

Εργαλεία προσομοίωσης για υδροστροβίλους δράσης

Κουκουβίνης Φοίβος, Αναγνωστόπουλος Ιωάννης, Παπαντώνης Δημήτριος
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ / Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, 15780 Αθήνα
fivoskouk@gmail.com, j.anagno@fluid.mech.ntua.gr, papan@fluid.mech.ntua.gr



Δομή της παρουσίασης

- Εισαγωγή: γενικά για υδροστροβίλους
- Μέθοδοι προσομοίωσης
- Μέθοδος Smoothed Particle Hydrodynamics – Δοκιμές - Εφαρμογές σε υδροστροβίλους δράσης
- Άλλα λογισμικά (Fluent, OpenFOAM, αλγόριθμος ψευδοσυμπιεστότητας) – εφαρμογές
- Σύνοψη/Επίλογος



Εισαγωγή

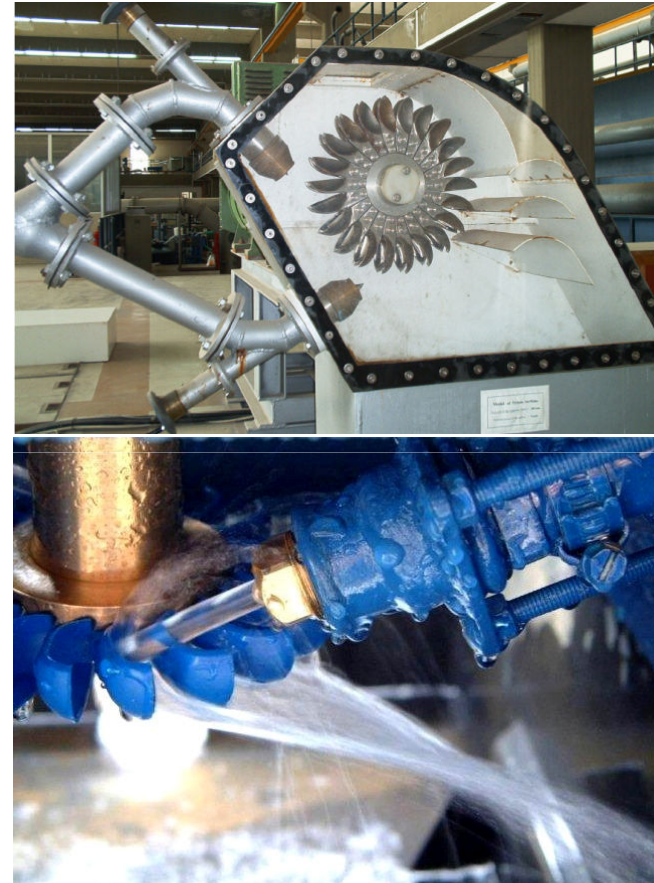
Υδροστρόβιλοι, χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες :

- Δράσης (*action, impulse*)
- Αντίδρασης (*reaction*)

- Υδροστρόβιλοι δράσης : δέσμη νερού υψηλής ταχύτητας προσκρούει σε περιστρεφόμενο δρομέα κατάλληλης γεωμετρίας. Η δέσμη διαμορφώνεται από ακροφύσιο προσαρμοσμένο στο περίβλημα του δρομέα

-Ο δρομέας αλλάζει την κατεύθυνση της δέσμης του νερού, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή. Η κινητική ενέργεια της δέσμης μετατρέπεται σε έργο.

- Η πίεση του νερού πριν και μετά τον δρομέα δεν αλλάζει. Ο υδροστρόβιλος λειτουργεί σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον.

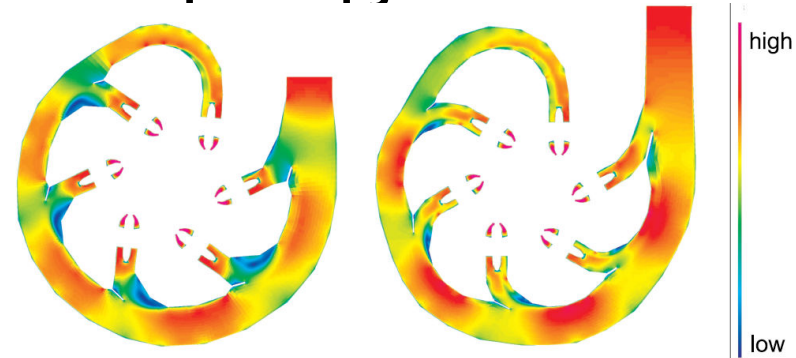


Υδροστρόβιλοι δράσης :
πάνω υδροστρόβιλος Pelton, κάτω υδροστρόβιλος Turgo

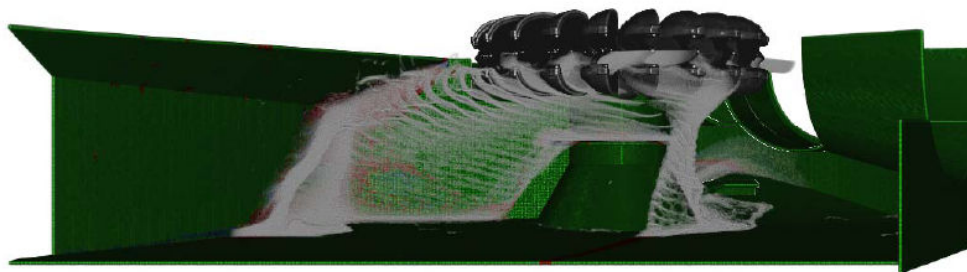


Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός υδροστροβίλου δράσης

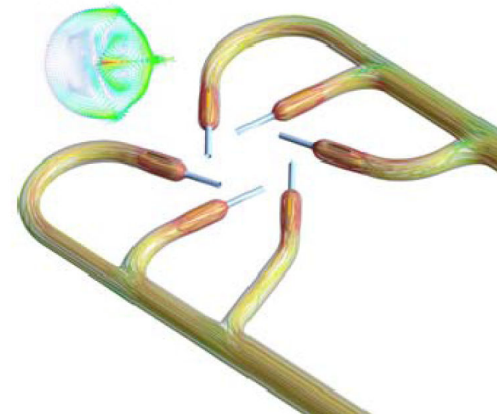
- Αγωγός προσαγωγής/διανομέας της ροής στα ακροφύσια
- Γεωμετρία ακροφυσίου
- Αλληλεπίδραση δέσμης νερού με:
 - τον περιβάλλοντα αέρα
 - τον δρομέα
 - το περίβλημα του υδροστροβίλου



Βελτιστοποίηση γεωμετρίας διανομέα Pelton
(πηγή Voith – Siemens)



Προσομοίωση δρομέα και περιβλήματος
υδρ/βίλου Pelton (πηγή Andritz Hydro)



Προσομοίωση διανομέα και ακροφυσίων
υδρ/βίλου Pelton (πηγή Andritz Hydro)



Μέθοδοι προσομοίωσης (1)

Όλες οι μέθοδοι προσομοίωσης βασίζονται στην διακριτοποίηση του χώρου και χρόνου προκειμένου να επιλυθούν οι εξισώσεις Navier – Stokes.

Χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες :

-Με βάση την κίνηση των υπολογιστικών στοιχείων

←
Lagrangian :

Τα υπολογιστικά στοιχεία κινούνται στον χώρο και παρακολουθούν την ροή.

→
Eulerian :

Τα υπολογιστικά στοιχεία παραμένουν ακίνητα.

→
ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) :

Υβρίδιο των προηγούμενων μεθόδων, τα υπολογιστικά στοιχεία μπορούν να κινηθούν με αυθαίρετο τρόπο.

-Με βάση την συνδεσιμότητα των υπολογιστικών στοιχείων :

←
Πλεγματικές :

Η συνδεσιμότητα μεταξύ των υπολογιστικών στοιχείων δεν αλλάζει

→
Μη πλεγματικές :

Τα υπολογιστικά στοιχεία είναι ασύνδετα μεταξύ τους



Μέθοδοι προσομοίωσης (2)

Στην υπολογιστική ρευστομηχανική χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον **Eulerian**

πλεγματικές μέθοδοι :

Πλεονεκτήματα:

- Κατάλληλες σε έγκλειστες ροές/ροές με σταθερά όρια (ροές σε ακροφύσια, σωλήνες κλπ.)
- Έχουν μεγάλη ιστορία και έχουν εξελιχθεί αρκετά, αποτελούν ώριμη μέθοδο προσομοίωσης με αποδεδειγμένη αξιοπιστία. Χρησιμοποιούνται από εμπορικά προγράμματα (Fluent, CFX κλπ.) και προγράμματα ανοιχτού κώδικα (OpenFOAM, Code Saturne, κλπ.) για την προσομοίωση ροής.

Μειονεκτήματα:

- Δεν μπορούν να διαχειριστούν εύκολα ροές με ασυνέχειες (π.χ. ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ νερού και αέρα)
- Δύσκολη/χρονοβόρα προσομοίωση γεωμετριών με κινούμενα τοιχώματα.

Lagrangian, μη πλεγματικές μέθοδοι :

Πλεονεκτήματα:

- Εύκολη προσομοίωση προβλημάτων με κινούμενες/μεταβαλλόμενες γεωμετρίες, διεπιφάνειες. Κατάλληλες για προσομοίωση υδροστροβίλων δράσης.

Μειονεκτήματα:

- Σχετικά πρόσφατες, δεν έχουν μελετηθεί πλήρως, βρίσκονται ακόμα σε φάση διερεύνησης και ανάπτυξης.



Μεθοδολογία για την προσομοίωση υδροστροβίλων δράσης

- Για την προσομοίωση υδροστροβίλων δράσης αναπτύχθηκε στο εργαστήριο υδροδυναμικών μηχανών αλγόριθμος που βασίζεται στην μέθοδο **SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)**. *Lagrangian, μη πλεγματική* μέθοδος.
- Αρχικά η μέθοδος SPH αναπτύχθηκε από τους Lucy, Gingold και Monaghan (1977) για την επίλυση προβλημάτων αστροφυσικής. Επεκτάθηκε στην προσομοίωση συμπεριφοράς ρευστών και στερεών
- Το περιγραφόμενο μέσο χωρίζεται σε ένα πεπερασμένο σύνολο υπολογιστικών στοιχείων που ονομάζονται σωματίδια (particles). Τα σωματίδια έχουν μάζα, καταλαμβάνουν όγκο και φέρουν τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του μέσου.



