398  | 8.526   |
| 4.020  | 24.078   | -0.992   | -0.495   | 0.560   | -6.882  | -0.694  | 28.016  | 14.882  | 10.142  |
| 4.510  | 24.726   | -1.085   | -0.380   | -0.966  | -8.674  | 0.197   | 28.534  | 15.700  | 11.005  |
| 5.020  | 25.694   | -1.081   | -0.356   | -1.906  | -9.266  | 0.619   | 30.833  | 14.548  | 11.709  |
| 5.530  | 27.132   | -1.496   | -0.498   | -3.343  | -11.008   | 0.658   | 32.765  | 15.567  | 12.318  |
| 6.020  | 27.815   | -1.158   | -0.673   | -5.107  | -11.009   | -0.333  | 36.173  | 15.945  | 12.743  |
| 6.500  | 28.093   | -1.127   | -0.393   | -4.765  | -10.077   | -0.224  | 33.732  | 17.498  | 12.591  |
| 7.000  | 29.501   | -1.144   | -0.555   | -4.197  | -10.570   | -0.320  | 32.370  | 17.790  | 12.710  |
| 7.590  | 30.002   | -0.836   | -0.595   | -4.907  | -10.191   | -0.690  | 34.481  | 18.348  | 12.817  |
| 8.030  | 30.330   | -0.833   | -0.522   | -5.161  | -10.361   | -0.683  | 33.142  | 18.165  | 12.298  |
| 8.500  | 30.705   | -0.740   | -0.567   | -6.510  | -9.117  | 0.158   | 30.927  | 19.429  | 12.154  |
| 9.000  | 31.698   | -0.714   | -0.722   | -4.220  | -8.897  | -1.364  | 28.794  | 18.777  | 13.331  |
| 9.500  | 31.851   | -0.465   | -0.596   | -5.879  | -8.959  | -0.891  | 32.072  | 17.147  | 11.983  |
| 10.000 | 32.691   | -0.389   | -0.533   | -7.063  | -6.356  | -0.792  | 26.568  | 18.750  | 10.835  |
| 10.500 | 34.305   | -0.548   | -0.903   | -7.215  | -7.149  | -0.186  | 28.479  | 17.250  | 10.769  |
| 11.000 | 34.302   | -0.260   | -0.926   | -2.597  | -7.322  | -0.877  | 26.478  | 19.550  | 11.322  |
| 11.500 | 34.746   | -0.281   | -0.770   | -4.934  | -8.549  | -1.304  | 29.329  | 17.975  | 11.887  |
| 12.000 | 34.876   | -0.018   | -0.802   | -6.308  | -5.040  | -0.844  | 24.347  | 16.625  | 9.606   |
| 13.000 | 35.720   | 0.149    | -0.898   | -7.286  | -6.464  | -0.217  | 28.813  | 17.746  | 11.360  |
| 14.000 | 36.258   | 0.159    | -0.802   | -5.180  | -5.941  | -1.230  | 25.367  | 15.596  | 10.491  |
| 15.000 | 37.172   | 0.193    | -0.968   | -4.941  | -4.832  | -2.102  | 23.829  | 15.827  | 9.736   |
| 16.000 | 38.049   | 0.522    | -1.090   | -5.145  | -4.543  | -0.639  | 23.423  | 15.200  | 8.448   |
| 17.000 | 38.757   | 0.553    | -1.027   | -2.851  | -4.332  | -1.608  | 19.128  | 13.438  | 8.594   |
| 18.000 | 39.355   | 0.986    | -0.888   | -3.619  | -3.405  | -0.703  | 20.114  | 15.140  | 8.458   |
| 19.000 | 39.216   | 0.709    | -0.275   | -3.735  | -3.576  | -0.653  | 18.414  | 12.329  | 7.037   |

ΘΕΣΗ (POSITION) H

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.510  | 21.502   | -1.163   | -0.287   | 2.302   | -2.666  | -1.077  | 31.626  | 33.613  | 4.579   |
| 1.010  | 21.372   | -1.370   | -0.215   | 3.083   | -2.996  | -0.650  | 26.531  | 20.975  | 5.106   |
| 1.520  | 21.877   | -1.220   | -0.248   | -0.290  | -3.657  | -0.844  | 47.271  | 39.727  | 6.706   |
| 2.040  | 21.895   | -1.339   | -0.296   | 3.441   | -4.728  | -1.186  | 46.976  | 35.779  | 7.762   |
| 2.550  | 23.163   | -1.131   | -0.465   | 1.842   | -5.629  | -1.107  | 46.136  | 32.619  | 8.701   |
| 3.020  | 22.865   | -1.126   | -0.246   | -0.179  | -5.046  | 0.118   | 64.335  | 50.260  | 10.351  |
| 3.520  | 23.939   | -1.381   | -0.333   | -0.312  | -6.447  | -0.104  | 57.786  | 39.532  | 10.838  |
| 4.000  | 24.921   | -1.227   | -0.392   | 1.025   | -9.255  | -0.874  | 48.471  | 37.496  | 11.612  |
| 4.500  | 25.007   | -1.086   | -0.368   | -2.632  | -9.198  | -0.418  | 50.824  | 41.835  | 12.741  |
| 5.010  | 26.041   | -0.873   | -0.489   | -0.683  | -9.292  | -1.069  | 38.385  | 27.144  | 12.803  |
| 5.520  | 27.101   | -1.164   | -0.506   | -1.749  | -11.276   | -0.579  | 42.033  | 25.234  | 13.589  |
| 6.020  | 27.518   | -0.826   | -0.155   | -1.356  | -10.507   | -0.099  | 41.604  | 24.065  | 13.725  |
| 6.540  | 28.716   | -0.970   | -0.593   | -4.163  | -10.304   | -0.103  | 42.089  | 26.744  | 13.252  |
| 7.020  | 28.783   | -0.972   | -0.415   | -3.528  | -8.619  | -0.260  | 39.978  | 26.901  | 12.213  |
| 7.520  | 29.113   | -0.590   | -0.319   | -2.106  | -12.229   | -1.762  | 68.920  | 66.740  | 15.255  |
| 8.040  | 30.171   | -0.689   | -0.222   | -5.190  | -9.858  | -0.095  | 47.134  | 27.593  | 12.521  |
| 8.510  | 30.740   | -0.552   | -0.555   | -13.428   | -8.433  | 1.921   | 107.496   | 96.097  | 14.419  |
| 9.040  | 32.743   | -0.354   | -0.511   | 5.332   | -10.428   | -1.998  | 83.341  | 78.983  | 16.852  |
| 9.540  | 32.657   | -0.176   | -0.792   | 3.621   | -11.005   | -2.414  | 56.129  | 58.663  | 13.981  |
| 10.020 | 32.450   | -0.239   | -0.571   | 2.309   | -9.161  | -3.883  | 51.219  | 53.831  | 13.099  |
| 10.500 | 33.907   | -0.286   | -0.730   | 0.511   | -5.403  | -3.798  | 91.792  | 70.723  | 13.831  |
| 11.000 | 34.221   | -0.188   | -0.710   | 1.101   | -8.207  | -2.594  | 62.392  | 59.003  | 13.494  |
| 11.500 | 34.537   | 0.065    | -0.888   | -6.130  | -4.744  | 0.060   | 62.090  | 48.859  | 12.345  |
| 12.000 | 34.506   | -0.352   | -0.709   | -18.812   | -8.330  | 1.347   | 62.700  | 70.382  | 14.305  |
| 13.000 | 35.752   | 0.075    | -0.827   | -5.810  | -5.931  | -0.485  | 56.525  | 49.855  | 12.241  |
| 14.000 | 36.379   | 0.216    | -0.782   | -4.333  | -6.912  | -2.034  | 72.577  | 76.285  | 13.378  |
| 15.000 | 37.998   | 0.173    | -0.982   | -16.230   | -8.439  | 1.501   | 67.005  | 79.791  | 12.480  |
| 16.000 | 38.182   | 0.560    | -0.823   | 7.451   | -0.439  | -2.761  | 119.091   | 76.140  | 12.184  |
| 17.000 | 38.488   | 0.165    | -0.876   | 2.748   | -5.362  | -2.196  | 47.907  | 50.043  | 10.151  |
| 18.000 | 39.219   | 1.138    | -0.956   | -0.440  | -3.448  | -1.662  | 61.206  | 58.681  | 9.377   |
| 19.000 | 39.127   | 0.514    | -0.421   | 21.348  | -4.067  | -8.277  | 108.479   | 108.789   | 10.031  |

ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.530  | 21.214   | -1.464   | -0.280   | 1.400   | -1.978  | -0.207  | 16.701  | 10.971  | 3.464   |
| 1.040  | 21.969   | -1.721   | -0.376   | 2.081   | -2.734  | -0.230  | 19.050  | 11.915  | 4.372   |
| 1.530  | 21.688   | -1.300   | -0.265   | 0.823   | -2.735  | -0.208  | 18.687  | 12.633  | 5.063   |
| 2.010  | 21.817   | -1.211   | -0.300   | 2.343   | -4.528  | -0.920  | 21.976  | 14.880  | 6.552   |
| 2.510  | 21.646   | -1.366   | -0.291   | 1.538   | -5.081  | -0.152  | 23.661  | 15.340  | 7.486   |
| 3.010  | 23.081   | -1.011   | -0.176   | 1.366   | -4.519  | -0.589  | 25.161  | 15.288  | 7.917   |
| 3.530  | 23.391   | -1.472   | -0.212   | -0.274  | -5.795  | 0.972   | 22.422  | 15.145  | 9.123   |
| 4.080  | 23.526   | -1.825   | -0.006   | -1.955  | -5.798  | 1.208   | 25.001  | 14.106  | 9.506   |
| 4.560  | 25.420   | -1.617   | -0.287   | 0.359   | -8.929  | 0.338   | 33.475  | 17.215  | 11.333  |
| 5.000  | 26.495   | -1.146   | -0.465   | -3.302  | -10.380   | 0.494   | 31.397  | 19.727  | 13.465  |
| 5.520  | 26.975   | -1.335   | -0.205   | -1.564  | -11.386   | 0.331   | 34.869  | 19.724  | 13.864  |
| 6.000  | 27.968   | -1.181   | -0.472   | -1.560  | -8.588  | -0.297  | 29.938  | 18.403  | 12.409  |
| 6.530  | 28.496   | -1.219   | -0.281   | -2.773  | -11.448   | -0.533  | 32.251  | 20.725  | 14.637  |
| 7.060  | 29.114   | -1.012   | -0.367   | -3.971  | -8.942  | -0.086  | 31.290  | 19.603  | 12.292  |
| 7.550  | 30.082   | -0.931   | -0.344   | -2.374  | -9.374  | -1.176  | 32.592  | 20.226  | 13.091  |
| 8.000  | 30.130   | -0.637   | -0.636   | -6.741  | -10.808   | 0.516   | 38.691  | 20.371  | 12.834  |
| 8.500  | 31.103   | -0.642   | -0.310   | -5.108  | -9.902  | -0.214  | 33.916  | 20.529  | 13.479  |
| 9.000  | 31.645   | -0.514   | -0.391   | -6.096  | -10.303   | -0.939  | 37.133  | 19.892  | 12.245  |
| 9.500  | 32.104   | -0.621   | -0.447   | -6.926  | -10.197   | -0.642  | 34.588  | 22.210  | 13.762  |
| 10.000 | 33.231   | -0.377   | -0.521   | -5.463  | -7.435  | -1.475  | 31.243  | 21.020  | 11.684  |
| 10.500 | 33.925   | -0.562   | -0.765   | -4.230  | -6.564  | -0.793  | 30.192  | 18.912  | 10.778  |
| 11.000 | 33.565   | -0.229   | -0.703   | -2.742  | -7.728  | -0.725  | 27.926  | 21.567  | 10.927  |
| 11.500 | 34.244   | -0.133   | -0.822   | -0.469  | -7.184  | -1.076  | 29.970  | 21.973  | 10.519  |
| 12.000 | 34.782   | -0.139   | -0.644   | -5.761  | -5.322  | -1.726  | 31.772  | 20.274  | 11.432  |
| 13.000 | 36.116   | 0.251    | -1.024   | -6.065  | -5.704  | -0.730  | 28.243  | 18.942  | 11.217  |
| 14.000 | 36.461   | -0.035   | -0.865   | -4.591  | -4.459  | -0.879  | 26.425  | 20.101  | 10.528  |
| 15.000 | 36.714   | 0.504    | -0.824   | -2.796  | -4.824  | -1.331  | 24.401  | 17.988  | 9.853   |
| 16.000 | 37.702   | 0.682    | -1.005   | -3.293  | -4.210  | -0.856  | 33.776  | 22.812  | 9.957   |
| 17.000 | 38.498   | 0.278    | -0.899   | -2.529  | -4.009  | -0.859  | 20.732  | 16.431  | 8.002   |
| 18.000 | 39.659   | 1.011    | -1.074   | -2.155  | -4.315  | -0.321  | 21.473  | 17.681  | 7.796   |
| 19.000 | 39.817   | 0.544    | -0.470   | -0.626  | -2.825  | -1.824  | 21.055  | 17.339  | 6.604   |

ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u<br>(cm/s) | v<br>(cm/s) | w<br>(cm/s) | $\langle u'v' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$<br>(cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|--|--|
| 0.530  | 21.572      | -0.999      | -0.401      | 2.571  | -1.936   | -0.552   | 15.434   | 10.639   | 3.578  |
| 1.030  | 21.422      | -1.295      | -0.225      | 2.169  | -1.680   | -0.841   | 14.844   | 10.581   | 3.682  |
| 1.530  | 22.144      | -1.205      | -0.436      | 1.096  | -3.935   | -0.644   | 20.033   | 11.431   | 5.533  |
| 2.050  | 22.443      | -1.016      | -0.397      | 0.416  | -3.852   | -0.070   | 20.951   | 13.367   | 6.307  |
| 2.500  | 22.651      | -1.108      | -0.235      | 2.376  | -5.267   | -0.802   | 22.972   | 13.303   | 8.005  |
| 3.020  | 22.713      | -1.364      | -0.167      | 0.169  | -3.872   | -0.054   | 19.533   | 11.039   | 6.840  |
| 3.530  | 23.331      | -1.520      | -0.390      | 0.025  | -5.627   | 0.727  | 21.228   | 13.620   | 8.790  |
| 4.010  | 23.131      | -1.201      | -0.307      | -1.324   | -8.060   | 0.185  | 27.828   | 14.381   | 10.627   |
| 4.540  | 24.597      | -0.929      | -0.403      | -0.556   | -7.903   | -0.614   | 28.081   | 15.494   | 10.949   |
| 5.050  | 22.699      | -1.268      | -0.335      | -1.313   | -10.015  | 0.884  | 43.424   | 14.980   | 10.107   |
| 5.530  | 24.221      | -3.186      | -0.261      | -2.780   | -7.802   | 6.040  | 31.154   | 20.058   | 10.232   |
| 6.010  | 28.154      | -1.100      | -0.619      | -2.519   | -9.779   | -0.880   | 31.838   | 17.705   | 13.232   |
| 6.500  | 28.653      | -1.102      | -0.513      | -3.155   | -11.025  | -0.747   | 33.225   | 20.158   | 14.191   |
| 7.020  | 29.093      | -1.044      | -0.406      | -2.178   | -9.595   | -1.407   | 31.097   | 21.564   | 13.446   |
| 7.550  | 29.484      | -0.731      | -0.349      | -6.308   | -10.767  | 0.166  | 32.615   | 19.776   | 14.021   |
| 8.000  | 29.965      | -0.333      | -0.365      | -5.881   | -9.071   | -0.479   | 33.778   | 20.700   | 12.064   |
| 8.500  | 30.837      | -0.475      | -0.531      | -6.173   | -9.449   | -0.395   | 33.577   | 20.247   | 12.531   |
| 9.060  | 31.425      | -0.776      | -0.421      | -6.112   | -9.561   | -0.805   | 33.989   | 19.201   | 12.843   |
| 9.500  | 32.456      | -0.272      | -0.507      | -5.933   | -7.330   | -0.521   | 29.905   | 16.731   | 11.029   |
| 10.000 | 32.963      | -0.258      | -0.617      | -6.183   | -5.678   | -1.430   | 28.126   | 21.545   | 11.460   |
| 10.500 | 33.118      | -0.204      | -0.596      | -7.336   | -7.503   | -0.804   | 33.093   | 19.749   | 11.753   |
| 11.000 | 33.311      | 0.032       | -0.631      | -3.436   | -8.533   | -1.015   | 29.990   | 20.141   | 11.848   |
| 11.500 | 34.847      | -0.059      | -1.082      | -3.987   | -7.953   | -0.520   | 32.432   | 17.875   | 10.783   |
| 12.000 | 35.135      | -0.172      | -0.957      | -0.883   | -7.786   | -0.472   | 28.998   | 26.452   | 10.182   |
| 13.000 | 35.001      | 0.169       | -0.706      | -6.577   | -6.080   | -0.801   | 32.416   | 18.727   | 11.843   |
| 14.000 | 36.684      | 0.194       | -0.738      | -5.382   | -4.589   | -0.571   | 25.873   | 17.890   | 9.558  |
| 15.000 | 36.988      | 0.507       | -0.714      | -6.046   | -4.834   | -0.592   | 24.873   | 17.324   | 10.214   |
| 16.000 | 37.669      | 0.405       | -0.988      | -3.548   | -3.401   | -1.208   | 25.557   | 18.239   | 10.157   |
| 17.000 | 38.212      | 0.744       | -0.880      | -3.612   | -4.304   | -0.699   | 21.557   | 14.863   | 9.189  |
| 18.000 | 39.521      | 2.115       | -1.019      | -3.282   | -4.246   | -0.086   | 21.651   | 16.319   | 8.353  |
| 19.000 | 39.628      | 0.791       | -0.443      | -2.610   | -2.860   | -1.160   | 18.473   | 13.931   | 6.722  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 19.789   | -0.948   | -0.010   | 2.240   | -3.583  | -1.702   | 66.734  | 64.969  | 5.880   |
| 1.010  | 20.007   | -0.576   | 0.062    | 14.964  | -7.339  | -4.830   | 106.362   | 120.561   | 9.045   |
| 1.520  | 20.680   | -0.626   | 0.170    | -7.806  | -4.787  | 0.301  | 87.797  | 99.049  | 7.986   |
| 2.040  | 20.732   | -0.543   | 0.245    | -2.082  | -5.842  | -0.216   | 69.471  | 77.000  | 9.073   |
| 2.520  | 21.650   | -0.258   | 0.061    | -13.541   | -6.065  | 1.518  | 81.023  | 94.455  | 10.071  |
| 3.060  | 21.800   | -0.538   | 0.209    | -4.241  | -4.375  | -0.319   | 86.646  | 69.233  | 9.886   |
| 4.000  | 21.843   | -0.506   | 0.411    | -7.264  | -7.486  | 0.936  | 72.676  | 74.586  | 10.589  |
| 5.040  | 23.242   | -0.600   | 0.381    | 6.375   | -6.622  | -2.731   | 74.289  | 78.941  | 12.090  |
| 6.000  | 23.952   | 0.660    | 0.457    | -21.198   | -11.112   | 5.663  | 96.815  | 92.403  | 14.936  |
| 7.030  | 24.407   | -0.420   | 0.708    | 4.283   | -8.135  | -1.294   | 65.154  | 63.145  | 12.467  |
| 8.030  | 25.175   | -0.409   | 0.697    | -4.478  | -8.515  | 0.443  | 79.014  | 88.110  | 14.078  |
| 9.040  | 25.794   | -0.482   | 0.672    | -2.047  | -8.759  | -0.645   | 71.764  | 62.894  | 14.550  |
| 10.030 | 26.857   | 0.002    | 0.406    | 2.472   | -9.532  | -0.561   | 78.286  | 78.629  | 13.750  |
| 11.050 | 28.164   | -0.427   | 0.661    | -0.712  | -8.483  | -0.972   | 69.399  | 67.219  | 13.621  |
| 12.020 | 28.021   | -0.061   | 0.701    | 3.132   | -7.372  | -1.328   | 89.092  | 71.323  | 14.862  |
| 13.010 | 29.671   | 0.197    | 0.668    | 18.651  | 2.064   | -4.854   | 209.656   | 120.797   | 16.662  |
| 14.020 | 30.543   | 0.147    | 0.469    | 13.565  | -11.438   | -3.522   | 97.351  | 118.637   | 15.575  |
| 15.020 | 30.971   | -0.088   | 0.417    | 2.201   | -4.525  | -1.244   | 186.901   | 147.993   | 17.654  |
| 16.040 | 32.534   | 0.148    | 0.046    | 3.924   | -7.494  | -3.096   | 95.810  | 88.400  | 14.518  |
| 17.060 | 32.676   | 0.124    | -0.049   | 6.724   | -7.200  | -1.368   | 71.297  | 75.028  | 13.508  |
| 18.020 | 33.352   | 0.562    | -0.580   | 10.732  | -1.147  | -1.226   | 122.599   | 82.687  | 14.112  |
| 19.000 | 35.150   | 0.161    | -0.125   | 0.610   | -6.516  | -0.814   | 66.525  | 55.406  | 11.216  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.560  | 21.643   | -0.512   | -0.123   | -3.141  | -1.136  | -0.001   | 35.501  | 29.474  | 3.537   |
| 1.060  | 22.412   | -0.635   | 0.033    | -1.618  | -2.441  | -0.200   | 33.274  | 33.260  | 4.480   |
| 1.530  | 23.365   | -0.844   | 0.104    | 0.353   | -2.424  | -0.082   | 48.333  | 43.777  | 6.307   |
| 2.050  | 23.683   | -0.489   | 0.095    | 1.172   | -5.120  | -1.126   | 42.895  | 44.502  | 6.643   |
| 2.540  | 23.553   | -0.391   | 0.392    | -4.088  | -4.639  | 0.554  | 39.506  | 48.683  | 7.752   |
| 3.030  | 24.135   | -0.538   | 0.552    | -3.302  | -3.292  | -0.214   | 34.675  | 38.845  | 8.226   |
| 4.050  | 25.074   | -0.265   | 0.614    | -2.723  | -3.698  | -0.809   | 44.904  | 46.131  | 9.174   |
| 5.040  | 23.400   | -0.386   | 1.030    | 0.803   | -3.374  | 0.237  | 40.025  | 35.103  | 9.529   |
| 6.070  | 25.993   | -0.381   | 0.600    | -4.438  | -4.120  | 0.064  | 37.296  | 34.245  | 9.592   |
| 7.060  | 26.059   | -0.272   | 0.756    | 0.614   | -6.541  | -0.260   | 39.286  | 31.360  | 11.594  |
| 8.000  | 26.020   | -0.178   | 0.696    | 0.716   | -6.340  | -0.964   | 43.066  | 42.884  | 12.288  |
| 9.010  | 27.071   | -0.421   | 0.680    | -1.288  | -6.650  | 0.440  | 40.529  | 30.535  | 12.320  |
| 10.060 | 26.564   | -0.016   | 0.974    | -0.016  | -7.176  | 0.578  | 41.289  | 32.351  | 12.240  |
| 11.040 | 28.258   | -0.565   | 0.526    | -1.935  | -7.806  | 0.212  | 39.780  | 30.982  | 12.395  |
| 12.000 | 28.985   | -0.154   | 0.586    | 0.285   | -7.824  | -0.944   | 43.630  | 32.155  | 11.814  |
| 13.040 | 29.286   | 0.029    | 0.259    | -3.201  | 0.233   | 0.511  | 119.022   | 59.875  | 12.501  |
| 14.010 | 29.975   | -0.070   | 0.503    | 5.744   | -6.021  | -1.970   | 71.474  | 67.845  | 13.841  |
| 15.030 | 30.413   | 0.069    | 0.368    | -0.357  | -8.417  | -1.209   | 64.864  | 57.959  | 14.190  |
| 16.020 | 30.831   | -0.069   | 0.362    | -1.784  | -6.127  | -0.146   | 46.216  | 42.893  | 12.173  |
| 17.070 | 32.316   | 0.152    | 0.084    | -0.957  | -6.366  | -0.484   | 35.498  | 32.191  | 11.279  |
| 18.030 | 32.653   | -0.013   | -0.182   | 3.893   | -5.965  | -2.043   | 40.139  | 35.092  | 10.793  |
| 19.030 | 33.294   | 0.042    | -0.414   | -0.768  | -4.854  | -0.535   | 34.321  | 26.721  | 10.064  |

### Πείραμα (Experiment) 4

#### POSITION (POSITION) B

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.550  | 8.908    | -0.186   | 0.367    | 3.463   | -0.171  | -0.430  | 12.259  | 10.460  | 1.926   |
| 1.020  | 13.056   | 0.835    | 0.562    | 3.964   | -0.376  | -0.592  | 18.559  | 21.257  | 4.135   |
| 1.510  | 12.406   | 0.566    | 0.697    | 1.760   | -0.050  | 0.232   | 18.305  | 20.166  | 4.151   |
| 2.010  | 12.386   | 0.416    | 0.700    | 3.815   | -0.885  | -0.236  | 18.864  | 21.073  | 4.532   |
| 2.520  | 11.957   | -0.558   | 0.835    | 16.041  | -2.860  | -2.911  | 64.733  | 88.064  | 7.079   |
| 3.040  | 11.180   | 0.360    | 0.686    | 4.709   | 0.036   | 0.326   | 21.195  | 20.840  | 4.767   |
| 3.570  | 10.909   | 0.015    | 1.033    | 3.212   | 2.454   | 2.488   | 16.523  | 14.929  | 4.283   |
| 4.070  | 9.816    | 0.701    | 1.090    | 2.530   | 2.829   | 2.429   | 19.870  | 14.841  | 5.007   |
| 4.520  | 6.615    | 0.814    | 0.472    | 6.672   | -3.382  | -1.613  | 31.391  | 26.382  | 5.338   |
| 5.020  | 9.801    | 1.434    | 0.630    | 28.084  | -0.430  | -9.389  | 45.719  | 61.525  | 6.975   |
| 5.500  | 11.765   | 0.278    | 0.720    | 2.693   | -0.056  | 4.024   | 25.260  | 19.165  | 5.911   |
| 6.060  | 14.054   | 1.027    | 0.579    | 7.543   | -5.945  | -1.957  | 36.636  | 24.051  | 9.066   |
| 6.500  | 17.440   | 0.096    | 0.252    | 4.084   | -11.992   | 0.943   | 67.938  | 43.465  | 11.629  |
| 6.990  | 19.748   | 0.017    | 0.303    | 4.495   | -15.749   | -0.309  | 59.661  | 36.801  | 13.407  |
| 7.500  | 20.520   | -0.079   | 0.739    | 3.244   | -13.426   | -0.217  | 49.669  | 36.873  | 13.777  |
| 8.000  | 21.684   | -0.344   | 0.816    | -1.031  | -12.883   | 0.917   | 77.519  | 55.929  | 14.967  |
| 8.500  | 23.557   | 0.420    | 1.219    | 0.117   | -12.688   | 0.563   | 53.633  | 42.752  | 16.015  |
| 9.000  | 23.020   | 0.096    | 1.322    | -3.073  | -12.214   | 1.197   | 66.080  | 44.921  | 14.350  |
| 9.500  | 24.563   | -0.518   | 1.543    | 3.417   | -13.192   | -0.058  | 60.072  | 47.669  | 17.764  |
| 10.000 | 25.952   | -0.184   | 1.278    | 4.871   | -14.562   | -1.392  | 52.244  | 48.328  | 16.904  |
| 10.500 | 25.925   | -0.285   | 1.398    | 6.503   | -15.701   | -1.059  | 54.095  | 63.111  | 15.391  |
| 11.000 | 26.940   | -0.521   | 1.129    | -0.142  | -15.350   | -1.034  | 54.680  | 53.689  | 16.941  |
| 11.500 | 27.360   | -0.508   | 0.941    | 5.974   | -14.589   | -0.544  | 47.422  | 49.836  | 16.540  |
| 12.000 | 27.107   | -0.192   | 1.123    | -3.493  | -13.312   | 0.838   | 55.207  | 61.503  | 13.968  |
| 13.000 | 29.831   | -0.620   | 1.568    | 11.448  | -16.585   | -3.689  | 92.735  | 98.573  | 21.700  |
| 14.000 | 30.564   | -0.401   | 1.511    | 0.868   | -13.621   | -0.720  | 69.046  | 64.950  | 19.515  |
| 15.000 | 32.581   | -0.384   | 1.203    | 2.951   | -12.980   | -1.145  | 91.055  | 82.926  | 21.924  |
| 16.000 | 34.278   | -1.022   | 1.317    | 0.764   | -9.631  | -0.614  | 54.934  | 52.142  | 19.142  |
| 17.000 | 35.032   | -0.489   | 0.821    | 1.159   | -12.861   | 1.937   | 56.283  | 51.737  | 20.679  |
| 18.000 | 35.689   | -0.334   | 0.756    | 1.414   | -4.426  | -0.041  | 78.360  | 46.386  | 18.655  |
| 19.000 | 37.730   | -0.372   | 0.416    | 3.348   | 2.000   | -0.449  | 102.536   | 52.094  | 18.226  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.560  | 14.104   | 0.708    | 0.061    | 0.089   | -0.918  | -0.063   | 14.711  | 12.882  | 2.284   |
| 1.030  | 13.679   | -0.011   | 0.227    | 2.078   | -1.416  | -0.147   | 17.845  | 20.387  | 2.800   |
| 1.530  | 13.081   | 2.292    | 0.514    | -0.559  | -0.983  | 1.043  | 17.165  | 18.992  | 3.676   |
| 2.000  | 12.535   | -0.652   | 0.932    | 6.500   | 0.030   | -2.611   | 17.390  | 20.689  | 2.895   |
| 2.580  | 9.223    | 1.091    | 0.276    | 3.477   | 1.195   | -2.903   | 21.241  | 12.150  | 2.214   |
| 3.070  | 4.073    | 1.632    | -0.109   | 10.036  | 1.230   | -4.286   | 44.310  | 24.110  | 2.265   |
| 3.540  | 3.737    | 1.652    | 0.037    | 88.090  | -12.440   | -25.733  | 67.271  | 157.327   | 4.795   |
| 4.030  | 0.503    | 0.032    | 0.033    | -0.032  | -0.031  | 0.068  | 1.864   | 0.537   | 0.097   |
| 4.550  | 0.645    | 0.028    | 0.062    | -0.603  | 0.163   | 0.359  | 2.945   | 1.813   | 0.150   |
| 5.020  | 1.394    | 0.505    | 0.081    | -0.428  | 0.843   | 0.438  | 9.648   | 2.137   | 0.507   |
| 5.500  | 3.551    | 0.078    | 0.406    | -0.513  | 0.388   | 0.731  | 12.601  | 4.042   | 0.942   |
| 6.000  | 13.806   | -0.828   | 1.172    | -7.512  | -0.799  | 10.348   | 31.201  | 31.861  | 7.112   |
| 6.500  | 18.224   | -0.184   | 1.150    | -4.785  | -13.688   | 0.153  | 64.906  | 40.558  | 13.424  |
| 7.000  | 18.954   | -0.266   | 0.972    | -0.505  | -13.805   | -0.865   | 79.656  | 54.979  | 14.538  |
| 7.500  | 19.667   | -0.377   | 0.895    | 0.880   | -13.238   | -0.276   | 124.042   | 57.080  | 12.982  |
| 8.000  | 21.841   | -0.473   | 1.064    | -0.608  | -15.366   | -0.048   | 90.913  | 45.039  | 15.305  |
| 8.500  | 23.949   | -0.609   | 0.889    | -5.934  | -14.075   | -0.061   | 68.726  | 43.879  | 15.992  |
| 9.000  | 24.565   | -0.839   | 0.953    | -1.185  | -13.740   | -0.309   | 83.765  | 50.318  | 16.262  |
| 9.500  | 24.927   | -0.213   | 1.236    | 0.394   | -14.259   | -2.020   | 52.277  | 43.945  | 18.201  |
| 10.000 | 26.119   | -1.293   | 1.088    | -2.400  | -14.481   | -0.220   | 54.880  | 55.496  | 18.237  |
| 10.500 | 25.952   | -0.447   | 1.429    | -4.435  | -17.025   | 0.995  | 60.768  | 47.898  | 18.409  |
| 11.000 | 27.786   | -0.330   | 1.080    | 6.365   | -14.157   | -1.222   | 47.939  | 49.087  | 17.077  |
| 11.500 | 28.462   | -0.563   | 1.381    | -3.049  | -13.747   | -1.691   | 58.515  | 49.858  | 20.111  |
| 12.000 | 29.554   | -0.234   | 1.325    | -3.317  | -11.538   | -1.465   | 56.551  | 45.386  | 19.260  |
| 13.000 | 30.959   | -0.226   | 1.229    | -5.268  | -12.958   | -0.437   | 85.540  | 64.721  | 21.039  |
| 14.000 | 31.087   | -0.441   | 1.401    | 3.139   | -13.832   | -2.474   | 61.914  | 65.052  | 21.255  |
| 15.000 | 32.999   | -0.327   | 1.132    | 3.719   | -12.263   | -3.634   | 86.665  | 74.316  | 21.857  |
| 16.000 | 34.860   | -0.168   | 0.767    | -1.909  | -11.231   | -1.655   | 55.026  | 59.103  | 21.245  |
| 17.000 | 35.279   | 0.175    | 0.575    | -3.474  | -11.247   | -0.108   | 63.023  | 52.415  | 20.112  |
| 18.000 | 37.488   | -0.214   | 0.071    | -5.662  | -10.673   | -0.179   | 61.383  | 48.294  | 18.686  |
| 19.000 | 37.722   | 0.450    | 0.048    | -0.924  | -7.058  | -1.653   | 66.729  | 43.541  | 17.961  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.550  | 13.894   | -0.201   | 0.155    | -2.442  | -1.595  | 0.345   | 13.472  | 15.813  | 2.659   |
| 1.030  | 14.512   | -0.425   | 0.148    | -3.874  | -2.534  | 0.987   | 18.704  | 16.024  | 3.429   |
| 1.550  | 14.746   | -0.476   | 0.420    | -1.920  | -1.569  | 0.448   | 15.641  | 15.540  | 3.685   |
| 2.020  | 12.947   | -0.836   | 0.380    | -1.372  | 0.235   | 0.485   | 16.137  | 10.842  | 3.508   |
| 2.540  | 10.773   | 0.681    | 0.659    | 12.143  | 1.541   | -2.633  | 36.433  | 31.500  | 2.538   |
| 3.050  | 6.277    | 0.910    | 0.673    | -18.844   | -0.713  | 3.563   | 37.118  | 40.203  | 2.244   |
| 3.590  | 3.020    | 0.969    | 0.070    | 2.927   | 0.037   | -1.914  | 10.351  | 8.598   | 0.703   |
| 3.990  | 3.235    | 1.318    | 0.032    | 28.493  | -4.318  | -9.738  | 20.152  | 55.894  | 1.899   |
| 4.540  | 6.748    | 0.207    | 0.953    | 10.003  | 0.745   | -8.852  | 28.364  | 37.780  | 2.946   |
| 5.000  | 6.602    | 0.405    | 0.649    | -0.334  | 2.203   | -2.393  | 18.692  | 8.825   | 1.799   |
| 5.500  | 6.964    | 1.053    | -0.027   | 8.655   | -2.926  | -6.263  | 27.542  | 23.237  | 4.004   |
| 6.000  | 13.357   | -0.390   | 1.093    | 3.261   | -9.073  | -2.375  | 35.756  | 19.488  | 8.655   |
| 6.500  | 16.142   | -0.591   | 0.803    | -0.191  | -11.477   | -1.161  | 62.033  | 35.837  | 11.945  |
| 7.000  | 20.863   | -0.620   | 1.151    | -4.593  | -16.397   | 0.028   | 64.618  | 31.002  | 15.573  |
| 7.500  | 22.202   | -0.761   | 0.945    | 0.333   | -18.655   | -0.642  | 59.257  | 60.873  | 14.210  |
| 8.000  | 22.578   | -0.414   | 0.861    | 3.482   | -15.559   | -1.267  | 50.577  | 75.493  | 13.258  |
| 8.500  | 23.956   | -1.604   | 1.066    | 6.564   | -16.982   | -2.837  | 59.065  | 58.252  | 17.846  |
| 9.000  | 25.077   | -0.988   | 1.033    | -3.314  | -15.537   | 0.127   | 55.895  | 55.077  | 17.795  |
| 9.500  | 26.051   | -0.183   | 0.971    | 16.856  | -16.641   | -6.557  | 55.908  | 75.037  | 16.774  |
| 10.000 | 26.622   | -0.323   | 1.168    | 0.902   | -14.093   | -2.502  | 52.773  | 49.282  | 19.227  |
| 10.500 | 28.168   | -0.724   | 1.289    | -1.960  | -13.008   | -2.031  | 54.424  | 48.485  | 20.505  |
| 11.000 | 28.789   | -1.083   | 1.140    | 0.398   | -16.508   | -0.839  | 61.195  | 54.450  | 21.859  |
| 11.500 | 28.276   | -0.987   | 0.752    | 7.417   | -14.692   | -1.228  | 49.064  | 77.200  | 16.412  |
| 12.000 | 28.953   | -0.603   | 0.539    | 8.016   | -16.402   | -0.135  | 53.840  | 79.206  | 15.342  |
| 13.000 | 31.272   | -0.733   | 1.313    | -3.825  | -15.870   | -1.088  | 81.828  | 65.770  | 23.133  |
| 14.000 | 31.677   | -0.494   | 1.177    | -4.011  | -10.660   | 0.071   | 85.809  | 56.953  | 21.963  |
| 15.000 | 33.449   | -0.229   | 0.820    | 4.238   | -11.031   | -1.625  | 83.102  | 70.403  | 18.692  |
| 16.000 | 34.610   | -0.338   | 0.787    | 0.186   | -13.534   | -1.083  | 61.163  | 53.119  | 20.296  |
| 17.000 | 36.016   | 0.595    | 0.340    | 1.380   | -12.242   | -2.419  | 55.975  | 48.934  | 20.556  |
| 18.000 | 36.945   | 0.503    | 0.145    | 1.574   | -11.685   | -0.488  | 54.893  | 44.056  | 18.408  |
| 19.000 | 38.303   | 0.588    | 0.294    | 1.049   | -8.940  | -3.032  | 67.268  | 43.078  | 16.036  |



ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.560  | 12.681   | -3.240   | 0.690    | 1.192   | 1.148   | 2.363   | 13.913  | 15.317  | 1.311   |
| 1.040  | 12.368   | -3.969   | 0.691    | 0.590   | 1.849   | 3.771   | 18.184  | 19.493  | 1.495   |
| 1.580  | 11.811   | -2.705   | 0.701    | 0.944   | 2.411   | 4.757   | 16.651  | 20.590  | 1.481   |
| 2.010  | 9.676    | -1.564   | 0.905    | -1.072  | 2.456   | 3.843   | 21.313  | 16.498  | 1.372   |
| 2.550  | 6.264    | -1.567   | 0.406    | -8.927  | 0.964   | 4.601   | 30.095  | 26.094  | 1.807   |
| 3.060  | 4.128    | -0.390   | -0.015   | 4.559   | -1.385  | -1.814  | 16.247  | 12.165  | 1.386   |
| 3.580  | 1.479    | -1.590   | 0.203    | 28.541  | -5.903  | -7.547  | 28.474  | 66.242  | 2.087   |
| 4.070  | 1.587    | 0.195    | 0.079    | 16.563  | -1.954  | -4.998  | 16.092  | 31.044  | 1.103   |
| 4.580  | 0.333    | 0.020    | 0.026    | 0.095   | 0.061   | -0.045  | 0.979   | 0.298   | 0.052   |
| 5.080  | 0.591    | -0.092   | 0.054    | -0.024  | 0.225   | 0.073   | 1.844   | 0.364   | 0.074   |
| 5.580  | 2.177    | -0.375   | 0.195    | 0.149   | 1.327   | 0.633   | 9.923   | 2.350   | 0.412   |
| 6.000  | 3.566    | 0.003    | 0.366    | -0.297  | 0.301   | -0.391  | 19.167  | 4.663   | 1.441   |
| 6.500  | 15.360   | -0.758   | 1.240    | -1.673  | -3.901  | 2.829   | 43.023  | 30.938  | 8.428   |
| 7.000  | 19.374   | -0.372   | 1.382    | -2.331  | -11.663   | 1.671   | 44.926  | 40.458  | 13.255  |
| 7.500  | 21.702   | -0.391   | 1.114    | -0.870  | -14.593   | -0.298  | 51.295  | 59.882  | 13.491  |
| 8.000  | 22.603   | -0.642   | 1.160    | -1.755  | -14.345   | 0.838   | 51.278  | 55.715  | 13.311  |
| 8.500  | 23.142   | -0.701   | 1.045    | 4.385   | -13.576   | 0.119   | 47.901  | 80.041  | 14.444  |
| 9.000  | 23.268   | -0.930   | 1.083    | -1.773  | -13.770   | 0.552   | 48.250  | 49.018  | 15.797  |
| 9.500  | 24.838   | -0.449   | 1.471    | -11.232   | -16.946   | 2.239   | 71.067  | 76.053  | 18.448  |
| 10.000 | 26.297   | -1.015   | 1.199    | -14.106   | -16.469   | 2.476   | 71.873  | 86.888  | 20.536  |
| 10.500 | 27.083   | -1.000   | 1.311    | -9.837  | -15.487   | 1.444   | 69.729  | 68.062  | 19.484  |
| 11.000 | 27.502   | -0.249   | 1.108    | 2.583   | -15.070   | 0.614   | 50.924  | 49.270  | 16.519  |
| 11.500 | 28.026   | -0.905   | 1.397    | 4.025   | -18.065   | -3.948  | 66.831  | 77.623  | 20.101  |
| 12.000 | 28.432   | -0.585   | 0.974    | 6.594   | -15.074   | -0.354  | 54.489  | 63.600  | 14.732  |
| 13.000 | 30.075   | -0.066   | 0.428    | 11.971  | -18.906   | -1.082  | 57.413  | 92.476  | 14.273  |
| 14.000 | 32.162   | -0.329   | 1.305    | -2.948  | -11.969   | -0.938  | 78.483  | 61.350  | 20.866  |
| 15.000 | 32.819   | 0.136    | 0.879    | -5.110  | -14.206   | -1.118  | 78.996  | 60.401  | 22.919  |
| 16.000 | 35.168   | -0.168   | 0.876    | -2.956  | -15.319   | -1.467  | 64.513  | 60.407  | 21.197  |
| 17.000 | 36.206   | 0.213    | 0.454    | -3.899  | -11.769   | -1.423  | 50.219  | 35.931  | 19.616  |
| 18.000 | 37.205   | -0.055   | 0.164    | -9.581  | -11.140   | -0.059  | 52.517  | 44.327  | 17.110  |
| 19.000 | 38.036   | 0.124    | 0.296    | -20.432   | -12.938   | 2.765   | 59.866  | 77.992  | 18.521  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.570  | 12.605   | -0.487   | 0.441    | 0.561   | -0.614  | 0.223   | 19.696  | 24.661  | 3.867   |
| 1.080  | 12.198   | -0.859   | 0.503    | 0.954   | -0.412  | -0.336  | 13.346  | 20.118  | 4.641   |
| 1.520  | 12.324   | -0.603   | 0.500    | 0.014   | -0.733  | 0.146   | 16.450  | 21.018  | 4.904   |
| 2.080  | 11.864   | -0.150   | 0.308    | 0.976   | -1.625  | -0.455  | 15.434  | 21.147  | 5.279   |
| 2.510  | 12.047   | -0.365   | 0.561    | 1.031   | -0.975  | 0.274   | 17.460  | 20.369  | 5.300   |
| 3.070  | 10.186   | -0.352   | 0.570    | -0.799  | 0.836   | 1.158   | 17.549  | 17.702  | 3.631   |
| 3.550  | 10.719   | -0.400   | 0.890    | -2.736  | 4.350   | 2.420   | 34.549  | 18.822  | 3.677   |
| 4.040  | 10.493   | 0.124    | 1.105    | 0.656   | 3.568   | -0.981  | 22.832  | 15.492  | 4.846   |
| 4.510  | 8.870    | 0.255    | 0.728    | 0.750   | -1.823  | 0.840   | 30.107  | 32.526  | 7.307   |
| 5.060  | 10.514   | -0.027   | 0.666    | -0.222  | -3.886  | 1.959   | 24.997  | 26.223  | 8.174   |
| 5.570  | 13.789   | -0.221   | 0.733    | -2.661  | -6.435  | 1.323   | 40.626  | 28.334  | 8.387   |
| 6.040  | 16.480   | 0.011    | 0.348    | -10.172   | -12.940   | 0.683   | 58.070  | 42.523  | 11.590  |
| 6.540  | 20.247   | -0.788   | 0.307    | -6.041  | -16.984   | 0.814   | 61.375  | 30.474  | 14.819  |
| 7.000  | 22.362   | -0.959   | 0.438    | -3.666  | -14.818   | 0.909   | 64.174  | 43.643  | 15.495  |
| 7.500  | 23.578   | -0.924   | 0.457    | -1.520  | -16.426   | -1.670  | 67.723  | 43.899  | 17.434  |
| 8.000  | 24.461   | -1.148   | 0.489    | -5.683  | -15.117   | -0.742  | 59.956  | 45.345  | 17.974  |
| 8.500  | 25.833   | -0.754   | 0.553    | -1.095  | -18.444   | -1.442  | 65.825  | 52.725  | 20.504  |
| 9.000  | 27.035   | -0.799   | 0.698    | -5.806  | -18.088   | -1.961  | 57.077  | 60.366  | 17.123  |
| 9.500  | 26.869   | -0.471   | 0.584    | -5.945  | -14.151   | -0.594  | 50.649  | 43.703  | 16.029  |
| 10.000 | 29.080   | -0.982   | 0.551    | -8.050  | -17.273   | -0.645  | 67.693  | 45.254  | 21.488  |
| 10.500 | 29.856   | -0.700   | 0.014    | 3.446   | -16.805   | -2.183  | 57.305  | 81.503  | 15.995  |
| 11.000 | 29.753   | -0.583   | 0.217    | 8.199   | -19.621   | -1.517  | 58.325  | 74.204  | 18.462  |
| 11.500 | 30.255   | -0.829   | 0.305    | 14.023  | -16.633   | -0.402  | 60.879  | 67.346  | 16.774  |
| 12.000 | 31.264   | -0.842   | 0.091    | 13.915  | -18.411   | -0.620  | 58.571  | 94.967  | 15.227  |
| 13.000 | 32.489   | 0.083    | 0.530    | 0.117   | -13.770   | -4.007  | 68.722  | 67.235  | 22.634  |
| 14.000 | 34.543   | -0.121   | 0.236    | -4.440  | -13.976   | -2.438  | 58.183  | 45.825  | 22.177  |
| 15.000 | 34.418   | 0.024    | 0.322    | -6.330  | -11.864   | -2.379  | 62.953  | 51.173  | 19.662  |
| 16.000 | 37.324   | -0.320   | -0.182   | -3.416  | -12.045   | -2.507  | 51.434  | 38.599  | 19.856  |
| 17.000 | 37.233   | 0.246    | 0.181    | 0.427   | -13.871   | -3.919  | 54.875  | 41.595  | 20.290  |
| 18.000 | 38.206   | 0.839    | -0.066   | -1.047  | -8.392  | -1.085  | 62.000  | 40.825  | 18.837  |
| 19.000 | 40.268   | 0.750    | -0.410   | -0.561  | -4.994  | -1.113  | 81.026  | 35.136  | 17.016  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.560  | 12.996   | -1.327   | 0.317    | 5.687   | 0.740   | -1.123  | 48.172  | 42.218  | 4.918   |
| 1.050  | 13.222   | -1.304   | 0.185    | 1.315   | -0.896  | -0.458  | 17.421  | 21.883  | 3.984   |
| 1.540  | 12.939   | -0.757   | 0.495    | 3.836   | -0.857  | -1.394  | 18.667  | 27.013  | 4.643   |
| 2.040  | 12.319   | -0.188   | 0.154    | 1.635   | -1.497  | -0.947  | 18.062  | 18.598  | 5.358   |
| 2.550  | 13.493   | -0.190   | 0.249    | 1.376   | -0.667  | -1.342  | 16.612  | 22.019  | 5.726   |
| 3.040  | 11.606   | -0.534   | 0.625    | -0.726  | 0.106   | 0.831   | 15.890  | 18.241  | 4.847   |
| 3.530  | 8.792    | 0.148    | 0.267    | -0.033  | -0.456  | 0.247   | 21.616  | 15.710  | 4.290   |
| 4.010  | 5.715    | -0.646   | 0.147    | -0.172  | -3.662  | -0.053  | 25.510  | 28.176  | 3.957   |
| 4.540  | 7.993    | -0.524   | 0.630    | 0.925   | 3.464   | 2.154   | 34.021  | 17.884  | 4.203   |
| 5.020  | 6.030    | -1.196   | -0.176   | -20.498   | -10.869   | 8.495   | 45.056  | 42.774  | 6.372   |
| 5.580  | 13.311   | -0.349   | 0.268    | -3.706  | -15.067   | 2.213   | 48.065  | 39.953  | 12.932  |
| 6.040  | 18.772   | -0.478   | 0.103    | -0.257  | -18.590   | -0.535  | 61.979  | 29.960  | 14.878  |
| 6.580  | 19.454   | -0.372   | 0.570    | -3.273  | -15.772   | 0.398   | 56.160  | 28.852  | 14.189  |
| 7.000  | 21.826   | -0.902   | 0.658    | -6.523  | -18.099   | -0.324  | 63.369  | 38.711  | 16.685  |
| 7.500  | 23.298   | -0.513   | 0.636    | -3.112  | -16.615   | -0.322  | 63.713  | 44.187  | 17.905  |
| 8.000  | 25.154   | -0.612   | 0.687    | -2.611  | -17.941   | -0.395  | 63.934  | 42.698  | 18.575  |
| 8.500  | 25.793   | -1.090   | 0.760    | -3.414  | -15.568   | -0.501  | 58.594  | 44.162  | 19.591  |
| 9.000  | 27.282   | -0.755   | 0.381    | -3.056  | -14.741   | -0.804  | 55.736  | 43.883  | 20.544  |
| 9.500  | 27.514   | -1.089   | 0.611    | -9.441  | -16.369   | 0.027   | 65.000  | 44.794  | 21.574  |
| 10.000 | 28.367   | -0.204   | 0.392    | -3.814  | -16.848   | -0.135  | 58.986  | 76.200  | 16.332  |
| 10.500 | 29.677   | -0.726   | 0.977    | -5.114  | -18.639   | -1.138  | 66.061  | 46.982  | 21.125  |
| 11.000 | 30.439   | -0.567   | 0.706    | -9.366  | -17.575   | -0.074  | 64.516  | 51.329  | 22.268  |
| 11.500 | 31.614   | -0.457   | 0.539    | -4.313  | -14.269   | -0.718  | 58.625  | 43.294  | 21.003  |
| 12.000 | 30.769   | -0.334   | 0.091    | 5.967   | -17.389   | -0.049  | 56.937  | 91.874  | 14.273  |
| 13.000 | 32.809   | -0.282   | 0.636    | -3.091  | -15.269   | -2.803  | 67.510  | 55.495  | 24.123  |
| 14.000 | 34.466   | -0.027   | 0.603    | -5.661  | -12.379   | -2.873  | 65.895  | 50.177  | 20.164  |
| 15.000 | 35.323   | -0.106   | 0.340    | -3.761  | -11.632   | -3.495  | 68.645  | 56.116  | 20.154  |
| 16.000 | 36.564   | 0.497    | -0.013   | -5.431  | -9.510  | -1.200  | 50.139  | 38.201  | 21.301  |
| 17.000 | 37.880   | 1.053    | -0.177   | -4.695  | -12.095   | -1.410  | 56.517  | 41.168  | 20.386  |
| 18.000 | 38.318   | 0.478    | -0.011   | -3.308  | -9.809  | -1.343  | 47.088  | 35.335  | 16.753  |
| 19.000 | 38.633   | 0.844    | 0.168    | -3.553  | -10.957   | -1.593  | 52.202  | 34.694  | 16.904  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.560  | 11.455   | -0.490   | 0.315    | 1.119   | 0.182   | -0.022  | 14.486  | 17.045  | 2.682   |
| 1.080  | 13.199   | -0.681   | 0.371    | -0.281  | -0.130  | -0.057  | 13.456  | 17.588  | 3.788   |
| 1.520  | 13.067   | -0.738   | 0.456    | -0.343  | -0.656  | 0.850   | 29.545  | 34.806  | 4.719   |
| 2.050  | 12.412   | -0.525   | 0.396    | -0.480  | -1.854  | 0.681   | 23.938  | 32.853  | 5.085   |
| 2.540  | 12.071   | -0.274   | 0.377    | 0.880   | -1.422  | -0.713  | 19.281  | 24.967  | 5.089   |
| 3.010  | 12.690   | -0.256   | 0.514    | 2.016   | -0.453  | -0.172  | 23.432  | 27.704  | 5.550   |
| 3.580  | 11.958   | 0.191    | 0.715    | -1.898  | 0.246   | 1.215   | 28.940  | 28.873  | 5.371   |
| 4.000  | 10.982   | -0.351   | 0.873    | -1.509  | 1.855   | 3.698   | 25.768  | 23.633  | 5.255   |
| 4.500  | 11.768   | 0.407    | 0.749    | -2.707  | -1.886  | 1.675   | 30.927  | 40.116  | 8.890   |
| 5.000  | 13.273   | 0.227    | 0.873    | 0.252   | -5.723  | 0.664   | 34.613  | 42.768  | 11.514  |
| 5.540  | 15.817   | -0.133   | 0.268    | -3.189  | -12.496   | 1.819   | 43.737  | 29.636  | 13.344  |
| 6.060  | 17.613   | -0.469   | 0.301    | -2.164  | -14.006   | 0.592   | 53.653  | 34.442  | 12.271  |
| 6.520  | 19.309   | -0.645   | 0.319    | -2.129  | -17.131   | -0.258  | 64.960  | 34.662  | 15.670  |
| 7.030  | 22.081   | -0.809   | 0.411    | -2.408  | -17.011   | -0.681  | 61.742  | 40.812  | 16.381  |
| 7.510  | 23.884   | -1.142   | 0.436    | -4.200  | -15.191   | -0.885  | 67.032  | 47.801  | 15.628  |
| 8.000  | 24.721   | -0.869   | 0.575    | -5.292  | -16.046   | -2.121  | 64.419  | 37.989  | 18.407  |
| 8.500  | 26.306   | -1.024   | 0.321    | -7.082  | -15.233   | 0.399   | 60.516  | 42.563  | 19.027  |
| 9.000  | 26.588   | -0.867   | 0.548    | -6.996  | -17.754   | 0.811   | 60.052  | 62.811  | 16.455  |
| 9.500  | 28.146   | -0.554   | 0.342    | -8.988  | -16.251   | 0.024   | 62.242  | 47.313  | 19.840  |
| 10.000 | 27.816   | -0.666   | 0.677    | -6.586  | -17.881   | -0.924  | 65.223  | 40.626  | 21.798  |
| 10.500 | 28.543   | -0.520   | 0.304    | 5.924   | -17.814   | -0.560  | 53.467  | 78.642  | 18.400  |
| 11.000 | 29.995   | -0.731   | 0.387    | -5.533  | -14.937   | -0.982  | 69.301  | 42.315  | 21.729  |
| 11.500 | 30.634   | -0.643   | 0.248    | 1.148   | -15.675   | -0.343  | 49.025  | 73.272  | 17.251  |
| 12.000 | 31.353   | -0.660   | 0.488    | -6.837  | -16.970   | -2.204  | 70.416  | 62.877  | 23.308  |
| 13.000 | 32.969   | -0.269   | 0.426    | -1.640  | -16.084   | -2.552  | 70.391  | 59.570  | 24.045  |
| 14.000 | 34.796   | -0.488   | 0.257    | -7.769  | -15.665   | -1.325  | 64.478  | 50.269  | 23.115  |
| 15.000 | 36.683   | -0.351   | -0.276   | -2.308  | -13.534   | -3.745  | 69.288  | 52.292  | 22.491  |
| 16.000 | 37.016   | 0.283    | -0.124   | -2.009  | -12.688   | -2.471  | 52.412  | 38.225  | 21.200  |
| 17.000 | 37.939   | 0.384    | -0.052   | -2.689  | -11.610   | -3.646  | 51.502  | 38.933  | 19.534  |
| 18.000 | 39.351   | 0.178    | -0.473   | -7.627  | -6.947  | 0.031   | 49.460  | 34.266  | 15.846  |
| 19.000 | 40.130   | 0.434    | -0.553   | -5.410  | -7.328  | -1.672  | 56.101  | 34.108  | 16.083  |

ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 15.305   | -0.103   | 0.027    | -0.213  | -4.894  | 0.951   | 73.573  | 80.757  | 7.755   |
| 1.020  | 15.592   | 0.307    | 0.002    | 2.542   | -4.553  | -1.290  | 64.086  | 73.043  | 8.397   |
| 1.540  | 17.164   | -0.580   | -0.131   | -5.001  | -8.665  | 1.746   | 124.490   | 153.382   | 15.338  |
| 2.030  | 17.165   | -0.315   | 0.404    | -1.638  | -6.508  | -1.006  | 40.671  | 36.173  | 10.898  |
| 2.490  | 17.153   | -0.032   | 0.496    | 13.226  | -8.804  | -3.456  | 84.243  | 86.378  | 14.248  |
| 3.040  | 18.590   | 0.023    | 0.191    | -4.169  | -10.395   | 0.488   | 61.843  | 74.315  | 14.257  |
| 4.040  | 19.117   | -0.375   | 0.426    | 5.997   | -12.345   | -0.750  | 91.478  | 101.265   | 17.994  |
| 5.030  | 19.061   | 0.127    | 0.914    | 7.536   | -10.692   | -2.685  | 78.675  | 79.241  | 17.601  |
| 6.040  | 21.649   | -0.288   | 0.591    | 0.583   | -13.666   | 0.831   | 52.084  | 48.436  | 19.071  |
| 7.000  | 21.517   | 0.076    | 0.947    | 2.725   | -9.346  | 0.204   | 52.485  | 44.430  | 15.969  |
| 8.010  | 23.080   | -0.128   | 0.583    | -1.348  | -14.181   | 1.594   | 83.037  | 75.064  | 19.738  |
| 9.040  | 23.012   | -0.040   | 1.050    | 3.324   | -14.459   | 1.539   | 79.066  | 68.902  | 22.483  |
| 10.020 | 25.114   | 0.111    | 0.688    | 4.794   | -13.468   | -1.066  | 78.996  | 68.052  | 20.972  |
| 11.040 | 25.981   | -0.638   | 1.150    | -1.753  | -16.036   | -1.297  | 88.067  | 65.512  | 22.858  |
| 12.070 | 27.603   | 0.236    | 0.648    | 5.554   | -13.628   | -2.263  | 75.932  | 74.049  | 20.526  |
| 13.050 | 28.440   | -0.049   | 0.854    | 2.009   | -9.543  | -0.791  | 102.285   | 88.142  | 21.999  |
| 14.040 | 29.896   | -0.042   | 0.606    | 4.734   | -13.788   | -0.912  | 77.981  | 86.489  | 22.874  |
| 15.020 | 31.138   | 0.114    | 0.532    | -2.188  | -8.651  | -1.455  | 113.633   | 88.690  | 24.105  |
| 16.070 | 31.920   | -0.236   | 0.304    | 0.691   | -11.773   | -0.663  | 69.036  | 66.779  | 19.701  |
| 17.040 | 32.401   | -0.170   | 0.517    | -2.876  | -10.192   | 1.020   | 70.572  | 59.076  | 19.113  |
| 18.040 | 34.012   | 0.255    | -0.014   | 1.750   | -8.560  | -0.936  | 75.032  | 62.032  | 18.509  |
| 19.090 | 34.333   | -0.149   | 0.296    | 1.287   | -8.116  | -1.124  | 66.681  | 55.342  | 16.497  |

ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.510  | 17.323   | -0.247   | 0.271    | 0.618   | -0.878  | 0.823   | 28.927  | 32.811  | 3.691   |
| 1.050  | 21.344   | 0.281    | 0.185    | 0.800   | -1.586  | -0.820  | 47.502  | 48.770  | 6.888   |
| 1.540  | 21.631   | -0.335   | 0.109    | 0.864   | -4.053  | -0.089  | 67.304  | 69.478  | 9.172   |
| 2.050  | 21.928   | -0.225   | 0.572    | -0.168  | -3.275  | 0.051   | 70.739  | 74.692  | 12.038  |
| 2.570  | 22.326   | -0.425   | 0.525    | 2.726   | -2.660  | 0.743   | 56.198  | 65.132  | 11.644  |
| 3.070  | 22.790   | -0.061   | 0.656    | 2.817   | -4.053  | -0.607  | 75.519  | 78.001  | 13.865  |
| 4.000  | 22.615   | 0.010    | 1.083    | -2.136  | -2.355  | -0.452  | 93.114  | 91.147  | 15.559  |
| 5.010  | 23.310   | -0.454   | 1.167    | 4.908   | -6.644  | -1.509  | 57.824  | 58.162  | 15.717  |
| 6.030  | 23.724   | -0.042   | 1.542    | -1.876  | -8.320  | 2.044   | 56.136  | 65.655  | 15.773  |
| 7.060  | 24.848   | -0.395   | 1.101    | 6.452   | -8.605  | -1.243  | 56.193  | 64.595  | 17.550  |
| 8.020  | 24.488   | -0.311   | 1.701    | -1.781  | -8.022  | 0.657   | 70.265  | 76.416  | 18.603  |
| 9.040  | 24.825   | -0.129   | 1.383    | 0.857   | -8.145  | 0.013   | 66.064  | 65.449  | 18.945  |
| 10.040 | 25.357   | 0.256    | 1.468    | 3.757   | -9.377  | -0.028  | 69.206  | 66.696  | 19.526  |
| 11.040 | 26.011   | -0.488   | 1.127    | 3.305   | -11.151   | 0.001   | 71.749  | 65.840  | 21.866  |
| 12.020 | 26.369   | -0.705   | 1.154    | -0.725  | -9.365  | 0.025   | 67.868  | 57.956  | 20.922  |
| 13.000 | 27.126   | -0.178   | 1.009    | 5.268   | -1.238  | -0.190  | 158.589   | 92.406  | 20.729  |
| 14.010 | 28.144   | -0.252   | 0.959    | 1.019   | -12.308   | -1.143  | 84.191  | 67.775  | 20.257  |
| 15.020 | 28.763   | 0.156    | 0.532    | -2.739  | -11.699   | -0.727  | 120.508   | 120.880   | 19.645  |
| 16.040 | 29.793   | -0.325   | 0.406    | 1.696   | -11.018   | -0.828  | 65.858  | 57.179  | 20.466  |
| 17.030 | 30.717   | 0.336    | 0.479    | 2.285   | -10.851   | -0.461  | 65.896  | 54.883  | 17.349  |
| 18.030 | 31.841   | 0.001    | 0.058    | 0.407   | -8.741  | -0.721  | 64.617  | 51.935  | 15.976  |
| 19.080 | 32.345   | -0.432   | -0.023   | -0.784  | -9.156  | 0.163   | 68.773  | 50.837  | 16.623  |

## Πείραμα (Experiment) 5

### ΘΕΣΗ (POSITION) B

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 13.826   | 0.039    | 0.997    | 2.227   | 0.246   | -0.160   | 11.382  | 17.916  | 3.274   |
| 1.040  | 13.231   | 0.381    | 1.045    | 2.659   | -0.207  | -0.662   | 12.453  | 18.361  | 3.935   |
| 1.500  | 13.380   | 0.178    | 0.976    | 2.519   | 0.290   | -0.022   | 15.561  | 19.389  | 4.853   |
| 2.030  | 13.255   | -0.015   | 0.980    | 2.288   | 0.201   | 0.544  | 15.977  | 21.543  | 5.371   |
| 2.530  | 12.640   | 0.012    | 1.014    | 2.777   | 0.934   | 0.341  | 17.770  | 21.789  | 5.583   |
| 3.020  | 12.035   | 0.070    | 0.982    | 2.962   | 0.923   | 0.037  | 18.102  | 22.699  | 6.718   |
| 3.530  | 9.839    | -0.025   | 0.994    | 3.203   | 1.167   | 0.837  | 19.903  | 27.365  | 8.002   |
| 4.030  | 10.273   | -0.131   | 0.912    | 4.813   | 3.986   | 0.532  | 21.507  | 25.326  | 9.840   |
| 4.530  | 9.311    | 0.159    | 0.944    | 5.980   | 5.478   | 1.022  | 27.980  | 28.574  | 10.491  |
| 5.050  | 9.050    | 0.477    | 0.433    | 4.381   | 3.234   | 3.746  | 19.772  | 29.347  | 12.355  |
| 5.540  | 8.714    | -1.812   | 0.029    | 6.626   | 1.246   | 1.975  | 23.462  | 31.364  | 11.512  |
| 6.020  | 9.643    | -0.311   | 0.133    | 4.732   | 3.511   | 6.689  | 20.040  | 27.282  | 9.480   |
| 6.540  | 8.811    | -0.025   | -0.816   | 1.365   | -9.611  | 2.278  | 32.478  | 30.896  | 8.475   |
| 7.000  | 14.146   | 0.137    | -0.817   | 2.576   | -16.691   | 0.170  | 43.369  | 31.055  | 11.831  |
| 7.500  | 17.163   | -0.015   | -0.308   | -0.276  | -9.523  | 1.289  | 32.027  | 28.415  | 9.350   |
| 8.000  | 19.107   | -0.281   | 0.089    | 1.389   | -8.594  | 1.119  | 32.057  | 24.101  | 8.862   |
| 8.520  | 21.214   | -0.324   | 0.442    | 0.090   | -7.909  | -0.116   | 29.819  | 22.162  | 8.536   |
| 9.030  | 21.412   | -0.169   | 0.948    | 0.243   | -6.172  | -0.240   | 26.337  | 19.755  | 7.988   |
| 9.500  | 22.416   | -0.046   | 0.988    | 0.154   | -6.975  | -0.268   | 25.106  | 19.365  | 8.346   |
| 10.000 | 23.349   | 0.000    | 1.260    | 0.504   | -6.784  | 0.271  | 24.891  | 18.306  | 9.260   |
| 10.500 | 23.817   | 0.009    | 1.363    | 0.340   | -6.602  | -0.161   | 23.881  | 18.528  | 8.626   |
| 11.000 | 24.765   | -0.017   | 1.365    | 2.081   | -6.386  | -0.264   | 24.627  | 18.076  | 9.891   |
| 11.500 | 25.128   | -0.017   | 1.387    | 0.587   | -5.474  | -0.296   | 25.592  | 17.259  | 9.743   |
| 12.000 | 26.229   | -0.077   | 1.504    | -0.138  | -6.597  | 0.286  | 25.212  | 19.675  | 10.030  |
| 13.000 | 27.466   | -0.088   | 1.624    | -1.190  | -7.409  | -0.084   | 26.333  | 19.878  | 11.407  |
| 14.000 | 28.431   | -0.087   | 1.480    | 1.230   | -6.528  | 0.266  | 25.057  | 21.650  | 10.627  |
| 15.000 | 29.513   | 0.131    | 1.372    | 2.272   | -5.671  | -0.438   | 24.439  | 18.827  | 10.696  |
| 16.000 | 30.657   | -0.204   | 1.062    | -0.086  | -5.132  | 0.025  | 24.268  | 20.240  | 10.285  |
| 17.000 | 31.093   | 0.070    | 0.890    | 1.228   | -4.970  | -0.348   | 20.225  | 18.490  | 10.216  |
| 18.000 | 32.576   | -0.334   | 0.453    | 1.353   | -5.555  | -0.685   | 21.242  | 17.156  | 9.931   |
| 19.000 | 33.041   | -0.147   | 1.006    | 0.086   | -4.382  | 0.491  | 28.147  | 15.721  | 9.945   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 18.310   | -0.344   | -0.174   | -1.659  | -0.962  | 0.049   | 11.366  | 9.046   | 2.064   |
| 1.010  | 18.867   | -0.643   | -0.201   | -1.560  | -0.817  | -0.199  | 10.492  | 8.436   | 2.493   |
| 1.540  | 18.644   | -0.255   | -0.065   | -2.078  | -0.651  | -0.152  | 10.319  | 8.119   | 2.851   |
| 2.210  | 19.450   | -0.235   | -0.083   | -3.922  | -1.672  | -0.019  | 20.863  | 13.927  | 4.033   |
| 2.500  | 19.519   | -0.006   | 0.053    | -0.714  | -1.174  | -0.239  | 17.536  | 14.171  | 4.131   |
| 3.040  | 18.951   | 0.517    | 0.356    | -4.146  | -1.234  | 0.062   | 15.850  | 10.789  | 5.035   |
| 3.490  | 19.582   | 0.286    | 0.265    | -2.996  | -1.262  | 0.285   | 15.663  | 13.859  | 6.027   |
| 4.020  | 19.597   | 0.800    | 0.314    | -3.688  | -0.985  | -1.191  | 18.342  | 14.210  | 6.205   |
| 4.520  | 19.160   | 2.298    | 0.760    | -2.548  | -1.319  | -2.569  | 21.704  | 15.056  | 6.092   |
| 4.970  | 17.479   | 2.653    | 0.929    | -1.672  | 1.545   | -8.556  | 14.539  | 22.705  | 4.693   |
| 5.540  | 9.466    | 3.667    | 0.353    | 1.499   | 1.304   | -5.460  | 13.275  | 22.790  | 1.579   |
| 6.000  | 11.710   | 1.570    | 0.652    | 4.458   | 1.376   | -7.029  | 30.590  | 21.450  | 3.677   |
| 6.510  | 5.775    | -0.359   | -0.472   | -4.318  | -2.987  | 1.669   | 16.462  | 8.124   | 1.629   |
| 7.040  | 9.920    | -1.525   | 0.610    | -17.718   | -1.903  | 9.563   | 28.832  | 40.988  | 3.112   |
| 7.500  | 19.212   | -0.891   | 1.632    | -6.658  | -1.906  | 6.012   | 23.116  | 19.907  | 8.732   |
| 8.000  | 22.301   | -0.174   | 1.821    | -1.777  | -5.035  | -1.184  | 33.200  | 14.505  | 9.279   |
| 8.500  | 23.092   | -0.025   | 1.653    | -2.540  | -5.910  | -0.513  | 65.723  | 21.296  | 10.020  |
| 9.000  | 24.194   | -0.463   | 1.481    | -4.053  | -5.960  | -0.741  | 34.050  | 20.436  | 9.170   |
| 9.500  | 24.920   | -0.547   | 1.489    | -7.064  | -6.692  | -0.120  | 30.064  | 23.515  | 10.829  |
| 10.000 | 25.876   | -0.446   | 1.384    | -5.899  | -7.267  | -1.308  | 31.656  | 20.019  | 10.972  |
| 10.500 | 25.905   | -0.418   | 1.416    | -4.014  | -7.883  | -0.509  | 30.131  | 19.409  | 11.161  |
| 11.000 | 26.615   | -0.487   | 1.389    | -3.754  | -5.708  | -1.604  | 28.167  | 19.646  | 10.701  |
| 11.500 | 28.063   | -0.532   | 1.227    | -3.299  | -6.274  | -1.660  | 26.405  | 20.205  | 11.023  |
| 12.000 | 27.939   | -0.137   | 1.160    | -4.187  | -7.564  | -1.014  | 29.310  | 20.737  | 11.743  |
| 13.000 | 25.532   | -0.150   | 0.776    | 3.735   | 2.883   | 0.336   | 235.949   | 18.080  | 10.064  |
| 14.000 | 29.831   | 0.079    | 1.048    | -4.257  | -7.275  | -0.617  | 30.859  | 19.968  | 12.355  |
| 15.000 | 30.092   | 0.107    | 1.067    | -3.276  | -5.455  | -0.887  | 28.361  | 22.991  | 11.294  |
| 16.000 | 31.448   | 0.341    | 0.704    | -2.064  | -4.550  | -1.065  | 29.064  | 22.504  | 11.177  |
| 17.000 | 31.774   | 0.628    | 0.506    | -2.897  | -5.243  | -0.345  | 23.036  | 18.749  | 11.140  |
| 18.000 | 32.419   | 0.543    | 0.249    | -1.352  | -4.751  | -0.042  | 23.702  | 17.350  | 10.458  |
| 19.000 | 33.730   | 0.872    | 0.581    | -0.974  | -5.330  | -0.545  | 22.633  | 15.138  | 9.663   |

ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 13.979   | -1.802   | 0.079    | -0.660  | -0.070  | -0.187  | 7.331   | 4.618   | 1.033   |
| 1.010  | 18.606   | -1.108   | 0.095    | -1.382  | -0.905  | -0.221  | 11.629  | 9.563   | 2.652   |
| 1.540  | 18.628   | -0.892   | 0.397    | -1.421  | -0.673  | 0.130   | 10.942  | 8.012   | 2.730   |
| 2.020  | 19.274   | -0.982   | 0.369    | -1.699  | -0.988  | 0.227   | 11.790  | 9.868   | 3.512   |
| 2.520  | 18.759   | -0.734   | 0.665    | -2.652  | -1.508  | 0.153   | 13.201  | 9.636   | 3.735   |
| 3.060  | 18.989   | -0.736   | 0.574    | -2.900  | -1.817  | 0.569   | 15.289  | 11.027  | 5.133   |
| 3.530  | 18.889   | -0.804   | 0.884    | -3.955  | -1.425  | 1.227   | 17.884  | 10.966  | 4.818   |
| 3.990  | 19.437   | -0.954   | 0.990    | -2.208  | -1.815  | 0.792   | 24.721  | 17.038  | 6.675   |
| 4.520  | 18.440   | -0.705   | 1.446    | -3.049  | -0.345  | 2.101   | 19.425  | 14.656  | 5.859   |
| 5.040  | 17.753   | -0.531   | 1.246    | -5.324  | 0.071   | -1.103  | 51.211  | 16.193  | 6.968   |
| 5.500  | 17.264   | -0.669   | 1.264    | -5.122  | -2.001  | 0.910   | 85.036  | 28.722  | 7.597   |
| 6.030  | 16.644   | -1.803   | 1.167    | -14.286   | 1.914   | 4.798   | 108.960   | 25.618  | 6.877   |
| 6.540  | 15.897   | -1.284   | 1.192    | -3.878  | 3.147   | 1.998   | 186.506   | 19.687  | 7.446   |
| 7.000  | 20.877   | -1.207   | 1.342    | -5.357  | -5.119  | 0.029   | 25.597  | 15.862  | 10.250  |
| 7.500  | 21.780   | -1.070   | 1.259    | -4.571  | -6.988  | -0.344  | 31.220  | 16.520  | 10.813  |
| 8.000  | 21.996   | -0.756   | 1.357    | -3.871  | -6.794  | -0.562  | 28.063  | 17.829  | 10.210  |
| 8.500  | 23.474   | -1.266   | 0.996    | -4.265  | -6.830  | -0.881  | 29.970  | 18.766  | 10.797  |
| 9.000  | 24.169   | -0.605   | 1.155    | -3.656  | -8.198  | -1.063  | 34.761  | 23.705  | 11.170  |
| 9.540  | 24.424   | -0.451   | 1.223    | -4.742  | -7.318  | -0.232  | 31.158  | 20.124  | 10.528  |
| 10.000 | 24.591   | -0.481   | 1.368    | -3.706  | -6.397  | -1.330  | 27.829  | 17.708  | 11.007  |
| 10.500 | 26.127   | -0.174   | 1.236    | -5.148  | -7.767  | -0.590  | 31.543  | 19.554  | 11.396  |
| 11.000 | 26.732   | -0.234   | 1.084    | -4.861  | -7.719  | -0.136  | 29.314  | 18.633  | 10.525  |
| 11.500 | 26.609   | 0.016    | 1.411    | -3.415  | -6.745  | -0.749  | 26.212  | 18.432  | 11.212  |
| 12.000 | 26.045   | -0.344   | 0.984    | 0.329   | -1.027  | 0.248   | 135.006   | 18.840  | 10.467  |
| 13.000 | 28.049   | 0.170    | 1.161    | -4.548  | -7.232  | -0.591  | 32.650  | 21.603  | 11.520  |
| 14.000 | 29.504   | 0.096    | 1.231    | -2.483  | -5.382  | -0.786  | 25.395  | 20.429  | 11.104  |
| 15.000 | 30.978   | 0.139    | 0.922    | -2.428  | -6.481  | -1.324  | 28.605  | 20.481  | 10.872  |
| 16.000 | 30.970   | 0.093    | 0.684    | -2.538  | -5.943  | -0.158  | 28.773  | 23.559  | 11.205  |
| 17.000 | 32.522   | 0.678    | 0.546    | -1.628  | -4.957  | -0.852  | 22.596  | 16.147  | 9.944   |
| 18.000 | 32.667   | 0.576    | 0.360    | -1.581  | -4.858  | -0.448  | 23.468  | 17.977  | 10.683  |
| 19.000 | 33.818   | 0.716    | 0.683    | -1.337  | -4.241  | -1.175  | 23.256  | 16.101  | 9.806   |



## ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.530  | 17.467   | -0.566   | 0.153    | -0.487  | -0.519  | -0.213  | 6.691   | 5.387   | 1.527   |
| 1.040  | 19.125   | -0.618   | 0.130    | -1.952  | -0.721  | -0.125  | 9.736   | 8.357   | 2.445   |
| 1.530  | 19.129   | -0.756   | 0.115    | -3.141  | -1.465  | -0.395  | 12.587  | 9.894   | 3.260   |
| 2.000  | 16.349   | -6.004   | 1.086    | 334.389   | -51.803   | -89.832   | 199.661   | 609.519   | 17.252  |
| 2.570  | 16.474   | -6.058   | 1.107    | 573.570   | -89.891   | -157.159  | 338.986   | 1028.712  | 29.160  |
| 3.030  | 17.345   | -5.123   | 1.118    | 9.565   | 3.080   | 6.417   | 20.481  | 35.478  | 2.372   |
| 3.510  | 18.324   | -4.140   | 0.928    | 29.788  | 0.136   | 2.520   | 33.371  | 72.755  | 3.785   |
| 4.030  | 18.845   | -2.581   | 1.050    | 5.582   | 2.289   | 5.958   | 21.840  | 30.261  | 4.045   |
| 4.540  | 19.795   | -0.412   | 0.757    | -3.831  | -1.690  | -1.079  | 18.019  | 14.367  | 6.766   |
| 5.020  | 18.922   | 0.053    | 0.848    | -2.429  | -3.281  | -1.897  | 20.247  | 11.791  | 8.382   |
| 5.500  | 11.865   | 1.226    | 0.439    | 4.248   | -4.312  | -5.790  | 25.253  | 15.335  | 5.316   |
| 6.020  | 11.456   | 1.096    | 0.211    | 10.693  | -3.548  | -8.203  | 21.404  | 25.207  | 4.263   |
| 6.550  | 5.144    | 1.279    | -0.164   | 9.124   | -5.248  | -3.719  | 25.960  | 13.575  | 2.357   |
| 7.040  | 15.685   | -1.350   | 0.623    | -7.375  | -6.868  | 2.899   | 24.837  | 15.126  | 6.992   |
| 7.490  | 21.569   | -2.201   | 1.591    | -5.282  | -0.135  | 8.162   | 19.811  | 23.242  | 6.948   |
| 8.040  | 23.194   | -0.381   | 1.392    | -6.853  | -5.600  | 1.435   | 28.134  | 15.046  | 9.448   |
| 8.500  | 23.508   | -0.468   | 1.435    | -3.928  | -6.435  | -0.808  | 28.783  | 15.882  | 9.436   |
| 9.020  | 24.009   | -0.493   | 1.490    | -5.848  | -7.299  | -1.038  | 28.619  | 16.313  | 11.330  |
| 9.500  | 24.756   | -0.367   | 1.152    | -3.715  | -5.949  | -1.605  | 25.280  | 16.803  | 9.530   |
| 10.000 | 25.727   | -0.541   | 1.168    | -3.958  | -6.728  | -1.506  | 28.248  | 17.525  | 10.244  |
| 10.500 | 26.104   | -0.284   | 1.420    | -4.543  | -7.327  | -0.345  | 28.476  | 17.985  | 10.520  |
| 11.000 | 26.428   | -0.338   | 1.428    | -4.192  | -7.763  | -0.654  | 24.871  | 17.790  | 11.729  |
| 11.500 | 26.876   | -0.150   | 1.475    | -3.204  | -5.805  | -0.102  | 25.954  | 19.038  | 9.991   |
| 12.000 | 27.354   | -0.431   | 1.490    | -2.776  | -7.317  | -1.067  | 29.322  | 16.592  | 9.908   |
| 13.000 | 27.791   | -0.035   | 1.470    | -5.262  | -6.866  | -0.029  | 28.437  | 17.466  | 11.392  |
| 14.000 | 29.331   | -0.087   | 1.249    | -6.345  | -6.847  | -0.192  | 27.578  | 19.168  | 11.174  |
| 15.000 | 29.355   | 0.104    | 1.137    | -3.229  | -5.395  | -0.883  | 24.338  | 18.297  | 12.627  |
| 16.000 | 31.224   | 0.201    | 0.756    | -4.011  | -6.293  | 0.260   | 24.432  | 16.038  | 10.524  |
| 17.000 | 31.807   | 0.170    | 0.848    | -2.755  | -5.119  | -0.805  | 22.214  | 15.673  | 10.511  |
| 18.000 | 32.265   | 0.476    | 0.650    | -0.795  | -5.123  | -0.584  | 20.383  | 14.188  | 9.389   |
| 19.000 | 33.520   | 0.715    | 0.359    | -2.065  | -6.017  | -0.642  | 21.983  | 13.864  | 10.414  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.500  | 19.532   | -1.494   | -0.235   | 1.624   | -1.369  | -0.361   | 12.233  | 9.675   | 2.581   |
| 1.020  | 19.873   | -1.591   | -0.227   | 0.847   | -1.594  | -0.588   | 12.489  | 9.095   | 3.286   |
| 1.540  | 19.950   | -1.346   | -0.128   | 1.672   | -1.424  | -0.365   | 11.216  | 8.495   | 3.219   |
| 2.020  | 20.114   | -1.554   | -0.044   | 1.709   | -1.962  | -0.722   | 13.217  | 9.243   | 4.093   |
| 2.540  | 20.838   | -1.097   | -0.119   | 1.322   | -2.597  | 0.138  | 13.738  | 10.157  | 5.065   |
| 3.040  | 20.934   | -1.224   | 0.042    | 0.147   | -2.424  | 0.040  | 14.481  | 12.148  | 5.585   |
| 3.500  | 20.529   | -2.947   | 0.164    | -0.437  | -1.921  | 2.132  | 17.230  | 14.113  | 5.153   |
| 4.020  | 20.419   | -0.685   | 0.370    | -0.130  | -2.453  | 0.636  | 16.139  | 11.776  | 6.275   |
| 4.540  | 16.933   | -1.558   | -0.321   | -0.004  | -8.275  | -0.080   | 25.870  | 12.213  | 7.298   |
| 5.020  | 15.149   | -1.247   | -0.729   | -0.475  | -10.924   | 0.278  | 39.859  | 14.134  | 7.260   |
| 5.520  | 11.719   | 0.051    | -0.688   | 4.976   | -9.091  | -2.824   | 34.447  | 11.796  | 4.949   |
| 6.020  | 18.530   | 2.694    | 0.676    | -0.598  | -0.865  | -2.789   | 17.890  | 11.867  | 5.254   |
| 6.510  | 23.248   | 0.366    | 0.846    | 1.438   | -3.374  | -3.625   | 24.174  | 16.307  | 8.970   |
| 7.000  | 25.299   | -1.022   | 0.564    | -3.904  | -7.701  | 0.711  | 26.059  | 16.450  | 11.635  |
| 7.490  | 25.348   | -1.015   | 0.623    | -2.930  | -6.847  | 0.416  | 29.697  | 16.808  | 10.555  |
| 8.040  | 26.060   | -0.807   | 0.633    | -4.965  | -7.846  | 0.430  | 29.631  | 17.390  | 10.991  |
| 8.500  | 26.299   | -0.710   | 1.003    | -4.622  | -9.062  | 0.320  | 31.041  | 17.786  | 13.357  |
| 9.020  | 27.457   | -0.464   | 0.611    | -7.024  | -8.636  | -0.112   | 33.457  | 18.502  | 13.130  |
| 9.500  | 28.093   | -0.636   | 0.463    | -7.001  | -8.373  | 0.050  | 34.473  | 18.857  | 12.264  |
| 10.000 | 28.973   | -0.545   | 0.488    | -7.275  | -7.090  | 0.019  | 31.655  | 18.949  | 11.789  |
| 10.500 | 29.036   | -0.508   | 0.697    | -7.572  | -7.770  | 0.573  | 34.549  | 21.163  | 11.960  |
| 11.000 | 29.413   | -0.397   | 0.560    | -7.718  | -8.964  | -0.249   | 34.613  | 20.368  | 13.032  |
| 11.500 | 29.309   | -0.434   | 0.890    | -5.332  | -6.585  | -0.790   | 31.280  | 20.456  | 11.611  |
| 12.000 | 26.049   | -0.223   | -0.053   | 1.114   | 0.582   | 0.297  | 282.882   | 24.596  | 10.903  |
| 13.000 | 30.593   | -0.108   | 0.525    | -4.990  | -7.547  | -1.942   | 31.750  | 20.333  | 13.749  |
| 14.000 | 32.188   | -0.096   | 0.348    | -5.542  | -6.011  | -1.498   | 27.564  | 20.098  | 11.908  |
| 15.000 | 32.613   | 0.370    | 0.201    | -4.803  | -4.853  | -0.377   | 29.519  | 20.516  | 11.089  |
| 16.000 | 33.060   | 0.540    | 0.085    | -4.109  | -4.418  | -1.012   | 23.511  | 20.725  | 11.491  |
| 17.000 | 33.614   | 0.836    | 0.197    | -2.671  | -4.541  | -1.242   | 24.675  | 15.392  | 11.036  |
| 18.000 | 33.978   | 0.683    | -0.214   | -2.089  | -4.695  | -1.542   | 22.938  | 18.026  | 10.338  |
| 19.000 | 34.855   | 1.054    | 0.165    | -2.944  | -4.805  | -0.891   | 20.985  | 15.340  | 10.146  |