Smoothed Particle Hydrodynamics (1)

Η γενική ιδέα

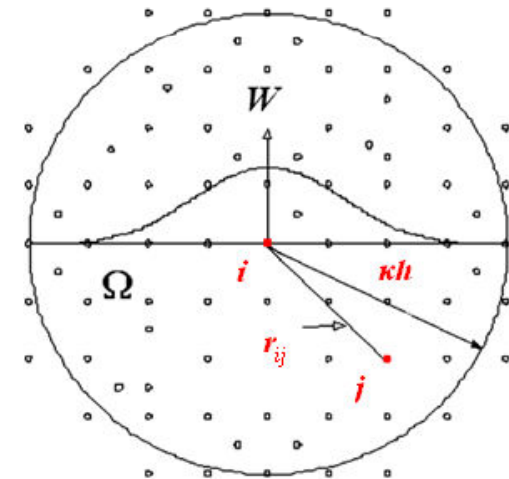
- Οι εξισώσεις ροής μπορούν να εκφραστούν χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις αθροισμάτων σε συνδυασμό με μια συνάρτηση ομαλοποίησης (smoothing kernel function, W), για ένα χαρακτηριστικό μήκος ομαλοποίησης (smoothing length, h)

$$f(x_i) = \int_{\Omega} f(x') \cdot \delta(x - x') dx' \cong \int_{\Omega} f(x') \cdot W(x - x', h) dx' \Rightarrow$$

$$f(x_i) \cong \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot W(x_i - x_j, h)$$

$$\nabla f_i \approx \frac{1}{\rho_i} \sum_j m_j (f_j - f_i) \nabla_i W_{ij}$$

$$\nabla f_i \approx \rho_i \sum_j m_j \left(\frac{f_i}{\rho_i^2} + \frac{f_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij}$$



Smoothed Particle Hydrodynamics (2)

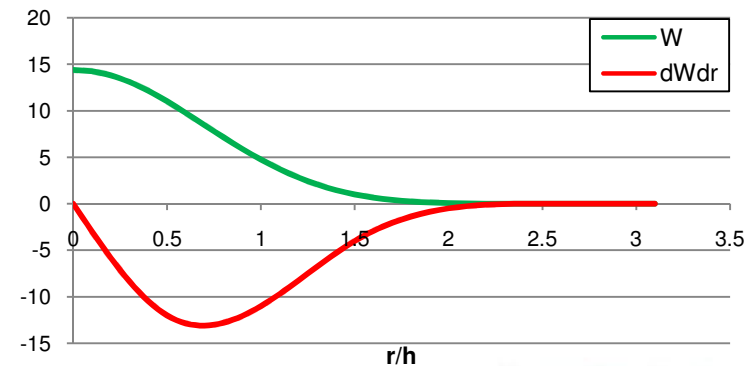
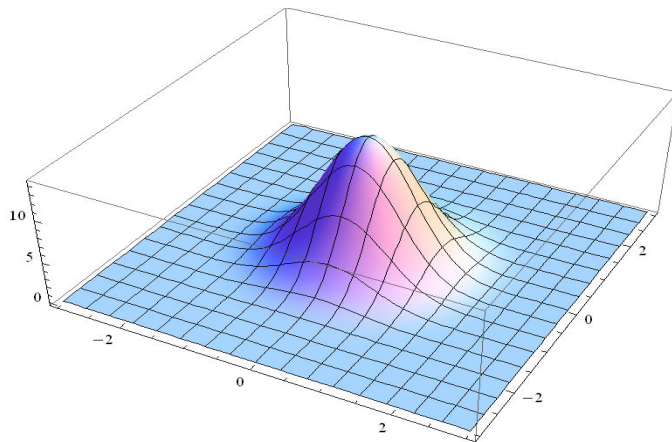
Η συνάρτηση ομαλοποίησης W

Η συνάρτηση ομαλοποίησης
παίζει σημαντικό ρόλο στην
ακρίβεια των αποτελεσμάτων
της μεθόδου SPH

Χρησιμοποιήθηκε η Spline 4^{ης}
τάξης

$$W(r) = A(h^d) \cdot \begin{cases} \left(\frac{5}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 - 5\left(\frac{3}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 + 10\left(\frac{1}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 & 0 \leq \frac{r}{h} < 0.5 \\ \left(\frac{5}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 - 5\left(\frac{3}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 & 0.5 \leq \frac{r}{h} < 1.5 \\ \left(\frac{5}{2} - \frac{r}{h}\right)^4 & 1.5 \leq \frac{r}{h} < 2.5 \\ 0 & 2.5 \leq \frac{r}{h} \end{cases}$$

$$A(h^1) = \frac{1}{24h} \quad A(h^2) = \frac{96}{1199\pi \cdot h^2} \quad A(h^3) = \frac{1}{20\pi \cdot h^3}$$



Smoothed Particle Hydrodynamics (3)

Έκφραση των εξισώσεων

Οι εξισώσεις Navier – Stokes :

Αναλυτικές εξισώσεις:

Συνέχεια
$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$$

Ορμή
$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{body}$$

Εκφρασμένες εξισώσεις κατά SPH :

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}$$

$$\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = -\sum_j m_j \left[\left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla_i W_{ij} - \Pi_{ij} \right] + \mathbf{f}_{body}$$

Π_{ij} όρος ιξώδους (Morris):

$$\Pi_{ij} = \frac{(\mu_i + \mu_j) \cdot \mathbf{u}_{ij}}{\rho_i \rho_j} \left(\frac{1}{\|r_{ij}\|} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_i} \right)$$



Smoothed Particle Hydrodynamics (4)

Ολοκλήρωση του συστήματος των Δ.Ε.

- Υπόθεση ότι το ρευστό συμπεριφέρεται σαν ασθενώς συμπιεστό. Η εκτίμηση της πίεσης γίνεται από την πυκνότητα, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη καταστατική εξίσωση (Tait).

$$p_i = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right]$$

- Χρήση φίλτρου για την ομαλοποίηση του πεδίου της πυκνότητας/πίεσης.
- Μετακίνηση σωματιδίων με την τεχνική XSPH:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_i = u_i - \varepsilon \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (u_i - u_j) W_j \quad \varepsilon \leq 0.3$$

- Για την επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων, χρησιμοποιείται μέθοδος Runge - Kutta 4^{ης} τάξης.



Smoothed Particle Hydrodynamics (5)

Οριακές συνθήκες

- Τα τοιχώματα αντιμετωπίζονται με ένα στρώμα σωματιδίων τοιχώματος, το οποίο εξασκεί απωστική δύναμη σε όσα σωματίδια ρευστού πλησιάσουν στο τοίχωμα.

$$\vec{f} = D \left[\left(\frac{r_0}{\|r\|} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{\|r\|} \right)^6 \right] \cdot \frac{\vec{r}}{\|r\|^2} \quad [m/s^2] \quad \frac{r_0}{\|r\|} \leq 1$$

- Η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων τοιχώματος είναι μικρότερη από την απόσταση μεταξύ των σωματιδίων ρευστού, προκειμένου να διαμορφωθεί ένα όσο το δυνατό ομαλότερο απωστικό πεδίο.



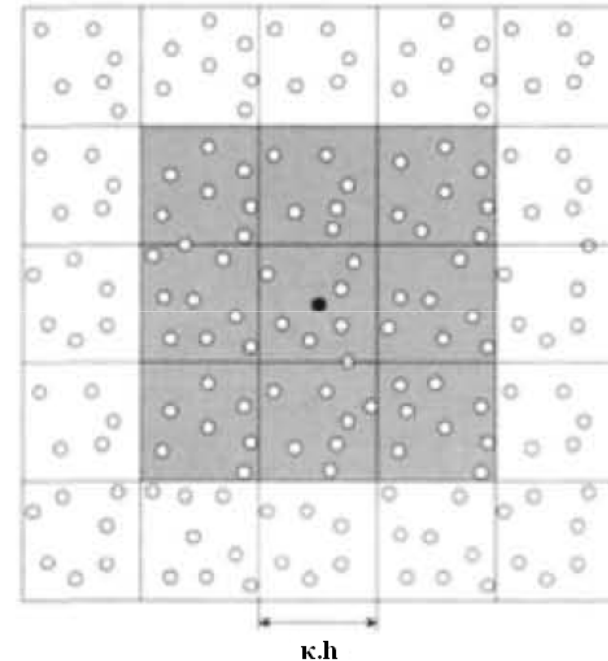
- Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει επίπεδο συμμετρίας, μόνο ένα συμμετρικό τμήμα του προβλήματος λύνεται. Στο επίπεδο συμμετρίας επιβάλλονται οριακές συνθήκες συμμετρίας.



Smoothed Particle Hydrodynamics (6)

Εύρεση γειτονικών σωματιδίων

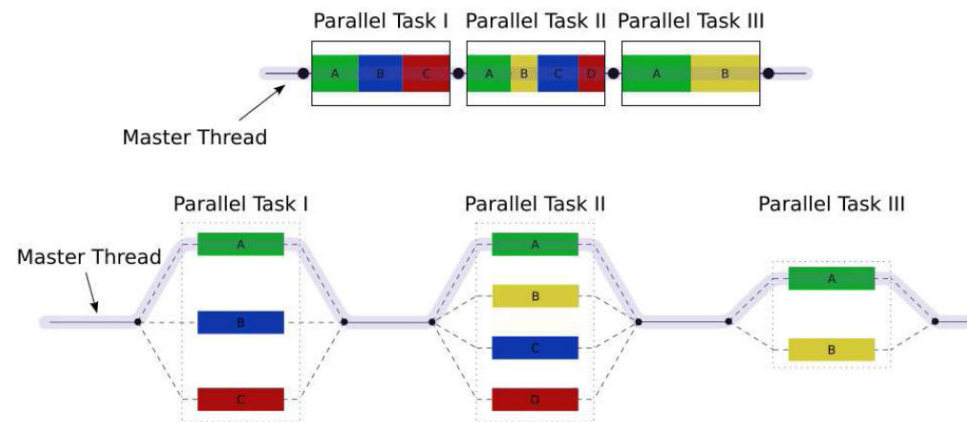
- Για τον υπολογισμό των προσεγγίσεων αθροισμάτων απαιτείται η αλληλεπίδραση του σωματιδίου i με όλα τα γειτονικά του σωματίδια j .
- Υπολογισμός όλων των αλληλεπιδράσεων έχει υπολογιστικό κόστος $N \times N$.
- Επειδή η συνάρτηση πυρήνα έχει πεπερασμένη ακτίνα δράσης, μόνο τα γειτονικά σωματίδια, σε ακτίνα $\kappa \cdot h$ λαμβάνουν μέρος στις αλληλεπιδράσεις.
- Χρήση πλέγματος για Linked-List. Μείωση υπολογιστικού κόστους σε $N \times \log(N)$



Smoothed Particle Hydrodynamics (7)