ΘΕΣΗ (POSITION) H

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.490  | 19.694   | -1.545   | -0.069   | 1.819   | -1.120  | -0.629  | 12.235  | 9.050   | 2.287   |
| 0.990  | 19.431   | -1.387   | 0.016    | 1.366   | -1.445  | -0.334  | 10.717  | 8.044   | 2.836   |
| 1.530  | 19.937   | -1.151   | 0.089    | 1.121   | -1.723  | -0.091  | 11.902  | 8.249   | 3.501   |
| 2.030  | 20.250   | -1.289   | -0.032   | 1.033   | -2.381  | -0.541  | 13.435  | 9.227   | 4.282   |
| 2.530  | 20.386   | -1.076   | 0.155    | 0.242   | -2.141  | 0.045   | 11.663  | 8.597   | 4.802   |
| 2.990  | 20.817   | -1.052   | 0.455    | 0.743   | -2.212  | -0.008  | 13.473  | 11.279  | 5.170   |
| 3.510  | 20.920   | -1.063   | 0.290    | -0.209  | -3.599  | -0.173  | 16.773  | 11.854  | 6.208   |
| 4.010  | 21.521   | -0.875   | 0.513    | 0.387   | -3.960  | -0.219  | 20.389  | 11.528  | 6.740   |
| 4.510  | 21.591   | -0.833   | 0.400    | -0.253  | -4.006  | -0.072  | 16.885  | 13.875  | 7.611   |
| 5.010  | 22.451   | -0.837   | 0.634    | -1.696  | -5.015  | 0.832   | 21.168  | 12.959  | 8.663   |
| 5.520  | 22.638   | -0.722   | 0.587    | -1.160  | -6.288  | 0.422   | 23.175  | 13.039  | 9.895   |
| 6.000  | 22.996   | -0.780   | 0.616    | -1.759  | -6.800  | 0.199   | 23.917  | 12.872  | 9.472   |
| 6.520  | 24.277   | -1.001   | 0.733    | -2.437  | -7.282  | 0.217   | 27.428  | 15.110  | 10.940  |
| 7.010  | 24.713   | -0.827   | 0.560    | -4.070  | -8.056  | -0.194  | 30.578  | 13.331  | 11.543  |
| 7.500  | 24.862   | -0.915   | 0.841    | -4.311  | -9.312  | 0.404   | 30.621  | 16.566  | 12.073  |
| 8.000  | 25.603   | -0.583   | 0.473    | -4.079  | -9.044  | 0.241   | 30.136  | 15.817  | 12.090  |
| 8.530  | 26.664   | -0.885   | 0.416    | -5.972  | -9.288  | 0.964   | 34.097  | 16.922  | 11.362  |
| 9.000  | 27.286   | -0.768   | 0.571    | -5.388  | -9.903  | 0.169   | 32.878  | 15.936  | 12.340  |
| 9.500  | 28.102   | -0.619   | 0.422    | -5.784  | -9.314  | -0.221  | 33.762  | 17.376  | 11.403  |
| 10.000 | 28.836   | -0.809   | 0.483    | -7.991  | -8.191  | 0.214   | 32.888  | 19.815  | 12.342  |
| 10.500 | 28.984   | -0.554   | 0.250    | -6.128  | -7.830  | -0.187  | 31.329  | 17.774  | 11.363  |
| 11.000 | 29.454   | -0.406   | 0.553    | -5.442  | -8.059  | 0.077   | 30.307  | 16.417  | 12.571  |
| 11.500 | 29.617   | -0.786   | 0.667    | -7.113  | -6.899  | -0.214  | 31.578  | 19.768  | 11.671  |
| 12.000 | 30.259   | -0.370   | 0.572    | -7.208  | -7.083  | -0.091  | 31.585  | 17.981  | 11.613  |
| 13.000 | 31.071   | -0.047   | 0.721    | -3.590  | -5.892  | -0.725  | 26.899  | 16.896  | 11.729  |
| 14.000 | 31.462   | 0.038    | 0.587    | -6.739  | -6.237  | -0.525  | 30.490  | 19.450  | 11.581  |
| 15.000 | 32.403   | 0.075    | 0.367    | -4.822  | -4.774  | -0.928  | 27.168  | 18.585  | 11.193  |
| 16.000 | 33.493   | 0.165    | 0.251    | -3.629  | -4.616  | -1.787  | 25.107  | 19.012  | 12.084  |
| 17.000 | 33.823   | 0.682    | 0.079    | -3.558  | -5.783  | -1.212  | 24.902  | 16.627  | 11.385  |
| 18.000 | 34.107   | 0.875    | -0.019   | -2.877  | -4.674  | -1.009  | 22.960  | 14.717  | 10.200  |
| 19.000 | 35.221   | 1.245    | 0.156    | -1.211  | -2.732  | -1.406  | 30.167  | 15.796  | 10.400  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.540  | 19.638   | -1.549   | -0.149   | 0.799   | -1.095  | -0.518   | 9.522   | 8.256   | 2.306   |
| 1.000  | 19.797   | -1.625   | -0.143   | 1.165   | -0.721  | -0.619   | 9.745   | 8.157   | 2.821   |
| 1.520  | 20.191   | -1.596   | -0.097   | 1.034   | -1.156  | 0.039  | 10.437  | 9.059   | 3.473   |
| 2.020  | 20.355   | -1.703   | -0.068   | 0.472   | -1.741  | -0.747   | 12.670  | 10.037  | 4.092   |
| 2.510  | 21.121   | -1.172   | -0.051   | 0.292   | -2.501  | -0.296   | 12.645  | 10.189  | 5.131   |
| 3.040  | 21.068   | -1.608   | 0.062    | 0.436   | -1.876  | 0.239  | 13.046  | 9.498   | 5.145   |
| 3.520  | 20.580   | -2.275   | 0.483    | -0.355  | -1.172  | 1.283  | 13.870  | 10.047  | 5.179   |
| 4.040  | 21.080   | -0.739   | 0.114    | 1.223   | -4.036  | -1.087   | 19.577  | 10.900  | 6.835   |
| 4.500  | 13.694   | -1.698   | -0.474   | -2.391  | -7.927  | 1.163  | 29.002  | 11.206  | 5.398   |
| 5.020  | 16.847   | -1.372   | -0.284   | -1.154  | -7.739  | 0.385  | 32.183  | 12.697  | 6.962   |
| 5.520  | 16.196   | -1.612   | -0.679   | 0.346   | -14.067   | -0.377   | 41.995  | 14.088  | 7.426   |
| 6.030  | 20.418   | 1.271    | 0.802    | -1.697  | -3.878  | -0.557   | 20.972  | 11.454  | 7.811   |
| 6.500  | 22.279   | -1.654   | 1.354    | -1.079  | 0.775   | 2.262  | 22.518  | 11.483  | 5.925   |
| 7.000  | 25.150   | -1.350   | 0.806    | -3.952  | -7.843  | 0.465  | 27.609  | 14.850  | 11.375  |
| 7.510  | 25.755   | -0.932   | 0.736    | -3.797  | -9.417  | 0.186  | 28.047  | 16.187  | 12.075  |
| 8.040  | 25.879   | -0.962   | 0.823    | -6.716  | -8.437  | 0.245  | 31.735  | 16.588  | 11.419  |
| 8.500  | 26.399   | -0.677   | 0.845    | -4.944  | -8.726  | 0.185  | 34.040  | 17.362  | 11.537  |
| 9.000  | 27.915   | -0.832   | 0.713    | -5.616  | -7.660  | -0.493   | 31.082  | 18.375  | 11.654  |
| 9.500  | 27.595   | -0.619   | 0.639    | -4.937  | -8.316  | -0.397   | 30.725  | 16.927  | 12.379  |
| 10.000 | 28.434   | -0.622   | 0.765    | -6.741  | -7.015  | -0.318   | 29.502  | 18.181  | 11.587  |
| 10.500 | 29.016   | -0.551   | 0.593    | -6.695  | -9.085  | -0.772   | 32.685  | 17.442  | 12.980  |
| 11.000 | 29.575   | -0.643   | 0.762    | -6.223  | -7.075  | 0.180  | 30.275  | 18.219  | 11.473  |
| 11.500 | 30.101   | -0.740   | 0.587    | -7.069  | -6.703  | -0.449   | 31.206  | 18.259  | 11.606  |
| 12.000 | 30.232   | -0.519   | 0.882    | -6.863  | -5.356  | -0.780   | 30.767  | 18.194  | 11.174  |
| 13.000 | 30.854   | -0.167   | 0.520    | -6.294  | -4.680  | -1.244   | 26.201  | 20.948  | 11.881  |
| 14.000 | 31.645   | -0.170   | 0.727    | -5.600  | -5.624  | -0.788   | 27.558  | 17.724  | 11.025  |
| 15.000 | 32.315   | 0.290    | 0.227    | -5.405  | -4.721  | -1.256   | 23.680  | 17.569  | 10.775  |
| 16.000 | 32.940   | 0.283    | 0.295    | -4.103  | -4.921  | -1.570   | 25.974  | 18.590  | 11.057  |
| 17.000 | 33.451   | 0.671    | 0.162    | -3.823  | -4.728  | -0.977   | 22.665  | 16.625  | 11.543  |
| 18.000 | 34.162   | 0.767    | 0.009    | -3.033  | -4.781  | -0.952   | 21.442  | 15.516  | 10.549  |
| 19.000 | 34.899   | 1.037    | 0.359    | -1.897  | -4.902  | -1.539   | 21.597  | 16.179  | 10.264  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.500  | 19.246   | -1.420   | -0.224   | 0.719   | -0.954  | -0.371  | 10.723  | 8.440   | 2.262   |
| 1.030  | 19.569   | -1.287   | -0.075   | 1.269   | -1.139  | -0.027  | 10.140  | 7.754   | 2.751   |
| 1.500  | 20.313   | -1.344   | -0.117   | 1.446   | -1.825  | -0.543  | 11.107  | 8.848   | 3.837   |
| 2.000  | 20.689   | -1.390   | -0.113   | 0.887   | -2.634  | -0.190  | 13.770  | 8.532   | 4.605   |
| 2.520  | 20.960   | -1.140   | -0.252   | 1.103   | -3.218  | -0.439  | 14.343  | 9.656   | 5.741   |
| 3.020  | 21.051   | -1.621   | 0.004    | 0.733   | -2.182  | 0.425   | 14.107  | 10.334  | 5.109   |
| 3.540  | 21.321   | -1.358   | 0.063    | 0.936   | -2.774  | 0.434   | 15.580  | 11.189  | 5.926   |
| 4.040  | 17.968   | -2.390   | -0.012   | -2.456  | -3.102  | 3.293   | 15.996  | 12.318  | 5.451   |
| 4.530  | 17.102   | -2.012   | -0.341   | -2.546  | -6.853  | 1.843   | 22.967  | 12.192  | 6.387   |
| 5.030  | 12.351   | -1.125   | -0.965   | -0.859  | -11.383   | 0.452   | 46.839  | 14.503  | 6.130   |
| 5.500  | 16.197   | -1.430   | -0.443   | -2.142  | -8.628  | 1.731   | 28.105  | 13.683  | 7.357   |
| 6.000  | 21.450   | -2.054   | 0.958    | -0.354  | 1.869   | 7.087   | 18.521  | 16.861  | 6.352   |
| 6.500  | 23.178   | -3.040   | 0.976    | -5.929  | -1.643  | 8.217   | 21.429  | 21.572  | 7.037   |
| 6.990  | 25.294   | -1.277   | 0.652    | -2.919  | -8.121  | 0.562   | 31.364  | 15.243  | 10.602  |
| 7.510  | 25.620   | -1.027   | 0.598    | -2.898  | -8.250  | -0.318  | 28.885  | 16.849  | 11.213  |
| 8.000  | 26.249   | -0.665   | 0.588    | -2.524  | -9.457  | -0.637  | 32.954  | 16.185  | 11.716  |
| 8.500  | 27.324   | -0.955   | 0.605    | -4.890  | -8.880  | 0.789   | 31.821  | 17.899  | 11.791  |
| 9.000  | 27.255   | -0.588   | 0.726    | -5.773  | -8.828  | -0.037  | 33.039  | 19.387  | 12.321  |
| 9.500  | 28.622   | -0.987   | 0.316    | -6.348  | -10.787   | 0.105   | 38.631  | 19.273  | 13.556  |
| 10.000 | 28.640   | -0.504   | 0.391    | -7.060  | -8.181  | -0.465  | 33.710  | 18.202  | 11.576  |
| 10.500 | 29.812   | -0.581   | 0.476    | -5.475  | -7.274  | -0.297  | 31.026  | 17.793  | 12.165  |
| 11.000 | 29.633   | -0.340   | 0.630    | -6.102  | -8.977  | -0.791  | 32.704  | 18.817  | 12.740  |
| 11.500 | 30.581   | -0.171   | 0.295    | -5.790  | -7.288  | -0.834  | 31.468  | 18.055  | 12.216  |
| 12.000 | 30.499   | -0.303   | 0.420    | -7.390  | -6.988  | -1.336  | 33.362  | 20.486  | 12.626  |
| 13.000 | 31.042   | 0.143    | 0.412    | -3.267  | -6.250  | -1.707  | 29.366  | 18.647  | 12.866  |
| 14.000 | 32.473   | 0.169    | 0.321    | -5.639  | -5.416  | -0.107  | 27.229  | 22.310  | 11.732  |
| 15.000 | 32.806   | 0.374    | 0.308    | -4.043  | -4.744  | -0.403  | 27.702  | 20.265  | 11.850  |
| 16.000 | 33.016   | 0.420    | 0.123    | -5.253  | -4.698  | -1.426  | 26.083  | 19.144  | 10.836  |
| 17.000 | 34.108   | 0.665    | -0.117   | -4.170  | -5.007  | -1.542  | 25.022  | 17.089  | 11.270  |
| 18.000 | 34.196   | 1.071    | -0.043   | -1.189  | -5.437  | -1.757  | 24.078  | 18.597  | 10.354  |
| 19.000 | 34.701   | 1.259    | 0.163    | -1.512  | -4.549  | -1.221  | 22.337  | 14.953  | 9.848   |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.520  | 18.416   | 0.397    | 0.165    | 1.413   | -1.759  | 0.103  | 12.896  | 11.698  | 2.555   |
| 1.030  | 18.662   | 0.370    | 0.129    | 2.551   | -1.970  | -0.135   | 13.226  | 10.202  | 3.061   |
| 1.540  | 19.291   | 0.052    | 0.275    | 0.554   | -2.670  | 0.005  | 12.859  | 12.138  | 4.080   |
| 2.040  | 19.033   | -0.114   | 0.530    | 0.645   | -2.043  | 0.238  | 14.156  | 12.299  | 4.168   |
| 2.560  | 19.860   | 0.088    | 0.552    | 0.949   | -2.299  | -0.046   | 13.929  | 12.670  | 4.439   |
| 3.010  | 20.817   | 0.190    | 0.557    | 0.920   | -4.070  | 0.684  | 16.904  | 14.981  | 6.341   |
| 4.010  | 20.842   | -0.006   | 0.837    | 0.795   | -3.439  | 0.329  | 15.562  | 13.189  | 6.229   |
| 5.030  | 21.860   | 0.175    | 0.802    | 0.498   | -5.615  | -0.315   | 20.803  | 13.063  | 8.503   |
| 6.050  | 22.501   | -0.080   | 0.814    | 0.561   | -5.273  | 0.393  | 18.109  | 14.823  | 9.014   |
| 7.000  | 23.086   | 0.047    | 0.864    | 1.799   | -6.025  | 0.103  | 21.711  | 16.422  | 8.978   |
| 8.040  | 23.806   | -0.264   | 0.850    | 0.788   | -5.394  | 0.368  | 21.213  | 15.052  | 9.233   |
| 9.060  | 24.490   | -0.063   | 1.015    | 1.445   | -7.754  | 0.248  | 25.671  | 16.794  | 11.113  |
| 10.020 | 25.218   | -0.191   | 1.071    | 1.664   | -7.705  | -0.211   | 26.511  | 18.143  | 11.258  |
| 11.030 | 26.011   | -0.084   | 1.250    | 0.531   | -6.588  | -0.237   | 24.101  | 19.230  | 10.998  |
| 12.050 | 27.243   | -0.023   | 1.033    | 2.191   | -7.570  | 0.207  | 25.110  | 17.574  | 11.009  |
| 13.020 | 27.623   | -0.428   | 1.050    | 2.029   | -8.045  | -0.435   | 25.657  | 18.633  | 12.388  |
| 14.000 | 28.689   | -0.434   | 0.877    | 0.761   | -6.105  | 0.844  | 22.688  | 16.864  | 11.458  |
| 15.030 | 28.770   | -0.034   | 1.068    | 3.173   | -5.448  | -1.205   | 25.146  | 19.338  | 11.013  |
| 16.040 | 30.098   | -0.291   | 0.680    | 2.379   | -5.594  | 0.854  | 23.277  | 16.045  | 10.573  |
| 17.030 | 31.634   | -0.221   | 0.311    | -0.413  | -4.868  | 0.483  | 21.831  | 14.585  | 10.487  |
| 18.020 | 31.492   | -0.236   | 0.241    | 0.351   | -5.989  | 0.731  | 22.845  | 14.289  | 10.233  |
| 19.010 | 32.351   | -0.306   | 0.072    | 0.193   | -4.281  | 0.264  | 18.841  | 14.562  | 10.692  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.510  | 21.189   | 0.331    | -0.052   | 1.835   | -1.324  | -0.606   | 14.075  | 14.299  | 2.782   |
| 1.020  | 22.263   | 0.220    | 0.166    | 2.873   | -1.902  | -0.404   | 18.839  | 16.114  | 3.194   |
| 1.520  | 22.719   | 0.502    | 0.164    | 2.620   | -2.716  | -0.347   | 14.845  | 14.029  | 4.637   |
| 2.010  | 22.896   | 0.314    | 0.526    | 1.820   | -2.817  | 0.158  | 15.608  | 17.004  | 4.716   |
| 2.520  | 23.621   | 0.213    | 0.539    | 3.125   | -2.472  | 0.584  | 16.780  | 16.792  | 5.982   |
| 2.980  | 23.668   | 0.162    | 0.616    | 1.199   | -3.603  | -0.634   | 18.092  | 16.161  | 7.017   |
| 4.020  | 23.430   | -0.148   | 0.876    | 0.639   | -2.096  | -0.089   | 16.089  | 15.464  | 6.989   |
| 5.010  | 24.026   | -0.191   | 0.908    | 0.508   | -3.812  | 0.282  | 17.150  | 15.484  | 8.055   |
| 6.020  | 24.849   | -0.096   | 1.163    | 1.203   | -3.958  | 0.583  | 16.966  | 16.494  | 8.927   |
| 7.020  | 25.257   | -0.071   | 1.114    | 1.910   | -4.452  | 0.134  | 20.426  | 16.079  | 9.373   |
| 8.030  | 26.067   | -0.182   | 0.901    | 2.358   | -5.181  | -0.833   | 21.554  | 16.939  | 10.648  |
| 9.030  | 26.482   | 0.102    | 1.079    | 1.360   | -5.481  | 0.222  | 19.789  | 16.996  | 10.689  |
| 10.040 | 26.697   | 0.002    | 0.877    | 2.353   | -4.602  | 0.735  | 19.865  | 16.807  | 9.810   |
| 11.030 | 26.908   | 0.000    | 1.063    | 1.694   | -5.794  | -0.243   | 20.950  | 16.581  | 10.979  |
| 12.040 | 27.571   | -0.266   | 1.156    | -0.558  | -5.259  | 0.275  | 20.658  | 15.777  | 10.683  |
| 13.000 | 27.944   | -0.346   | 0.843    | 0.911   | -5.641  | -0.097   | 19.822  | 16.753  | 10.980  |
| 14.000 | 28.961   | -0.142   | 0.825    | 0.823   | -6.257  | 0.224  | 22.255  | 15.881  | 11.126  |
| 15.000 | 28.466   | -0.290   | 0.805    | -0.254  | -5.257  | 0.560  | 22.174  | 15.258  | 9.633   |
| 16.000 | 28.934   | 0.039    | 0.727    | 1.520   | -4.847  | 0.133  | 21.456  | 17.590  | 11.562  |
| 17.000 | 29.824   | -0.216   | 0.431    | 1.690   | -4.164  | 0.131  | 20.066  | 13.549  | 10.275  |
| 18.030 | 30.731   | -0.095   | 0.080    | 1.169   | -5.069  | 0.248  | 18.659  | 13.828  | 10.384  |
| 19.010 | 31.305   | -0.253   | -0.016   | 1.776   | -4.655  | -0.151   | 19.523  | 13.173  | 9.566   |

## Πείραμα (Experiment) 6

### ΘΕΣΗ (POSITION) B

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.540  | 13.379   | 0.749    | 0.966    | 3.749   | 0.278   | -0.381  | 9.844   | 15.223  | 2.477   |
| 1.070  | 13.163   | 0.292    | 0.959    | 3.315   | 0.025   | -0.353  | 10.606  | 16.072  | 3.047   |
| 1.520  | 13.281   | 0.192    | 1.068    | 3.897   | -0.020  | -0.457  | 11.030  | 17.931  | 3.781   |
| 2.020  | 13.296   | 0.508    | 1.082    | 5.183   | 0.178   | -0.505  | 15.318  | 19.243  | 4.885   |
| 2.540  | 12.560   | 0.157    | 1.353    | 4.084   | 0.726   | 0.165   | 14.800  | 18.618  | 4.905   |
| 3.010  | 12.338   | 0.548    | 1.284    | 5.502   | 1.184   | 0.092   | 18.316  | 21.970  | 6.128   |
| 3.520  | 11.551   | 0.234    | 1.395    | 5.732   | 0.827   | 0.896   | 18.624  | 25.728  | 8.050   |
| 4.020  | 10.808   | 0.585    | 1.438    | 7.663   | 2.896   | 0.537   | 20.307  | 23.771  | 8.431   |
| 4.510  | 10.434   | 0.445    | 1.295    | 12.468  | 0.671   | 2.195   | 26.720  | 40.796  | 13.016  |
| 5.020  | 10.043   | 0.412    | 1.152    | 10.585  | -0.008  | 1.186   | 26.336  | 38.336  | 14.693  |
| 5.480  | 8.184    | 0.938    | 0.588    | 3.788   | -8.593  | 1.579   | 29.392  | 36.292  | 12.342  |
| 6.020  | 10.108   | -0.327   | 0.530    | 1.662   | -0.621  | 17.174  | 23.943  | 55.602  | 12.197  |
| 6.540  | 12.470   | -0.455   | 0.702    | 4.161   | -4.161  | 9.280   | 29.031  | 37.220  | 12.873  |
| 6.990  | 15.304   | 0.285    | 0.568    | 0.538   | -15.316   | 5.238   | 38.580  | 32.755  | 17.292  |
| 7.540  | 16.548   | 0.251    | 1.171    | 5.404   | -15.570   | 0.789   | 43.639  | 30.858  | 15.387  |
| 8.020  | 19.155   | 0.315    | 1.166    | 4.038   | -17.628   | 0.820   | 51.427  | 32.018  | 15.292  |
| 8.520  | 20.686   | -0.208   | 1.413    | -0.686  | -14.945   | 2.351   | 45.064  | 29.959  | 14.905  |
| 9.000  | 22.202   | -0.499   | 1.756    | 0.358   | -15.079   | 0.532   | 47.201  | 27.123  | 15.453  |
| 9.500  | 23.538   | -0.126   | 1.891    | 0.681   | -15.515   | 1.171   | 52.824  | 26.825  | 16.698  |
| 10.000 | 25.151   | -0.615   | 1.715    | -1.549  | -14.500   | 0.730   | 44.053  | 30.150  | 16.183  |
| 10.500 | 25.056   | -0.365   | 2.508    | 0.113   | -14.570   | -0.827  | 50.741  | 28.777  | 16.974  |
| 11.000 | 26.233   | -0.197   | 2.020    | -0.389  | -15.554   | 0.616   | 45.109  | 31.837  | 19.500  |
| 11.500 | 26.752   | -0.301   | 2.392    | 0.036   | -15.303   | 0.623   | 47.900  | 33.246  | 18.054  |
| 12.000 | 27.040   | -0.405   | 1.842    | 4.178   | -13.510   | 0.491   | 42.559  | 36.700  | 14.491  |
| 13.000 | 28.717   | -0.151   | 2.197    | 3.189   | -13.645   | -1.104  | 52.935  | 33.649  | 19.618  |
| 14.000 | 30.522   | -0.345   | 2.196    | -0.124  | -12.603   | -0.185  | 40.432  | 30.415  | 20.410  |
| 15.000 | 31.302   | -0.332   | 2.260    | 1.296   | -12.775   | -0.729  | 44.584  | 32.078  | 20.022  |
| 16.000 | 32.949   | -0.479   | 2.044    | 1.557   | -13.606   | -1.406  | 43.792  | 29.417  | 22.157  |
| 17.000 | 34.391   | -0.604   | 1.433    | -1.549  | -11.564   | -0.009  | 47.467  | 27.308  | 20.268  |
| 18.000 | 34.440   | -0.098   | 1.372    | 1.162   | -11.792   | 0.598   | 39.281  | 24.051  | 19.602  |
| 19.000 | 36.851   | -0.308   | 1.336    | -1.291  | -9.265  | 0.037   | 39.964  | 23.784  | 16.066  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) D