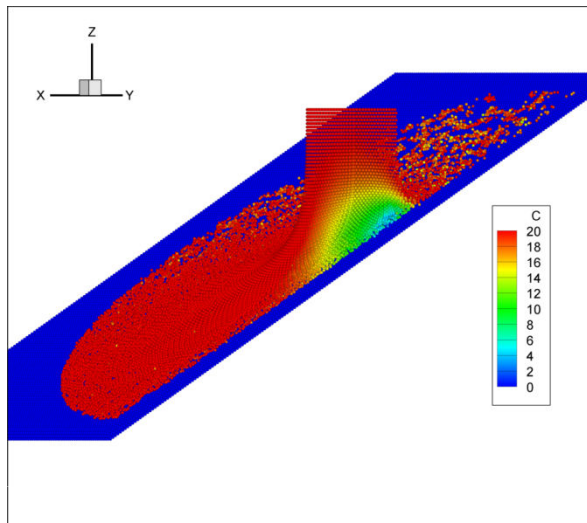
Παράλληλη επεξεργασία

- Η παράλληλη επεξεργασία μπορεί να μειώσει δραματικά τον απαιτούμενο χρόνο για εκτέλεση του αλγορίθμου.
- Οι αλληλεπίδρασεις μεταξύ των σωματιδίων μπορούν να υπολογιστούν ανεξάρτητα για κάθε σωματίδιο => Εύκολη η μετατροπή του αλγορίθμου για *παραλληλισμό κοινής μνήμης (shared memory parallel)* με OpenMP directives.
- Αξιοποίηση διαθέσιμης υπολογιστικής δύναμης (Dell Cluster με 41 υπολογιστές 8-16CPU έκαστος, καθ. Κ. Γιαννάκογλου)

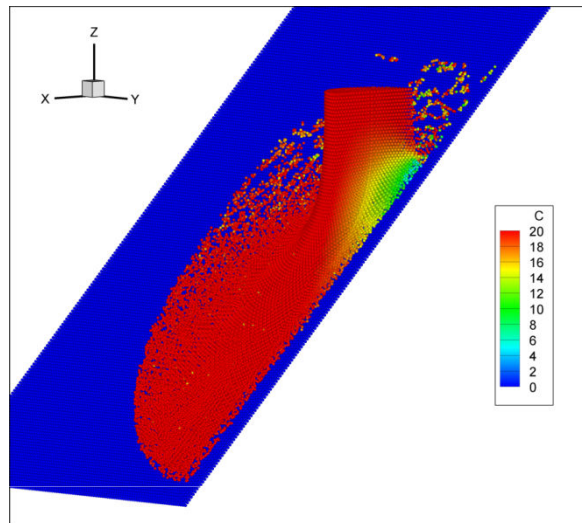


Δοκιμές της μεθόδου

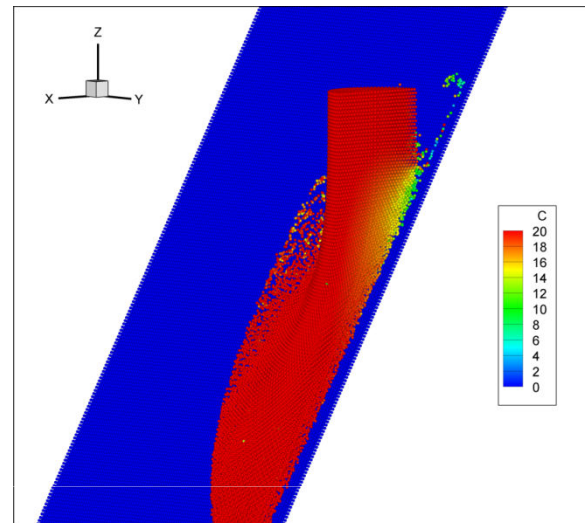
Πρόσκρουση δέσμης σε επίπεδη πλάκα



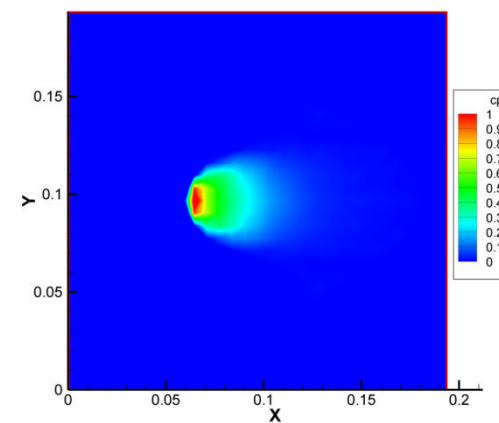
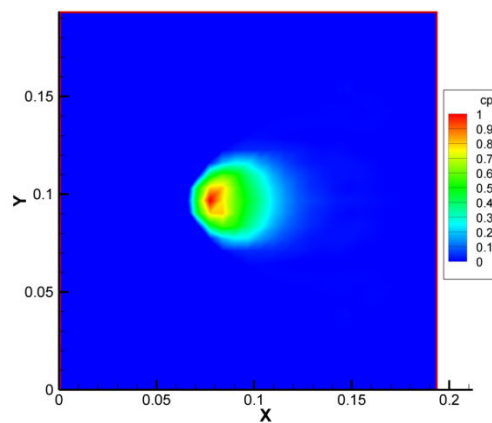
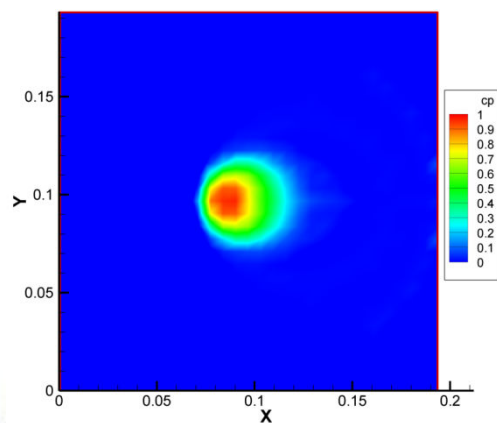
60°



45°



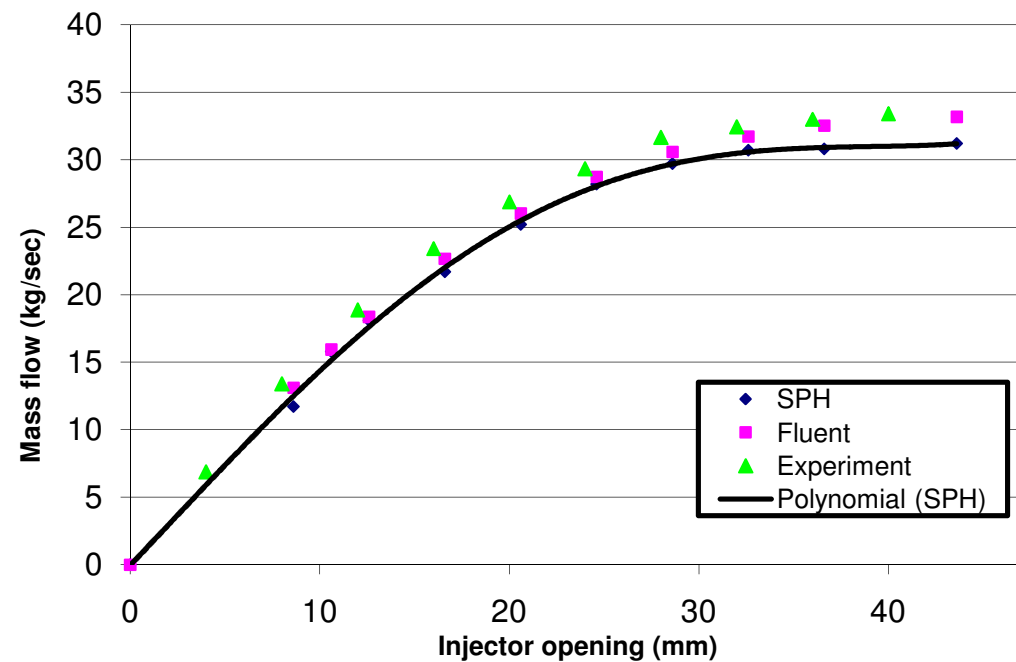
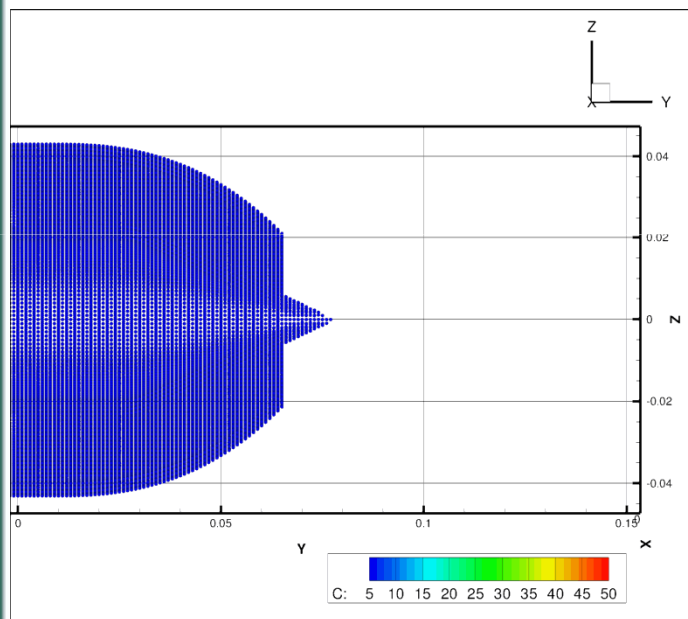
30°



Εφαρμογές της μεθόδου (1)

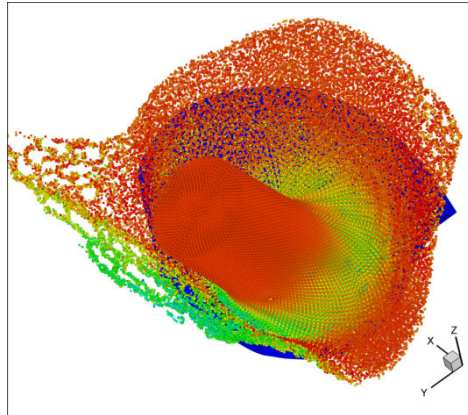
Ροή σε ακροφύσιο υδροστροβίλου Pelton

Προσομοίωση για ολική πίεση 10bar και διάφορα ανοίγματα ακροφυσίου

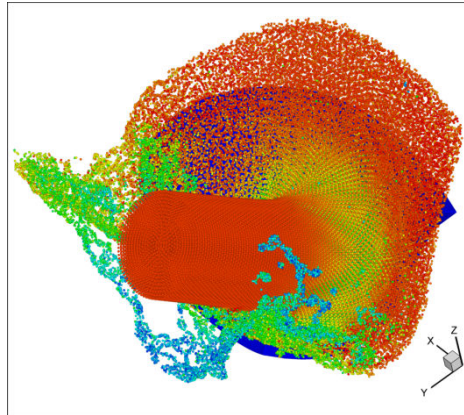


Εφαρμογές της μεθόδου (2)

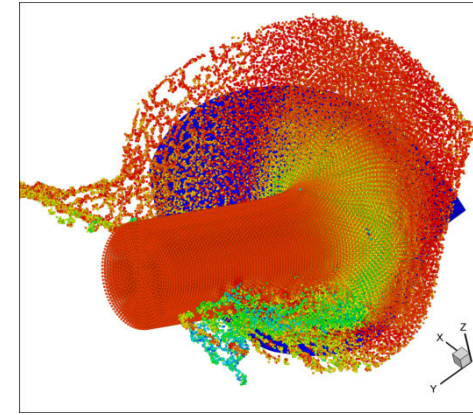
Προσομοίωση ροής σε ακίνητο πτερύγιο Turgo και ακίνητο σκαφίδιο Pelton



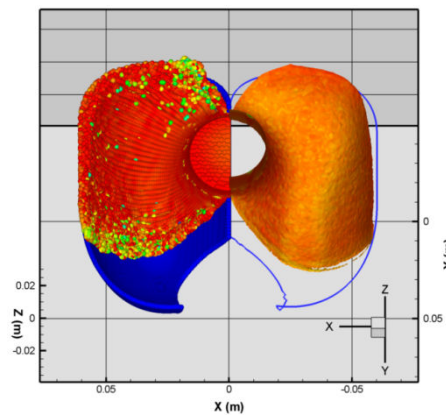
30°



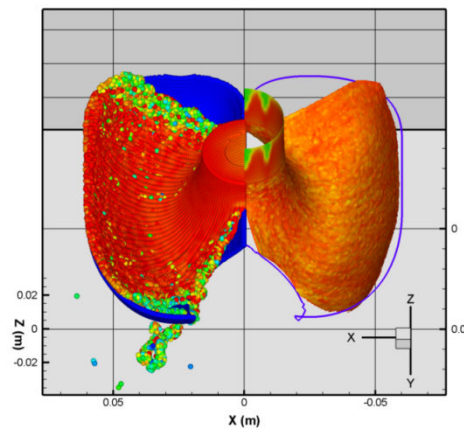
47°



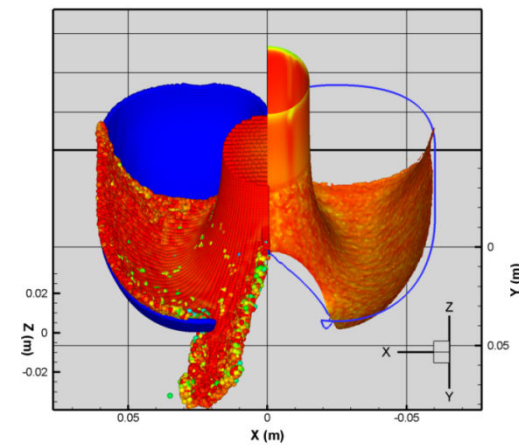
60°



60°



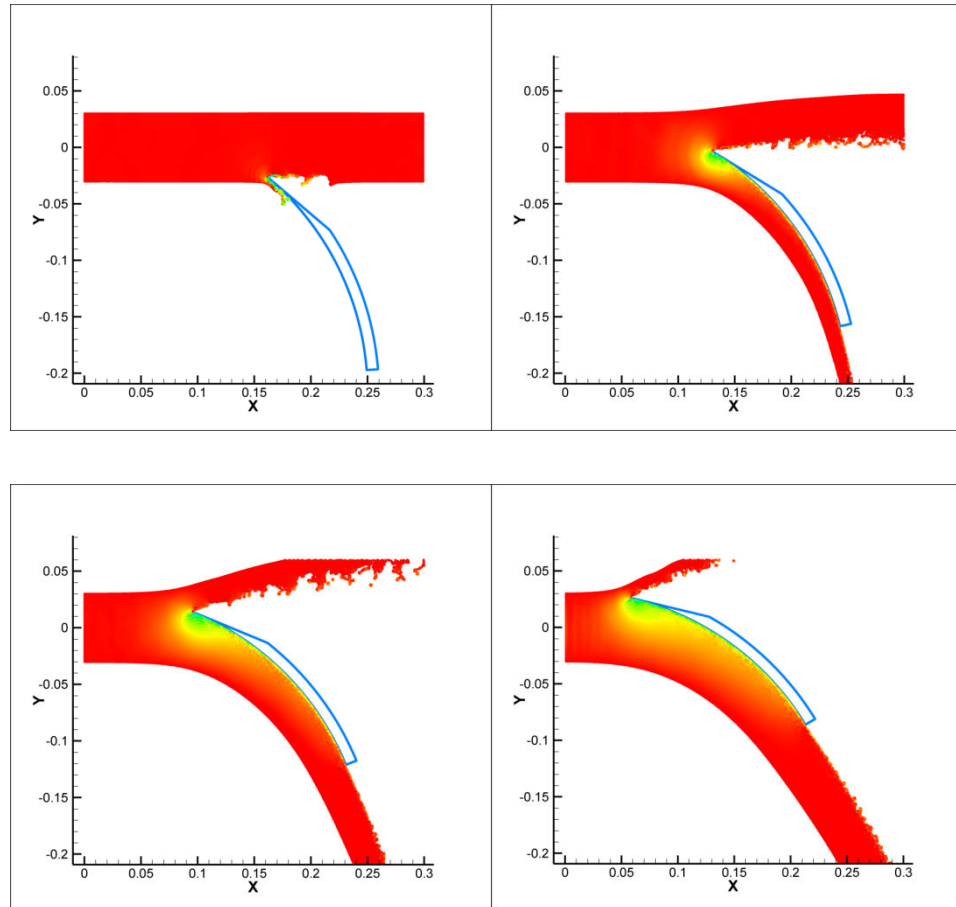
90°



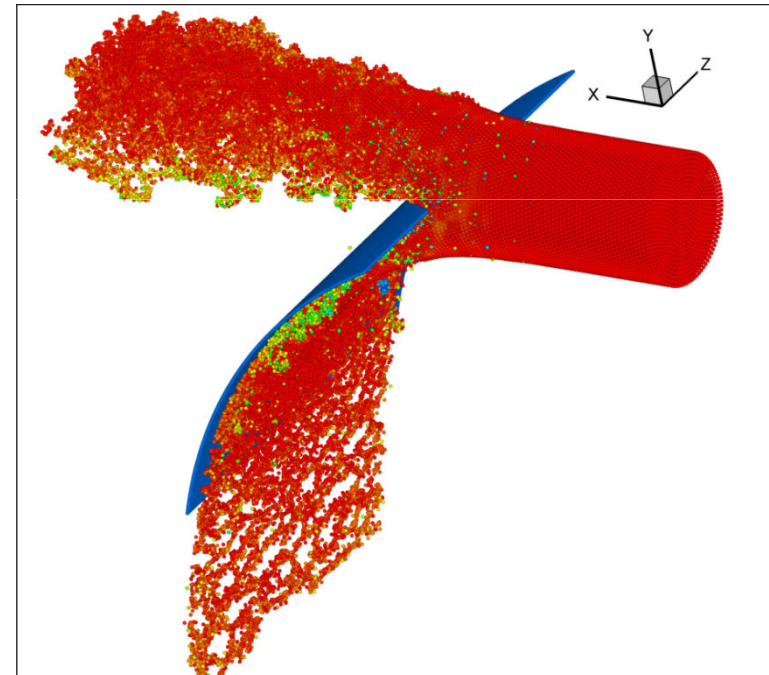
120°



Εφαρμογές της μεθόδου (3) Εκτροπέας δέσμης υδροστροβίλου

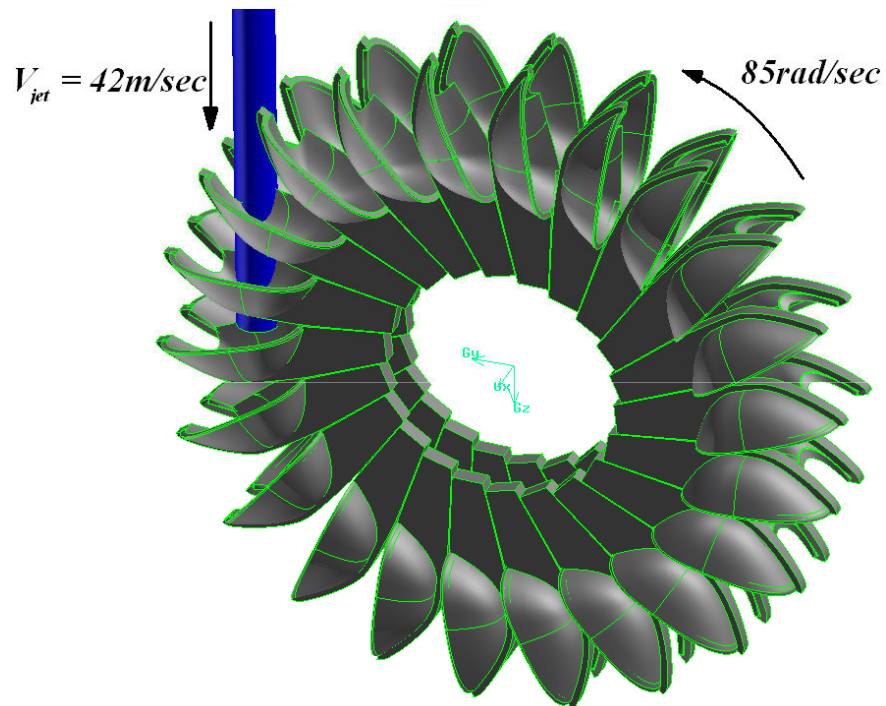


Έντονη επίδραση του εκτροπέα στην
υπόλοιπη δέσμη, πέραν του
εκτρεπόμενου τμήματος

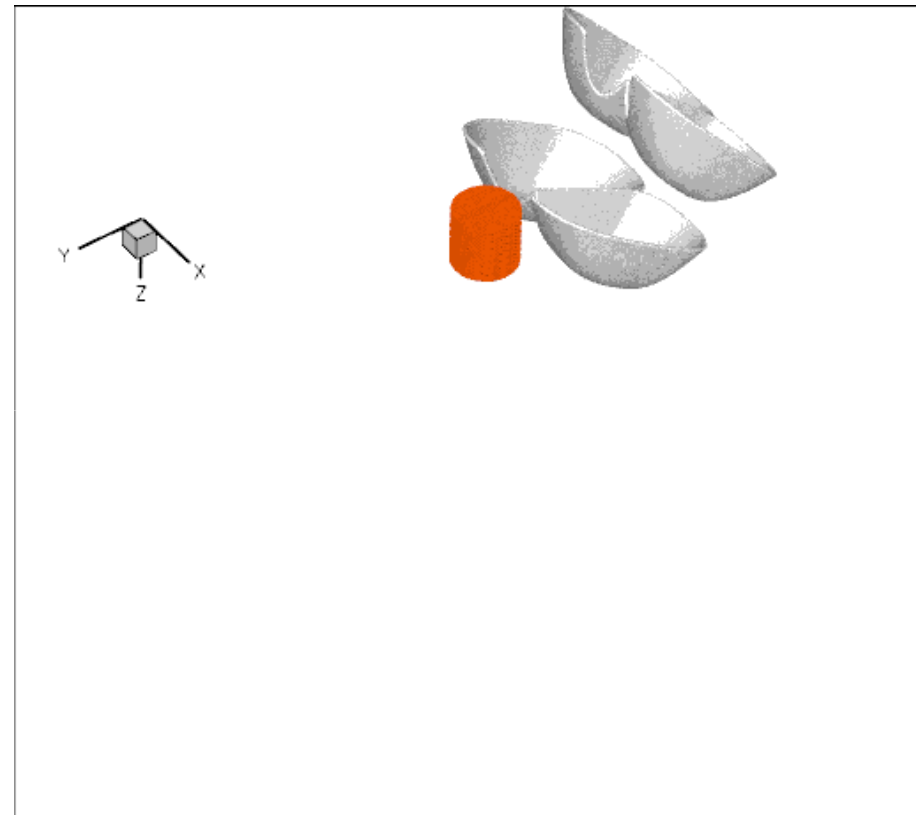


Εφαρμογές της μεθόδου (4)