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.530  | 15.555   | 0.312    | 0.306    | -0.596  | -0.200  | 0.081  | 8.124   | 9.201   | 1.831   |
| 1.020  | 15.650   | 0.411    | 0.389    | -0.732  | -0.471  | 0.428  | 8.757   | 8.747   | 2.429   |
| 1.570  | 16.199   | 0.711    | 0.358    | -1.307  | -0.507  | -0.311   | 11.728  | 10.908  | 3.701   |
| 2.040  | 15.822   | 0.943    | 0.342    | -1.086  | -0.002  | 0.393  | 9.406   | 9.950   | 3.778   |
| 2.580  | 15.956   | 0.688    | 0.563    | -0.389  | -0.967  | 0.322  | 11.100  | 11.887  | 4.991   |
| 3.010  | 15.731   | 0.819    | 0.685    | -0.754  | -0.905  | -0.519   | 13.327  | 12.870  | 5.816   |
| 3.520  | 15.928   | 0.281    | 0.761    | 0.082   | 0.154   | 2.483  | 17.075  | 19.219  | 6.105   |
| 4.020  | 15.398   | 0.343    | 1.020    | -1.396  | 0.093   | 2.885  | 23.453  | 22.446  | 6.791   |
| 4.570  | 15.399   | -0.164   | 1.023    | 1.632   | 3.162   | 6.927  | 19.476  | 26.811  | 7.922   |
| 5.000  | 16.272   | 2.595    | 0.590    | 8.091   | 1.964   | -3.859   | 25.610  | 32.158  | 12.374  |
| 5.570  | 15.045   | 4.617    | 1.355    | -5.457  | 7.528   | -7.415   | 30.849  | 20.808  | 7.748   |
| 6.000  | 10.007   | 1.122    | 1.141    | -0.689  | 5.689   | -2.904   | 37.723  | 11.193  | 1.915   |
| 6.500  | 2.205    | -0.060   | 0.336    | 0.901   | 2.433   | -1.313   | 18.833  | 5.721   | 0.693   |
| 7.000  | 0.606    | 0.353    | 0.231    | -6.693  | -1.222  | 1.987  | 10.447  | 12.284  | 0.716   |
| 7.500  | 6.620    | -1.648   | 1.416    | -23.980   | -9.739  | 11.476   | 53.013  | 43.700  | 6.012   |
| 8.000  | 21.176   | 0.805    | 2.151    | 0.602   | -13.687   | -0.794   | 61.417  | 28.854  | 16.362  |
| 8.500  | 23.190   | 0.063    | 2.094    | -0.641  | -17.194   | 0.180  | 57.024  | 29.838  | 17.943  |
| 9.000  | 24.382   | -0.170   | 1.901    | -3.422  | -19.211   | -0.981   | 59.126  | 34.048  | 19.326  |
| 9.500  | 25.399   | -0.246   | 1.828    | -1.162  | -16.096   | -1.073   | 52.080  | 31.604  | 18.996  |
| 10.000 | 25.309   | -0.613   | 2.119    | -6.700  | -17.290   | 0.369  | 53.907  | 33.024  | 20.410  |
| 10.500 | 26.296   | -0.528   | 2.138    | -3.426  | -15.030   | -1.440   | 53.548  | 33.225  | 18.616  |
| 11.000 | 27.510   | -0.898   | 1.370    | 2.121   | -10.361   | 0.616  | 56.598  | 46.762  | 15.992  |
| 11.500 | 27.724   | -0.419   | 2.241    | -2.896  | -15.478   | -0.370   | 65.594  | 33.938  | 20.635  |
| 12.000 | 28.754   | -0.921   | 2.123    | -7.176  | -17.482   | -0.440   | 60.539  | 33.148  | 22.373  |
| 13.000 | 31.243   | -0.662   | 2.033    | -5.755  | -15.011   | -0.521   | 62.563  | 31.699  | 21.213  |
| 14.000 | 31.680   | -0.489   | 1.507    | -2.097  | -13.408   | -0.759   | 77.879  | 34.577  | 22.451  |
| 15.000 | 32.827   | -0.473   | 1.902    | -5.781  | -13.834   | 0.730  | 50.039  | 34.742  | 21.943  |
| 16.000 | 34.353   | -0.077   | 1.461    | -3.860  | -12.337   | -1.265   | 48.248  | 33.222  | 22.298  |
| 17.000 | 35.418   | 0.102    | 1.150    | -2.708  | -11.313   | -1.613   | 45.410  | 29.682  | 19.065  |
| 18.000 | 36.419   | 0.231    | 0.792    | -2.741  | -12.234   | -0.526   | 45.712  | 31.155  | 20.587  |
| 19.000 | 38.419   | 0.444    | 0.667    | -2.723  | -10.267   | -1.036   | 44.382  | 27.722  | 18.957  |



ΘΕΣΗ (POSITION) E

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.510  | 16.411   | -1.864   | 0.146    | -0.270  | -0.654  | -0.118  | 10.013  | 9.270   | 2.331   |
| 1.000  | 16.326   | -1.600   | 0.403    | -0.457  | -0.711  | 0.146   | 10.058  | 9.267   | 2.682   |
| 1.530  | 16.404   | -1.244   | 0.484    | 0.211   | -0.331  | -0.028  | 9.455   | 11.400  | 3.573   |
| 2.040  | 16.672   | -1.245   | 0.450    | 0.596   | -0.757  | 0.189   | 11.862  | 10.954  | 4.219   |
| 2.540  | 16.618   | -1.394   | 0.690    | 0.978   | -1.061  | 0.216   | 11.407  | 10.288  | 5.517   |
| 3.060  | 16.745   | -1.519   | 0.806    | -0.853  | -2.791  | 0.143   | 17.611  | 14.019  | 8.045   |
| 3.590  | 16.489   | -1.547   | 1.251    | -0.294  | -1.874  | 0.726   | 15.807  | 12.373  | 6.946   |
| 4.070  | 17.158   | -1.753   | 1.359    | -2.009  | -3.929  | 0.894   | 19.305  | 13.884  | 9.526   |
| 4.540  | 17.422   | -2.396   | 1.499    | -2.384  | -1.864  | 3.994   | 20.947  | 16.251  | 10.489  |
| 5.020  | 17.270   | -2.453   | 1.592    | -3.481  | -3.559  | 5.404   | 24.331  | 19.440  | 11.835  |
| 5.520  | 9.060    | -2.047   | 0.314    | -35.985   | -5.677  | 19.785  | 39.617  | 85.760  | 6.296   |
| 6.030  | 6.135    | -2.918   | 0.026    | -34.406   | -22.294   | 12.190  | 85.429  | 39.400  | 9.275   |
| 6.500  | 5.137    | -2.941   | -0.406   | -9.276  | -21.705   | 3.082   | 79.855  | 17.041  | 8.404   |
| 7.000  | 14.721   | 0.389    | 1.060    | 16.496  | -11.425   | -14.965   | 38.472  | 43.803  | 10.630  |
| 7.500  | 22.235   | -1.269   | 1.682    | 0.433   | -12.727   | -4.350  | 41.795  | 24.392  | 17.078  |
| 8.000  | 23.197   | -1.365   | 1.474    | -1.338  | -18.404   | -0.794  | 49.950  | 28.706  | 20.107  |
| 8.500  | 24.098   | -1.228   | 1.567    | -4.831  | -16.307   | -0.573  | 54.729  | 26.199  | 17.599  |
| 9.000  | 25.557   | -1.057   | 1.472    | -7.580  | -17.602   | 0.839   | 53.264  | 31.113  | 19.675  |
| 9.500  | 24.971   | -0.979   | 1.895    | -8.029  | -16.946   | 0.490   | 97.062  | 40.690  | 18.728  |
| 10.000 | 27.386   | -1.045   | 1.768    | -7.445  | -16.084   | 1.871   | 58.053  | 35.141  | 19.909  |
| 10.500 | 26.881   | -0.674   | 1.875    | -8.975  | -16.122   | 0.735   | 53.453  | 32.681  | 19.352  |
| 11.000 | 28.268   | -1.126   | 1.832    | -5.890  | -17.432   | 0.866   | 52.946  | 35.751  | 20.186  |
| 11.500 | 27.737   | -0.600   | 2.279    | -6.841  | -14.462   | -0.874  | 50.089  | 34.103  | 19.032  |
| 12.000 | 28.676   | -0.904   | 1.472    | 7.501   | -15.119   | 0.239   | 50.731  | 53.187  | 16.095  |
| 13.000 | 30.051   | -0.727   | 2.175    | -5.878  | -14.668   | 1.091   | 53.420  | 33.552  | 21.105  |
| 14.000 | 31.899   | -0.543   | 1.359    | -9.890  | -14.748   | -0.271  | 70.345  | 34.959  | 22.125  |
| 15.000 | 32.105   | 0.150    | 1.542    | -4.072  | -13.383   | -0.360  | 43.498  | 30.265  | 22.034  |
| 16.000 | 34.605   | -0.070   | 1.248    | -6.413  | -10.164   | -1.739  | 41.558  | 27.474  | 22.558  |
| 17.000 | 35.547   | 0.177    | 1.087    | -6.894  | -9.425  | 0.442   | 43.445  | 30.427  | 19.973  |
| 18.000 | 36.315   | 0.159    | 1.150    | -2.895  | -9.396  | -1.848  | 45.296  | 28.541  | 20.757  |
| 19.000 | 37.830   | 0.293    | 1.066    | -3.309  | -7.415  | -1.583  | 37.844  | 25.092  | 17.228  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) F

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.560  | 15.595   | -0.177   | 0.268    | -0.054  | -0.023  | -0.160  | 8.346   | 7.729   | 2.042   |
| 1.010  | 16.342   | 0.067    | 0.388    | -0.380  | -0.854  | 0.165   | 9.517   | 8.197   | 2.545   |
| 1.520  | 16.589   | 0.244    | 0.250    | -0.565  | 0.012   | 0.000   | 10.040  | 9.416   | 3.602   |
| 1.980  | 15.765   | -1.746   | 0.624    | 113.383   | -16.486   | -27.502   | 74.098  | 211.357   | 8.457   |
| 2.470  | 13.695   | -6.260   | 1.609    | 1176.930  | -194.668  | -343.770  | 673.671   | 2104.557  | 61.565  |
| 3.000  | 14.745   | -4.679   | 1.376    | 67.869  | -6.472  | -10.031   | 49.885  | 129.035   | 6.366   |
| 3.580  | 12.749   | -8.660   | 2.201    | 117.811   | -13.019   | -19.453   | 78.025  | 227.433   | 8.942   |
| 4.070  | 18.316   | 1.124    | 0.909    | 27.246  | 0.606   | 5.002   | 26.981  | 75.972  | 5.763   |
| 4.460  | 15.443   | -5.440   | 2.225    | 19.717  | 5.932   | 18.315  | 21.180  | 76.342  | 5.947   |
| 5.010  | 16.033   | 0.881    | 1.866    | -9.026  | 0.063   | 6.627   | 27.555  | 55.947  | 7.101   |
| 5.590  | 6.300    | -0.875   | 0.638    | 32.118  | -8.728  | -11.828   | 54.517  | 61.669  | 6.510   |
| 6.030  | 2.571    | 1.451    | 0.345    | 13.923  | 1.194   | -5.757  | 40.111  | 28.276  | 2.087   |
| 6.480  | 0.334    | -0.070   | -0.014   | 2.747   | -0.715  | -0.801  | 3.278   | 3.984   | 0.252   |
| 6.970  | 5.997    | -0.065   | 0.168    | 14.841  | -6.427  | -4.888  | 29.216  | 29.909  | 2.882   |
| 7.500  | 19.868   | -1.907   | 1.659    | 0.126   | 1.987   | 16.626  | 28.240  | 52.601  | 9.319   |
| 8.000  | 22.712   | -0.437   | 1.782    | -5.502  | -14.479   | 2.404   | 46.088  | 25.672  | 16.519  |
| 8.500  | 23.556   | -0.588   | 1.962    | -3.338  | -16.419   | -1.365  | 49.628  | 23.867  | 17.519  |
| 9.000  | 24.193   | -0.614   | 1.713    | -4.788  | -15.236   | -0.353  | 51.390  | 30.024  | 17.897  |
| 9.500  | 25.138   | -0.772   | 1.745    | -3.759  | -18.199   | 0.014   | 50.146  | 31.672  | 20.433  |
| 10.000 | 26.218   | -0.934   | 1.860    | -4.355  | -18.718   | 0.502   | 59.388  | 30.818  | 18.740  |
| 10.500 | 27.106   | -0.731   | 1.781    | -5.197  | -16.984   | -0.076  | 52.383  | 31.190  | 21.254  |
| 11.000 | 28.646   | -1.163   | 1.924    | -7.324  | -17.500   | 0.877   | 57.146  | 34.412  | 21.835  |
| 11.500 | 28.367   | -0.921   | 2.095    | -9.941  | -17.455   | 1.159   | 57.358  | 33.689  | 21.150  |
| 12.000 | 29.160   | -0.710   | 1.976    | -5.537  | -16.712   | -0.639  | 54.253  | 34.547  | 21.941  |
| 13.000 | 30.275   | -0.622   | 2.021    | -3.807  | -14.547   | -0.925  | 49.155  | 35.076  | 21.424  |
| 14.000 | 32.025   | -0.627   | 1.892    | -2.749  | -14.201   | -1.269  | 70.757  | 35.181  | 21.894  |
| 15.000 | 33.953   | -0.444   | 1.383    | -4.546  | -13.168   | 0.239   | 47.419  | 36.103  | 21.000  |
| 16.000 | 33.941   | -0.202   | 1.583    | -5.905  | -13.179   | -0.990  | 48.669  | 29.279  | 21.897  |
| 17.000 | 36.221   | 0.183    | 1.031    | -3.919  | -11.907   | -1.108  | 44.605  | 28.569  | 20.101  |
| 18.000 | 36.928   | 0.072    | 0.881    | -4.758  | -10.139   | -1.629  | 39.644  | 28.181  | 19.812  |
| 19.000 | 38.267   | 0.023    | 0.508    | -1.698  | -10.100   | -1.363  | 40.734  | 29.708  | 17.947  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) G

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.550  | 13.079   | -0.867   | 0.804    | 2.781   | 0.372   | -0.209  | 11.780  | 22.112  | 4.281   |
| 1.020  | 12.925   | -0.847   | 0.506    | 2.626   | -0.059  | -0.470  | 15.172  | 25.993  | 5.691   |
| 1.590  | 13.148   | -0.618   | 0.648    | 2.292   | -0.165  | -0.350  | 15.889  | 28.086  | 6.592   |
| 2.040  | 12.762   | -0.561   | 0.890    | 5.908   | 0.252   | -0.495  | 20.038  | 30.395  | 6.731   |
| 2.530  | 12.984   | -0.591   | 1.067    | 5.282   | 0.899   | 0.630   | 23.857  | 33.482  | 7.698   |
| 3.040  | 12.415   | -0.532   | 1.170    | 8.574   | 2.363   | 0.944   | 31.668  | 40.152  | 10.190  |
| 3.530  | 11.299   | -0.432   | 1.160    | 7.024   | 3.329   | -1.754  | 33.175  | 43.314  | 12.134  |
| 4.080  | 8.440    | -0.245   | 0.801    | 10.293  | 1.809   | -8.320  | 31.351  | 48.884  | 10.640  |
| 4.510  | 6.724    | 0.576    | 0.518    | 10.095  | -11.252   | -1.619  | 49.911  | 64.396  | 14.388  |
| 5.020  | 6.427    | 1.219    | -0.101   | 15.041  | -20.655   | -3.123  | 73.769  | 77.852  | 17.140  |
| 5.520  | 7.733    | 0.649    | 0.174    | 7.936   | -8.974  | 4.259   | 69.752  | 82.980  | 17.940  |
| 6.050  | 7.265    | 0.329    | -0.137   | 6.688   | -1.660  | 3.168   | 41.820  | 44.175  | 10.605  |
| 6.500  | 12.136   | -1.368   | -0.370   | 3.151   | 3.277   | 12.998  | 49.379  | 55.410  | 14.169  |
| 7.050  | 19.035   | 0.237    | -1.417   | 2.691   | -25.836   | 1.605   | 70.805  | 72.823  | 24.869  |
| 7.500  | 22.261   | -0.679   | -0.869   | -2.996  | -29.133   | 1.783   | 83.704  | 46.964  | 22.020  |
| 8.000  | 25.289   | -1.499   | -0.587   | -6.618  | -22.334   | -0.299  | 66.923  | 39.697  | 20.786  |
| 8.500  | 26.018   | -1.216   | -0.075   | -4.685  | -20.238   | -0.802  | 63.346  | 33.302  | 19.346  |
| 9.000  | 27.624   | -1.228   | 0.442    | -8.127  | -20.908   | 0.696   | 66.479  | 32.159  | 20.211  |
| 9.500  | 28.748   | -1.189   | 0.351    | -8.447  | -19.084   | 0.169   | 61.384  | 32.782  | 21.168  |
| 10.000 | 29.782   | -0.803   | 0.776    | -10.032   | -20.518   | -0.054  | 65.885  | 33.808  | 21.947  |
| 10.500 | 30.847   | -1.054   | 0.662    | -10.981   | -18.331   | -1.369  | 61.101  | 37.034  | 22.583  |
| 11.000 | 30.550   | -0.903   | 0.521    | 6.202   | -18.978   | 1.110   | 61.866  | 77.197  | 17.341  |
| 11.500 | 32.765   | -1.030   | 0.911    | -10.840   | -14.972   | -1.948  | 55.719  | 36.127  | 22.615  |
| 12.000 | 30.864   | -0.673   | 0.243    | 14.480  | -20.688   | -0.570  | 59.198  | 76.751  | 17.135  |
| 13.000 | 34.370   | -0.439   | 0.642    | -8.784  | -15.549   | -2.816  | 53.973  | 39.971  | 24.515  |
| 14.000 | 34.580   | 0.004    | 0.916    | -8.112  | -14.974   | -1.525  | 54.503  | 35.350  | 23.414  |
| 15.000 | 36.063   | 0.373    | 0.476    | -8.630  | -10.633   | -1.443  | 51.665  | 33.065  | 22.867  |
| 16.000 | 37.145   | 0.391    | 0.486    | -8.664  | -12.731   | -0.761  | 49.170  | 31.642  | 22.874  |
| 17.000 | 37.600   | 1.019    | 0.394    | -4.953  | -8.888  | -3.638  | 39.519  | 29.990  | 22.236  |
| 18.000 | 39.255   | 0.794    | 0.222    | -7.571  | -10.651   | -1.390  | 43.515  | 24.174  | 20.425  |
| 19.000 | 39.166   | 1.220    | 0.212    | -4.960  | -9.593  | -1.200  | 44.598  | 22.165  | 18.799  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) I