Προσομοίωση υδροστροβίλου Pelton

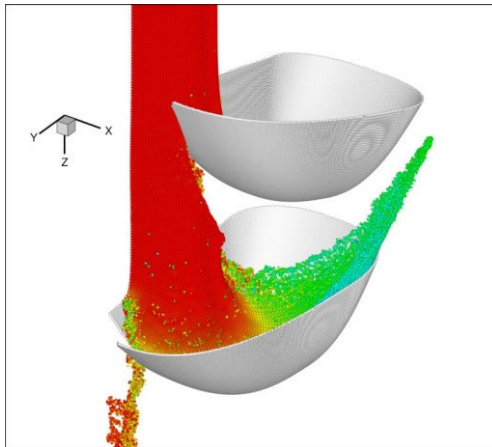


Δρομέας Pelton

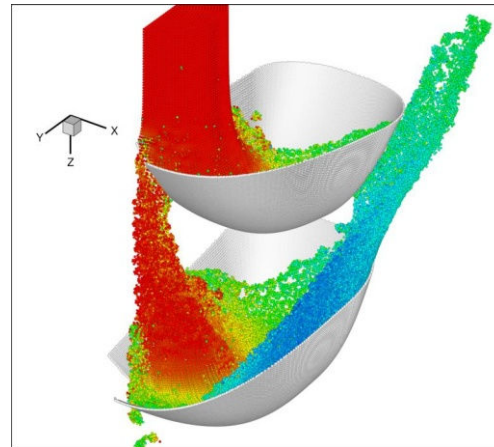


Εφαρμογές της μεθόδου (5)

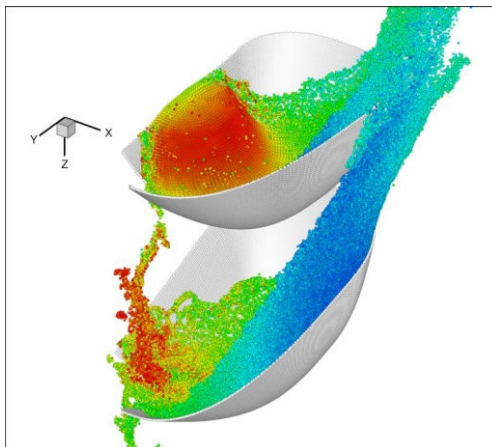
Προσομοίωση υδροστροβίλου Pelton



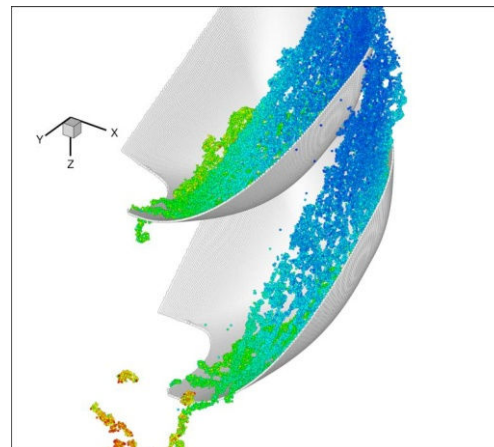
Time = 6msec



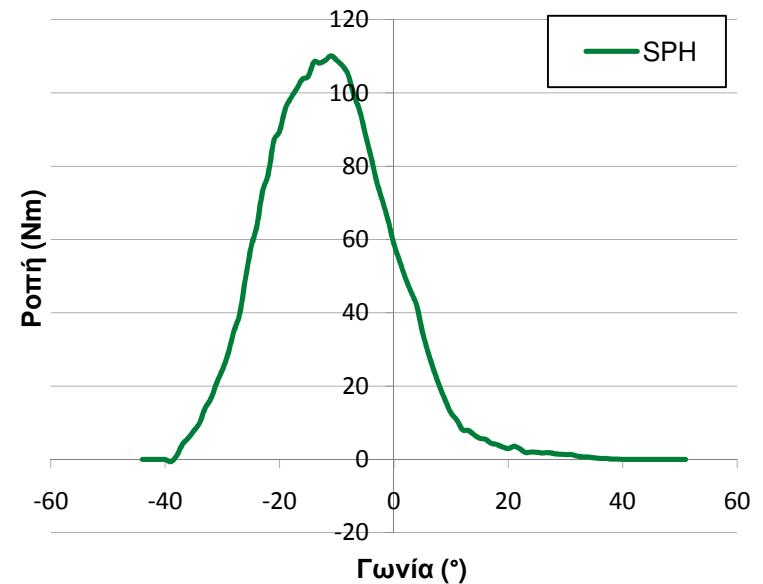
Time = 8msec



Time = 10msec

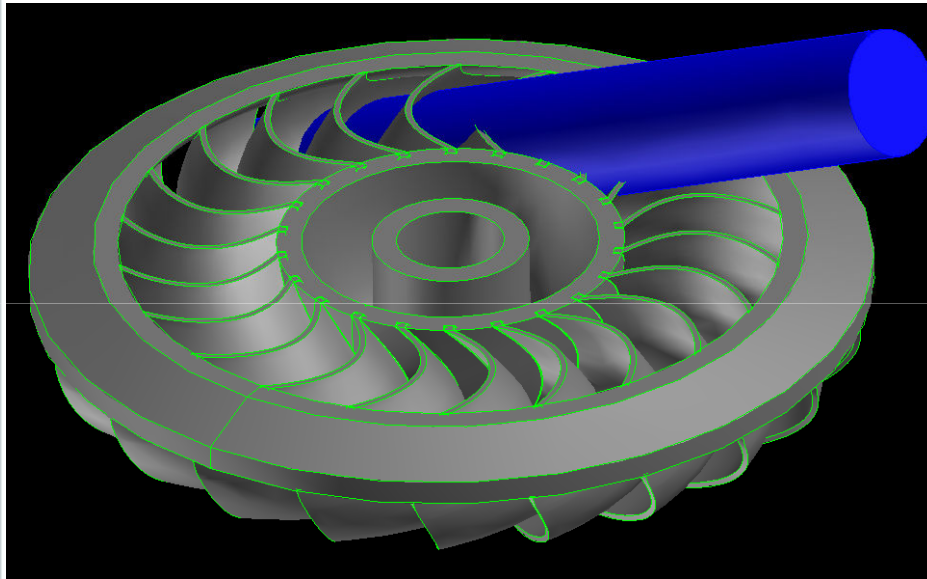


Time = 14msec

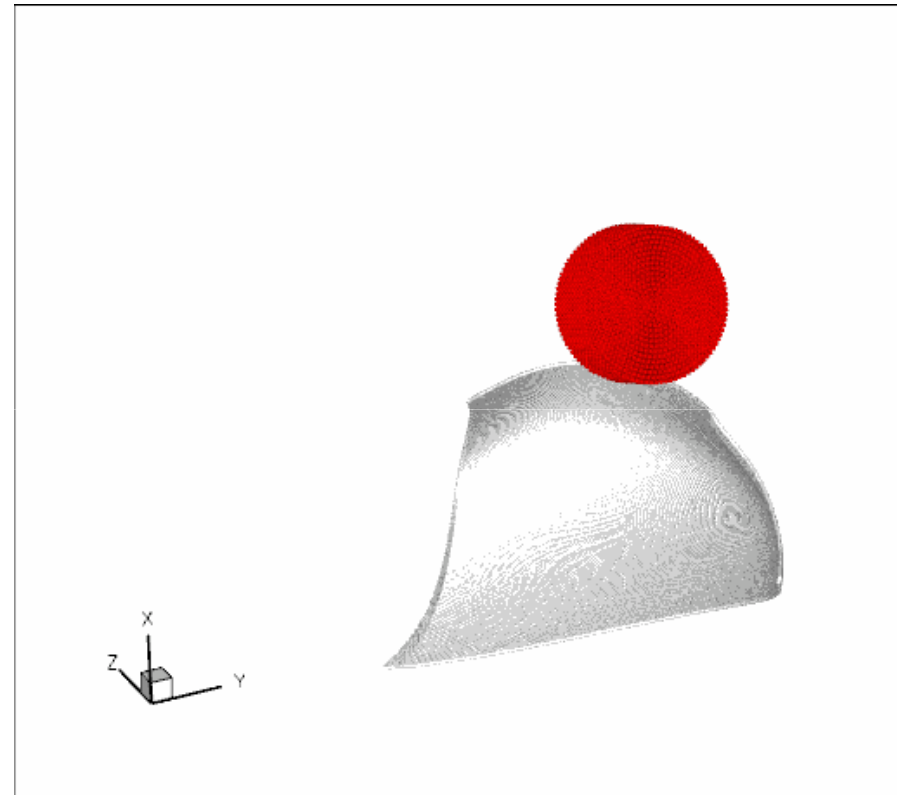


Εφαρμογές της μεθόδου (6)

Προσομοίωση υδροστροβίλου Turgo

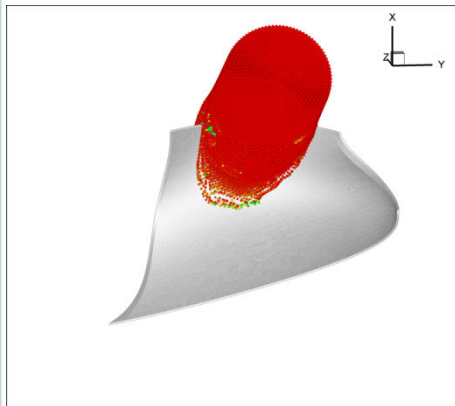


Δρομέας Turgo

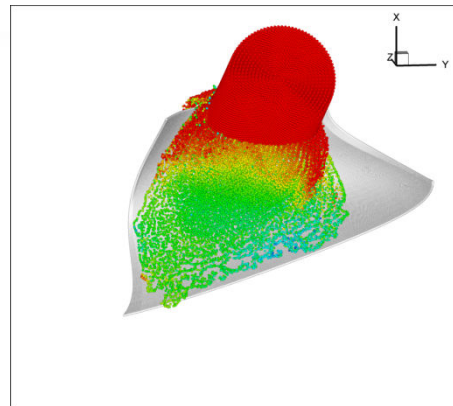


Εφαρμογές της μεθόδου (7)

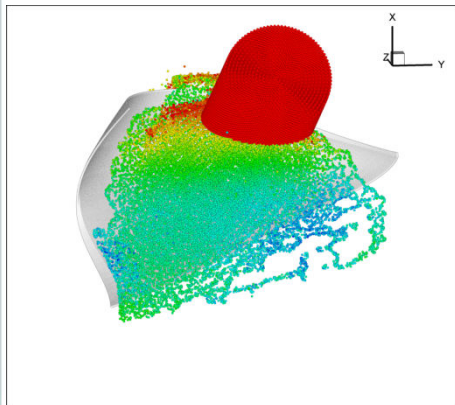
Προσομοίωση υδροστροβίλου Turgo



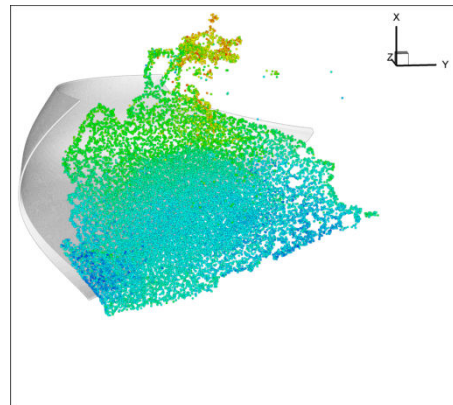
Time = 8.4msec



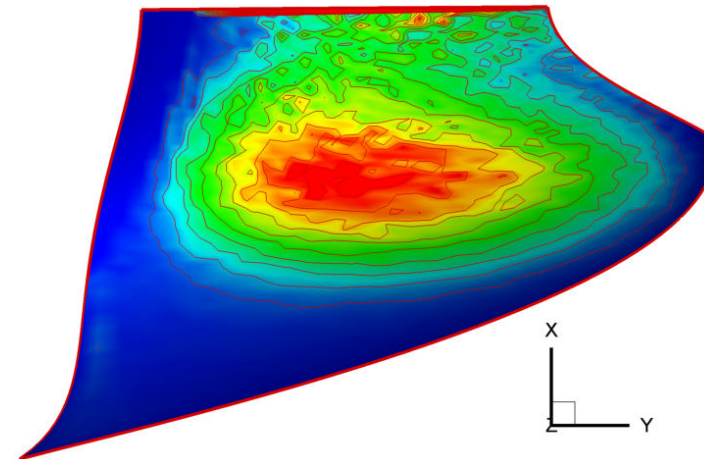
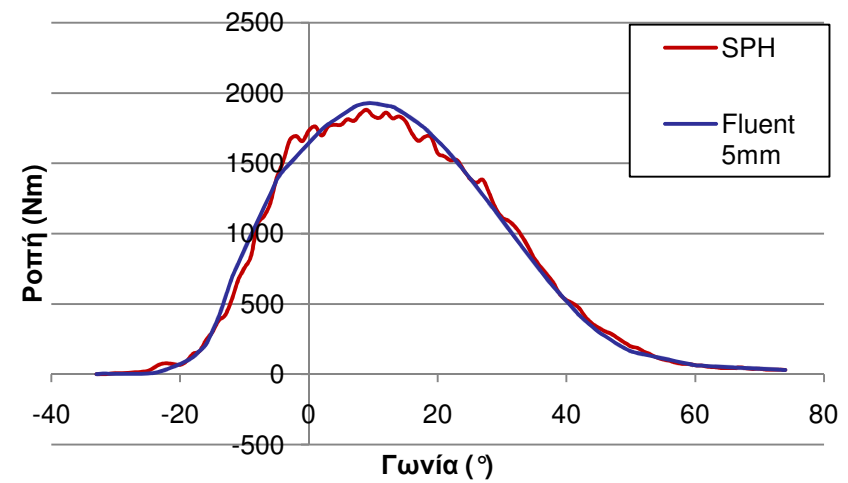
Time = 16.8msec



Time = 25.2msec

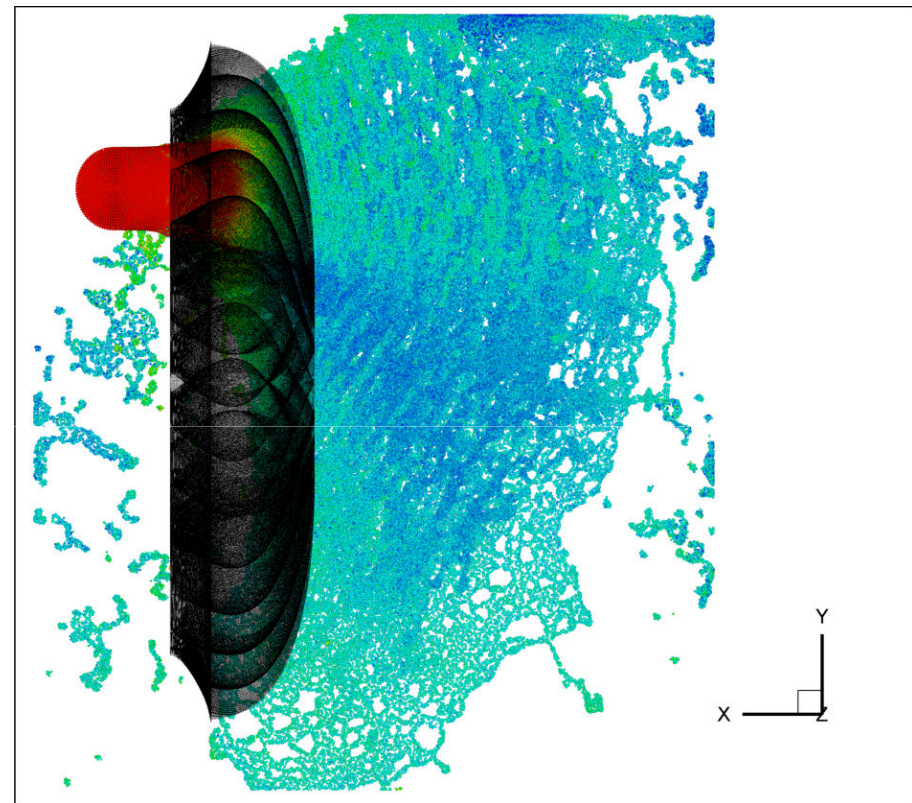
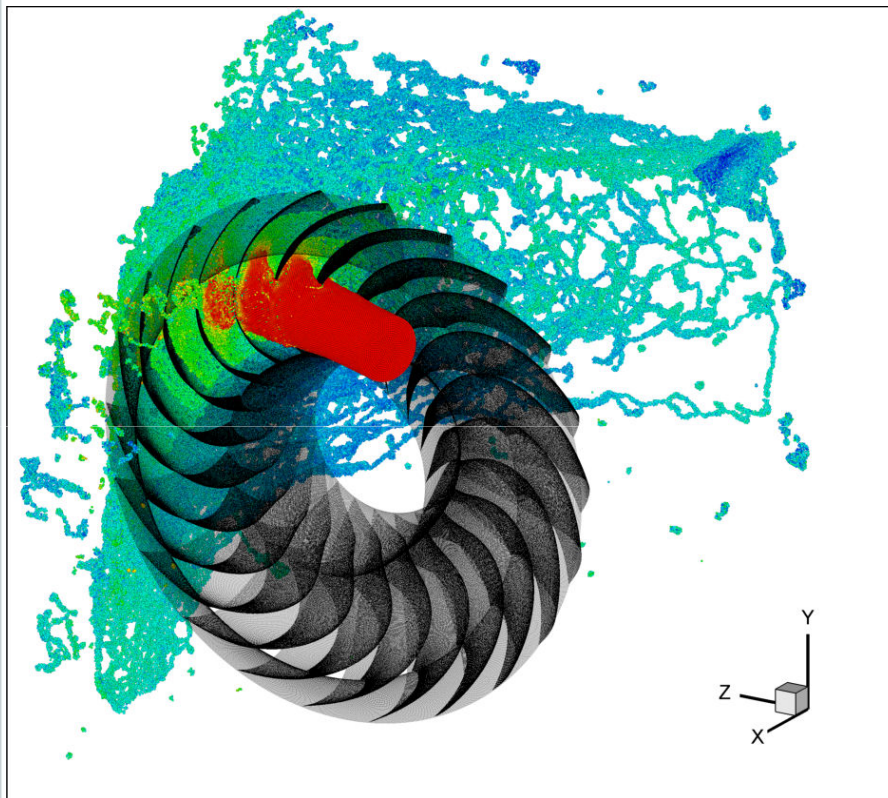


Time = 33.6msec



Εφαρμογές της μεθόδου (8)