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.570  | 14.023   | -1.292   | 0.804    | 2.267   | 0.370   | -0.287  | 12.270  | 19.888  | 4.105   |
| 1.040  | 14.318   | -1.092   | 0.752    | 2.397   | 0.711   | -0.207  | 13.405  | 21.124  | 5.114   |
| 1.530  | 14.258   | -0.961   | 0.697    | 2.942   | -0.221  | -0.458  | 14.244  | 22.031  | 5.514   |
| 2.040  | 14.195   | -0.996   | 0.756    | 1.948   | 0.429   | -0.638  | 16.061  | 21.837  | 5.678   |
| 2.450  | 14.548   | -1.172   | 0.435    | 0.934   | 0.452   | 0.136   | 18.106  | 23.074  | 6.776   |
| 3.070  | 13.230   | -0.832   | 0.672    | 4.809   | 0.379   | -0.293  | 20.608  | 26.548  | 8.292   |
| 3.550  | 12.870   | -0.370   | 0.665    | 7.034   | 1.881   | -2.856  | 38.561  | 36.928  | 9.330   |
| 4.080  | 10.811   | 0.212    | 0.655    | 5.575   | 2.727   | -6.868  | 32.396  | 32.450  | 9.646   |
| 4.560  | 12.029   | -0.580   | 0.518    | 10.430  | 3.146   | -0.601  | 36.199  | 37.829  | 11.990  |
| 5.060  | 7.221    | 0.280    | -0.581   | 13.344  | -17.870   | -4.529  | 66.211  | 53.392  | 11.450  |
| 5.570  | 8.592    | 0.471    | -0.480   | 14.690  | -24.198   | -4.658  | 61.811  | 49.512  | 15.108  |
| 6.000  | 14.409   | -1.206   | 0.054    | 2.379   | -12.634   | 6.609   | 71.909  | 55.491  | 19.202  |
| 6.550  | 11.384   | -1.894   | -0.658   | -19.420   | -22.548   | 12.974  | 66.679  | 58.012  | 15.487  |
| 7.040  | 13.505   | -3.271   | -0.396   | -34.430   | -24.073   | 15.716  | 71.123  | 59.652  | 12.225  |
| 7.590  | 22.538   | -1.216   | -0.175   | -5.144  | -28.127   | 2.038   | 80.055  | 42.869  | 23.043  |
| 8.000  | 24.581   | -1.467   | 0.213    | -6.176  | -20.645   | -0.515  | 61.437  | 38.673  | 20.909  |
| 8.500  | 26.076   | -1.270   | 0.664    | -4.886  | -20.272   | -0.838  | 67.468  | 37.810  | 19.990  |
| 9.000  | 28.399   | -1.544   | 0.598    | -9.582  | -19.540   | 0.799   | 64.610  | 36.539  | 21.889  |
| 9.500  | 28.228   | -1.119   | 0.861    | -8.711  | -18.199   | 0.037   | 61.297  | 36.271  | 22.198  |
| 10.000 | 30.424   | -1.073   | 0.720    | -7.263  | -18.948   | -1.564  | 63.897  | 37.245  | 23.377  |
| 10.500 | 30.925   | -1.147   | 0.927    | -11.317   | -16.325   | -0.960  | 62.904  | 49.826  | 22.831  |
| 11.000 | 30.983   | -0.678   | 0.973    | -9.946  | -17.799   | -0.825  | 60.435  | 35.744  | 23.303  |
| 11.500 | 33.168   | -1.033   | 0.795    | -12.942   | -18.912   | -0.615  | 64.302  | 36.132  | 25.069  |
| 12.000 | 32.122   | -0.434   | -0.126   | 16.630  | -33.997   | 2.044   | 75.857  | 127.241   | 15.449  |
| 13.000 | 33.593   | -0.502   | -0.362   | 25.994  | -24.347   | 2.081   | 64.970  | 90.373  | 14.392  |
| 14.000 | 34.713   | -0.461   | 0.763    | -6.971  | -12.572   | -0.747  | 141.896   | 34.628  | 24.145  |
| 15.000 | 36.170   | 0.263    | 0.686    | -10.337   | -14.712   | -0.558  | 59.221  | 33.637  | 24.166  |
| 16.000 | 37.081   | 0.286    | 0.368    | -9.035  | -10.615   | -3.517  | 48.281  | 31.569  | 22.284  |
| 17.000 | 38.201   | 0.620    | 0.351    | -6.470  | -11.119   | -3.228  | 49.416  | 28.781  | 20.813  |
| 18.000 | 39.303   | 0.761    | 0.125    | -6.541  | -9.477  | -1.088  | 42.717  | 27.018  | 19.768  |
| 19.000 | 40.306   | 0.759    | 0.128    | -4.174  | -9.479  | -1.410  | 38.505  | 23.395  | 17.746  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) J

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 0.580  | 13.555   | -0.756   | 0.589    | 2.168   | 0.439   | 0.057   | 12.053  | 20.117  | 3.686   |
| 1.060  | 14.278   | -1.075   | 0.592    | 2.053   | -0.026  | -0.399  | 13.010  | 22.155  | 4.915   |
| 1.580  | 13.585   | -0.962   | 0.619    | 1.424   | 0.217   | 0.756   | 12.575  | 22.080  | 5.360   |
| 2.020  | 13.708   | -1.021   | 0.735    | 0.783   | -0.084  | 0.602   | 19.436  | 29.570  | 7.091   |
| 2.500  | 13.990   | -0.686   | 0.794    | 3.722   | 0.233   | -0.808  | 22.257  | 31.259  | 8.084   |
| 3.020  | 13.336   | -0.837   | 0.773    | 5.046   | 1.827   | 0.170   | 27.013  | 34.495  | 9.513   |
| 3.570  | 12.066   | -0.260   | 0.526    | 7.506   | 1.766   | -1.032  | 28.289  | 37.346  | 12.076  |
| 4.050  | 11.619   | -0.471   | 0.622    | 7.451   | 2.108   | 0.887   | 33.043  | 43.119  | 13.679  |
| 4.540  | 11.824   | -0.003   | 0.627    | 9.968   | 1.576   | -1.622  | 32.314  | 49.526  | 16.909  |
| 5.000  | 11.673   | -0.015   | 0.500    | 12.997  | -4.788  | -3.153  | 37.345  | 58.409  | 19.449  |
| 5.510  | 9.395    | 1.121    | -0.335   | 20.080  | -12.773   | -6.899  | 69.577  | 75.964  | 19.242  |
| 6.010  | 10.943   | -1.098   | -0.768   | -5.075  | -21.681   | 8.859   | 60.550  | 63.164  | 17.998  |
| 6.530  | 15.849   | -1.584   | -0.405   | -6.456  | -9.979  | 15.524  | 44.799  | 75.674  | 22.263  |
| 7.030  | 19.332   | -1.637   | -0.664   | -10.908   | -19.295   | 10.182  | 54.348  | 56.987  | 21.794  |
| 7.510  | 22.376   | -0.816   | -0.399   | -3.536  | -26.086   | -0.327  | 73.849  | 44.734  | 22.366  |
| 8.000  | 24.239   | -0.820   | -0.137   | -6.636  | -23.523   | 1.696   | 70.579  | 37.233  | 20.738  |
| 8.500  | 27.389   | -1.709   | -0.067   | -5.591  | -21.125   | -0.410  | 68.896  | 37.006  | 20.129  |
| 9.000  | 27.770   | -1.597   | 0.363    | -8.529  | -20.655   | 0.572   | 63.492  | 36.947  | 21.398  |
| 9.500  | 28.896   | -1.439   | 0.676    | -5.394  | -17.977   | -1.864  | 61.136  | 37.084  | 21.188  |
| 10.000 | 29.210   | -1.207   | 0.911    | -7.536  | -18.666   | -1.159  | 64.840  | 38.821  | 21.447  |
| 10.500 | 29.225   | -0.925   | 0.900    | -10.452   | -17.115   | 0.001   | 66.068  | 34.691  | 22.010  |
| 11.000 | 31.382   | -1.191   | 0.961    | -10.637   | -15.319   | -1.307  | 53.895  | 35.522  | 22.150  |
| 11.500 | 32.625   | -0.603   | 0.809    | -10.747   | -15.360   | -0.632  | 57.412  | 36.993  | 21.722  |
| 12.000 | 32.739   | -0.860   | -0.032   | 14.855  | -22.559   | 0.682   | 63.804  | 75.419  | 16.630  |
| 13.000 | 34.265   | -0.591   | 1.042    | -10.786   | -13.582   | -0.271  | 83.805  | 36.878  | 23.590  |
| 14.000 | 35.168   | -0.264   | 0.726    | -6.795  | -14.612   | -2.159  | 54.441  | 32.273  | 22.286  |
| 15.000 | 35.942   | 0.223    | 0.523    | -9.202  | -12.485   | -2.732  | 46.421  | 35.039  | 24.004  |
| 16.000 | 36.804   | 0.104    | 0.605    | -7.028  | -11.416   | -2.057  | 47.162  | 27.859  | 20.794  |
| 17.000 | 38.505   | 0.444    | 0.352    | -6.552  | -13.518   | -1.430  | 45.472  | 27.418  | 21.888  |
| 18.000 | 38.361   | 0.787    | 0.302    | -5.102  | -8.399  | -2.171  | 41.315  | 26.329  | 19.575  |
| 19.000 | 39.759   | 0.980    | -0.073   | -4.969  | -10.701   | -0.498  | 47.093  | 24.656  | 17.648  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T1

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.520  | 14.908   | 0.127    | 0.202    | 0.036   | -3.054  | -0.089   | 28.710  | 25.210  | 5.498   |
| 1.050  | 15.487   | -0.414   | 0.396    | -0.742  | -3.584  | 0.326  | 25.482  | 27.918  | 7.014   |
| 1.580  | 16.919   | -0.453   | 0.209    | 1.961   | -4.571  | -0.066   | 50.455  | 37.069  | 9.556   |
| 2.060  | 16.706   | -0.456   | 0.509    | -2.627  | -6.357  | 0.079  | 37.754  | 33.398  | 9.100   |
| 2.550  | 17.480   | 0.003    | 0.571    | 2.111   | -7.809  | -0.203   | 32.840  | 35.341  | 12.955  |
| 3.000  | 17.919   | 0.024    | 0.353    | -0.339  | -8.745  | 0.488  | 37.439  | 33.323  | 12.146  |
| 4.060  | 18.916   | -0.081   | 0.549    | 2.102   | -9.885  | 0.102  | 39.469  | 35.403  | 16.207  |
| 5.030  | 19.148   | -0.409   | 1.059    | 2.973   | -9.765  | 0.425  | 43.839  | 36.498  | 16.124  |
| 6.020  | 20.899   | 0.266    | 0.733    | 1.486   | -11.804   | -0.215   | 40.887  | 33.147  | 17.605  |
| 7.020  | 22.223   | -0.314   | 0.815    | -0.485  | -14.071   | 0.069  | 48.304  | 33.778  | 18.948  |
| 8.030  | 23.308   | -0.408   | 0.999    | -3.646  | -13.946   | 0.416  | 56.957  | 38.098  | 18.226  |
| 9.060  | 24.043   | -0.242   | 0.982    | 0.677   | -14.483   | -0.459   | 51.296  | 37.967  | 21.815  |
| 10.050 | 25.134   | -0.239   | 1.176    | -1.340  | -15.129   | 1.296  | 54.307  | 37.006  | 20.981  |
| 11.050 | 26.168   | 0.330    | 0.909    | 4.272   | -14.654   | -0.194   | 53.099  | 42.494  | 20.940  |
| 12.070 | 27.212   | -0.124   | 1.012    | 0.271   | -16.408   | 0.003  | 55.489  | 42.129  | 24.703  |
| 13.060 | 27.073   | -0.182   | 1.235    | 1.790   | -12.746   | -0.195   | 64.162  | 41.082  | 20.778  |
| 14.030 | 28.910   | -0.605   | 0.990    | -2.068  | -13.186   | -0.637   | 52.260  | 38.344  | 20.528  |
| 15.070 | 29.368   | -0.098   | 1.066    | 0.162   | -12.480   | -0.167   | 59.464  | 42.906  | 21.823  |
| 16.060 | 30.501   | -0.244   | 0.811    | -0.620  | -13.178   | -1.260   | 48.699  | 37.076  | 20.703  |
| 17.020 | 31.927   | -0.061   | 0.666    | 0.767   | -12.955   | -2.524   | 49.742  | 34.911  | 22.957  |
| 18.060 | 33.158   | 0.020    | 0.232    | -1.701  | -10.456   | 0.417  | 45.050  | 33.203  | 21.429  |
| 19.070 | 33.700   | 0.012    | 0.199    | 1.111   | -9.916  | -0.856   | 42.877  | 29.823  | 17.354  |

## ΘΕΣΗ (POSITION) T2

| z (cm) | u (cm/s) | v (cm/s) | w (cm/s) | $\langle u'v' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'w' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle vw' \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle u'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle v'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) | $\langle w'^2 \rangle$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|--------|----------|----------|----------|---|---|--|---|---|---|
| 0.570  | 19.572   | -0.697   | 0.247    | -1.309  | -1.541  | -1.240   | 31.926  | 29.856  | 4.921   |
| 1.060  | 21.692   | -0.292   | 0.618    | 2.157   | -3.285  | -1.251   | 52.777  | 62.530  | 8.005   |
| 1.530  | 21.807   | -0.690   | 0.542    | -0.450  | -3.080  | -0.691   | 40.591  | 44.875  | 8.947   |
| 2.060  | 21.594   | -0.196   | 0.880    | -0.565  | -5.540  | -0.011   | 42.277  | 45.680  | 10.432  |
| 2.550  | 22.589   | -0.488   | 0.803    | -1.244  | -4.802  | -1.160   | 40.980  | 43.496  | 11.012  |
| 3.080  | 22.091   | -0.105   | 0.927    | -0.368  | -6.254  | 0.126  | 39.611  | 39.786  | 13.016  |
| 4.080  | 23.433   | -0.084   | 1.331    | -0.966  | -4.498  | 0.416  | 51.035  | 48.039  | 15.010  |
| 5.020  | 23.217   | -0.259   | 1.472    | -0.200  | -7.410  | -0.680   | 44.377  | 40.097  | 15.340  |
| 6.070  | 23.238   | -0.100   | 1.742    | 1.358   | -6.547  | 0.865  | 43.196  | 38.214  | 16.188  |
| 7.020  | 24.067   | -0.386   | 1.585    | -2.746  | -6.357  | 1.306  | 41.955  | 39.677  | 15.999  |
| 8.050  | 24.301   | -0.078   | 2.177    | 0.601   | -9.486  | 0.663  | 47.762  | 45.077  | 19.944  |
| 9.040  | 25.194   | 0.040    | 1.971    | 1.344   | -8.396  | -0.238   | 42.084  | 42.984  | 20.801  |
| 10.010 | 25.558   | -0.221   | 2.045    | -1.353  | -11.021   | 1.897  | 51.305  | 41.671  | 19.956  |
| 11.050 | 26.016   | -0.048   | 1.525    | 1.203   | -9.911  | -0.136   | 48.777  | 41.688  | 19.654  |
| 12.010 | 26.536   | -0.114   | 1.330    | -1.088  | -9.591  | -0.930   | 52.059  | 39.570  | 19.491  |
| 13.020 | 26.686   | -0.106   | 1.410    | 1.477   | -9.842  | 1.168  | 78.175  | 50.890  | 19.134  |
| 14.020 | 27.947   | -0.301   | 1.254    | 0.718   | -9.317  | 0.074  | 51.532  | 41.077  | 19.628  |
| 15.020 | 28.288   | -0.431   | 1.337    | 3.964   | -11.848   | -0.980   | 59.251  | 53.397  | 21.072  |
| 16.010 | 29.470   | -0.580   | 0.742    | -1.063  | -11.070   | -1.405   | 52.320  | 39.290  | 19.533  |
| 17.050 | 28.943   | -0.225   | 0.569    | -0.522  | -9.795  | -0.166   | 46.373  | 38.456  | 18.645  |
| 18.030 | 31.118   | -0.214   | 0.421    | -2.934  | -8.142  | 0.279  | 50.083  | 37.909  | 17.752  |
| 19.060 | 30.770   | 0.120    | 0.087    | -4.710  | -7.942  | 0.528  | 43.798  | 35.034  | 16.568  |