Προσομοίωση υδροστροβίλου Turgo – πλήρης δρομέας

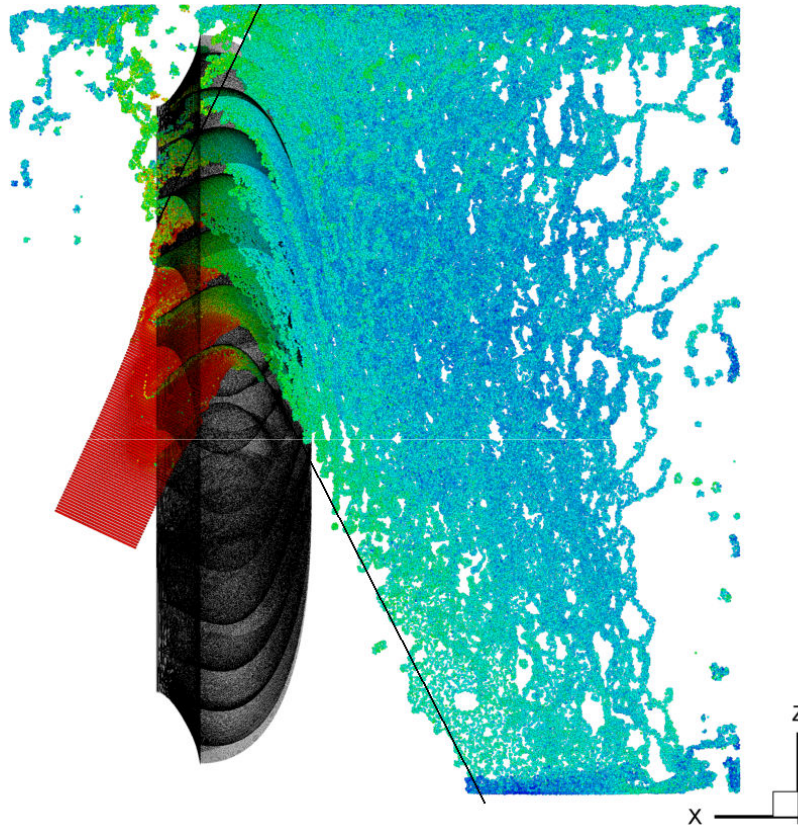


Βαρύτητα στον $-Y$ άξονα

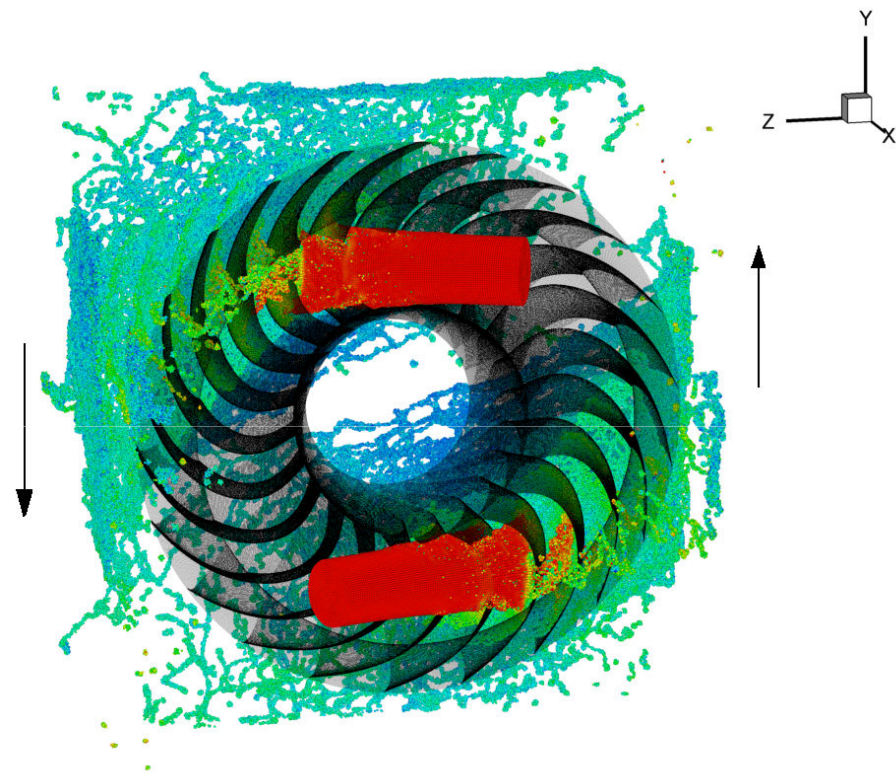


Εφαρμογές της μεθόδου (9)

Προσομοίωση υδροστροβίλου Turgo – πλήρης δρομέας



Το εξερχόμενο νερό κινείται στην περιοχή που ορίζεται από την προέκταση των ευθειών



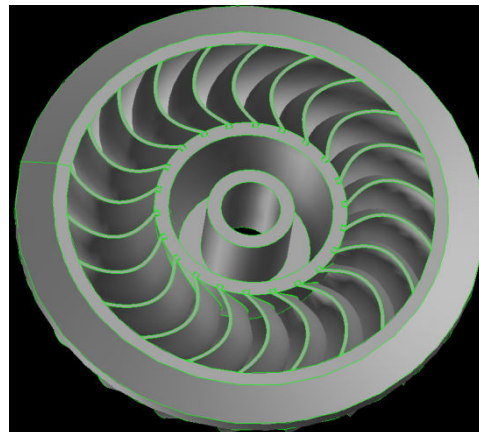
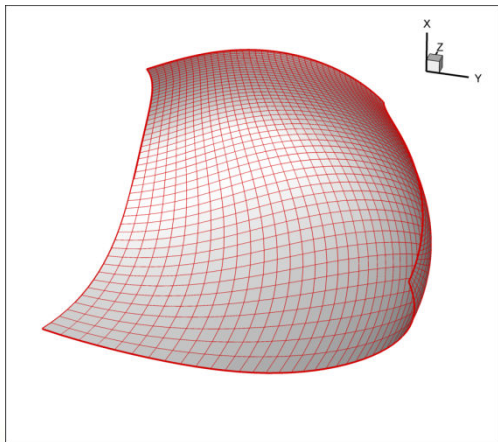
Το εξερχόμενο νερό μετά την έξοδο “ακολουθεί” την περιστροφή του δρομέα



Εφαρμογές της μεθόδου (10)

Κατασκευή νέου/βέλτιστου δρομέα – πειραματική εγκατάσταση

- Με την χρήση του αλγορίθμου FLS υπολογίστηκε μια βέλτιστη γεωμετρία (καθηγητής Ι. Αναγνωστόπουλος)
- Η βέλτιστη γεωμετρία δοκιμάστηκε με την μέθοδο SPH.
- Σχεδιασμός της γεωμετρίας σε CAD – πρωτοτυποποίηση – κατασκευή του πειραματικού δρομέα και εγκατάστασης



Εφαρμογές της μεθόδου (11)

Η πειραματική εγκατάσταση



Προοπτικές του SPH (1)

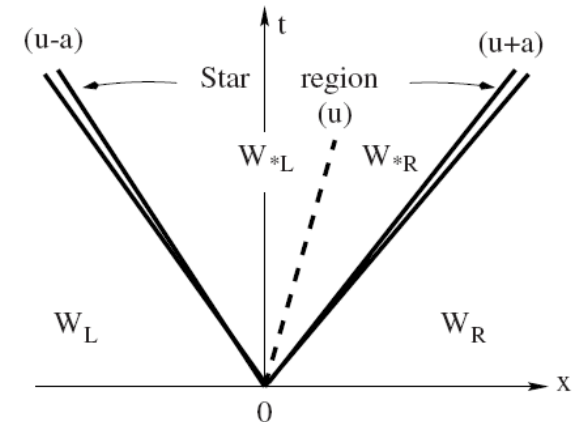
Χρήση επιλυτών Riemann

Επιλύτες Riemann χρησιμοποιούνται για συστήματα διαφορικών εξισώσεων υπερβολικού τύπου

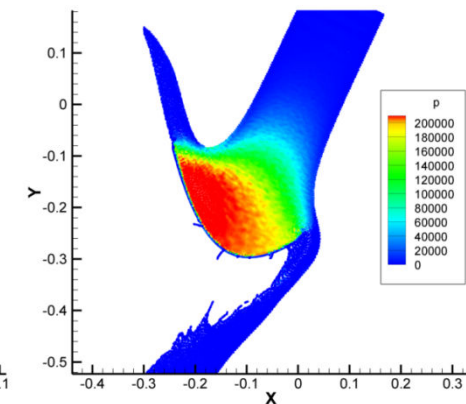
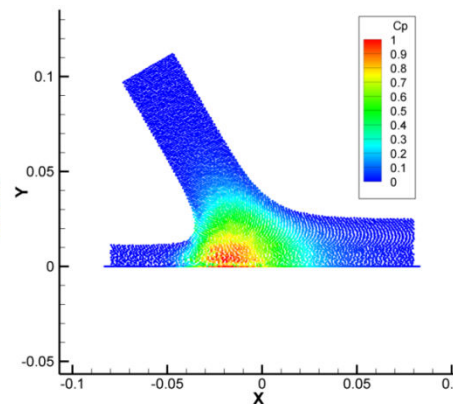
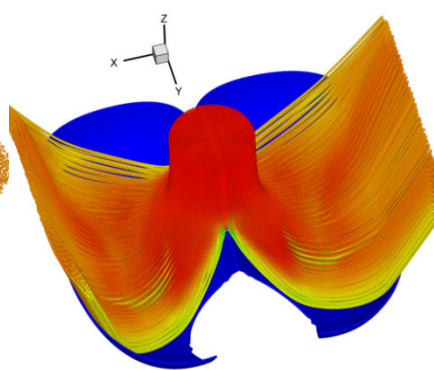
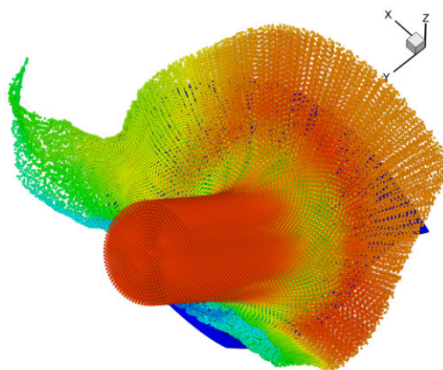
$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}(\mathbf{U})_x = 0$$

Γενική μορφή :

$$\mathbf{U}(x,0) = \begin{cases} \mathbf{U}_L & x < 0 \\ \mathbf{U}_R & x > 0 \end{cases}$$



Επίλυση με μη-συντηρητικές (*Parshikov, SPH-R*) ή συντηρητικές μεταβλητές (*Villa, SPH-ALE*)



Προοπτικές του SPH (2)

Παράλληλη επεξεργασία MPI, GPGPU (Cuda)

- Ο αλγόριθμος SPH επωφελείται από την παράλληλη επεξεργασία. Εύκολος παραλληλισμός, με πολύ μεγάλη απόδοση (μικρό τμήμα του αλγορίθμου είναι σειριακό – ‘embarrassingly parallel’).

Περαιτέρω προοπτικές:

- Χρήση παραλληλισμού διανεμημένης μνήμης (*distributed memory parallel*) με MPI (*Message Passing Interface*).
- Αξιοποίηση General Processing GPU. Όλες οι σύγχρονες GPUs (κάρτες γραφικών) μπορούν να προγραμματιστούν και να αξιοποιηθούν σαν παράλληλοι επεξεργαστές. *Cuda directives* σε γλώσσα C++.



Open MPI:
Open Source High Performance Computing

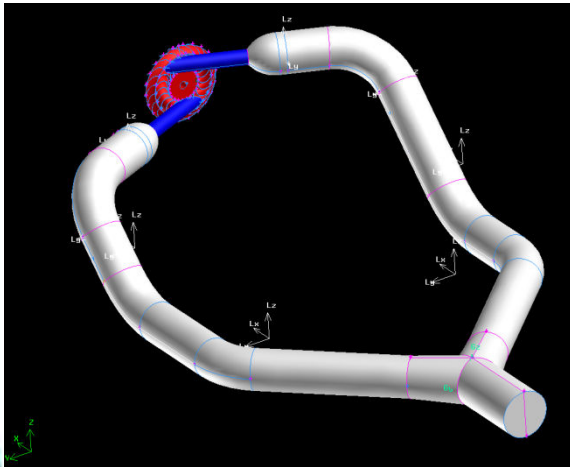
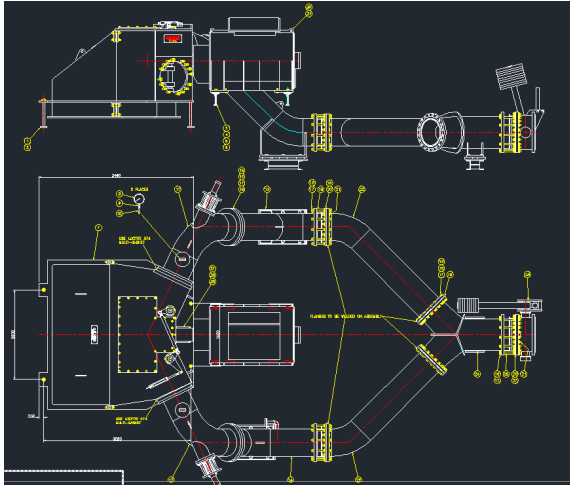


Department of Mechanical Engineering



Laboratory of
Hydraulic Turbomachines

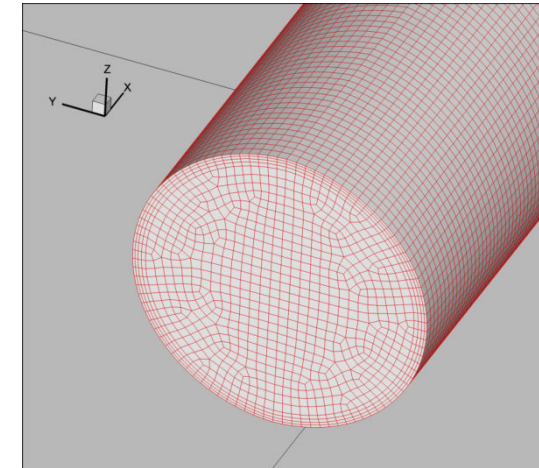
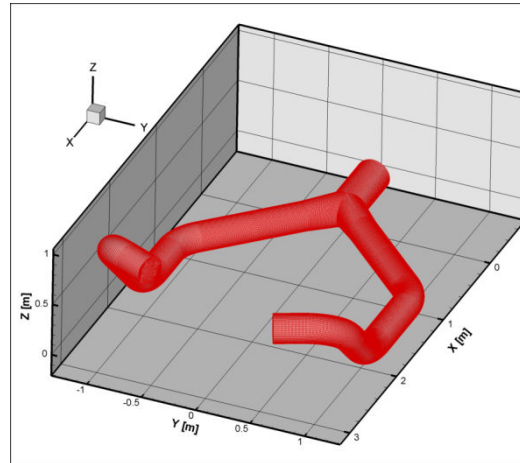
Μεθοδολογία για την προσομοίωση του αγωγού προσαγωγής



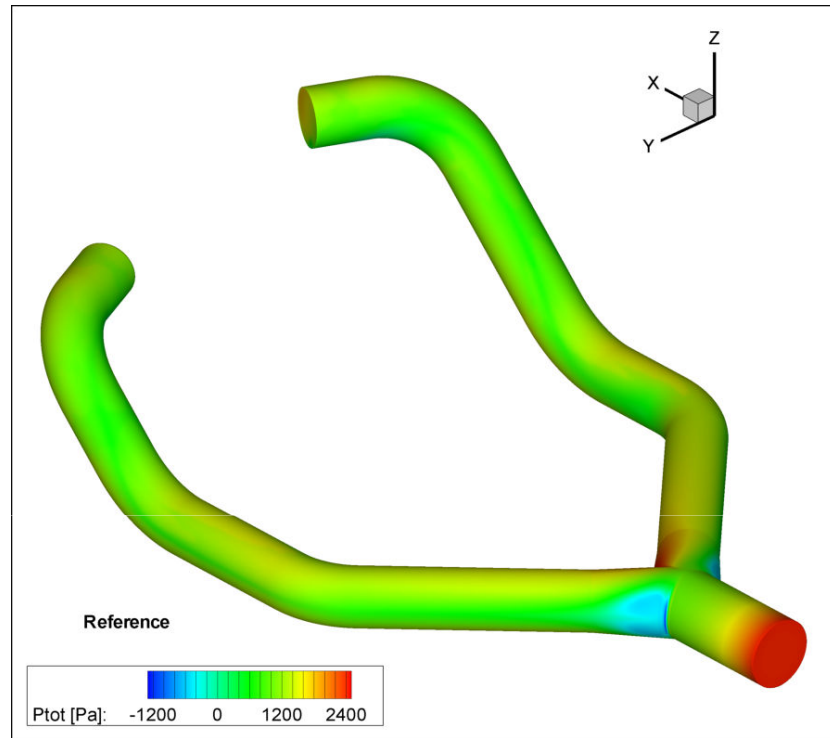
Χρήση του εμπορικού υπολογιστικού πακέτου Fluent. Διαθέσιμο μέσω του κεντρικού υπολογιστή του Πολυτεχνείου (<https://cloudfront0.central.ntua.gr>)

Το πρόγραμμα βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. **Eulerian, πλεγματική** μέθοδος.

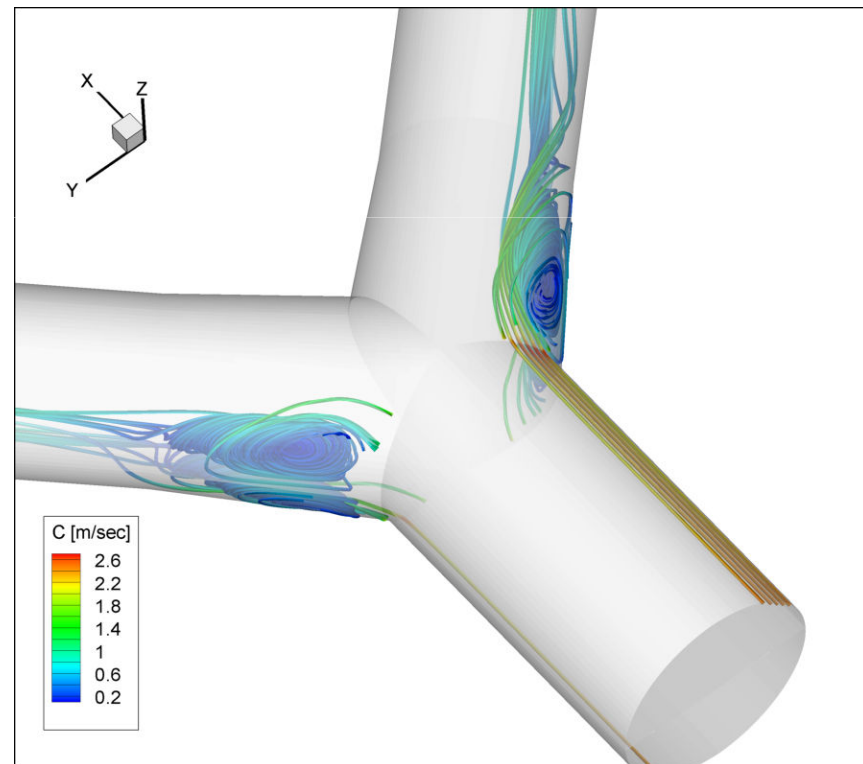
Η 3D γεωμετρία δημιουργήθηκε βάση των υπαρχόντων σχεδίων. Από την 3D γεωμετρία δημιουργήθηκε κατάλληλο υπολογιστικό πλέγμα.



Προσομοίωση του αγωγού προσαγωγής



	Ptot (Pa)	Pressure Loss Pa / (%)
Outlet - 1	1490.3	966.9 (39.3%)
Outlet - 2	1482.3	974.9 (39.6%)
Inlet	2457.3	-



Σημαντικές απώλειες πίεσης

Έντονη ανακυκλοφορία μετά την διακλάδωση

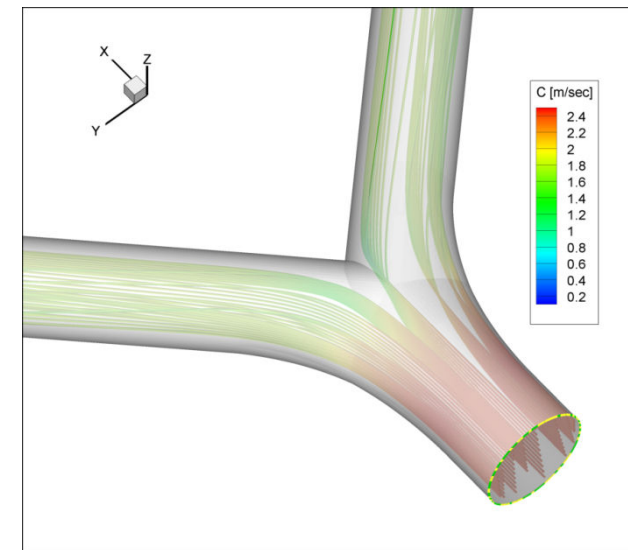
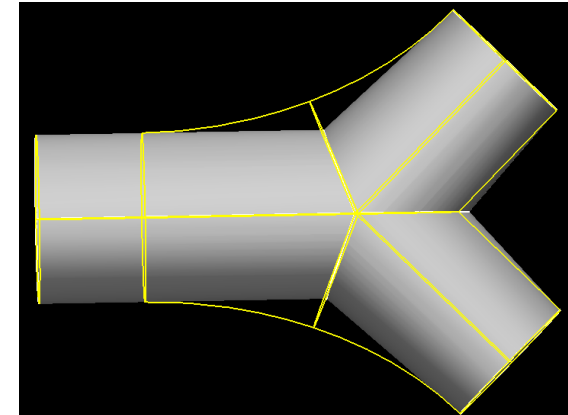
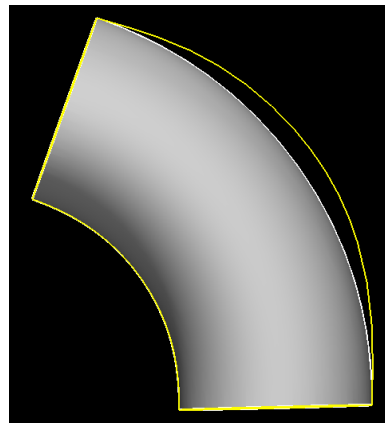
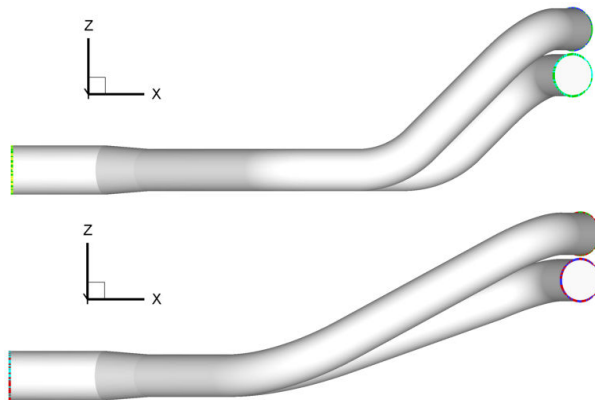


Βελτιώσεις του αγωγού προσαγωγής

Βελτίωση των ακολούθων :

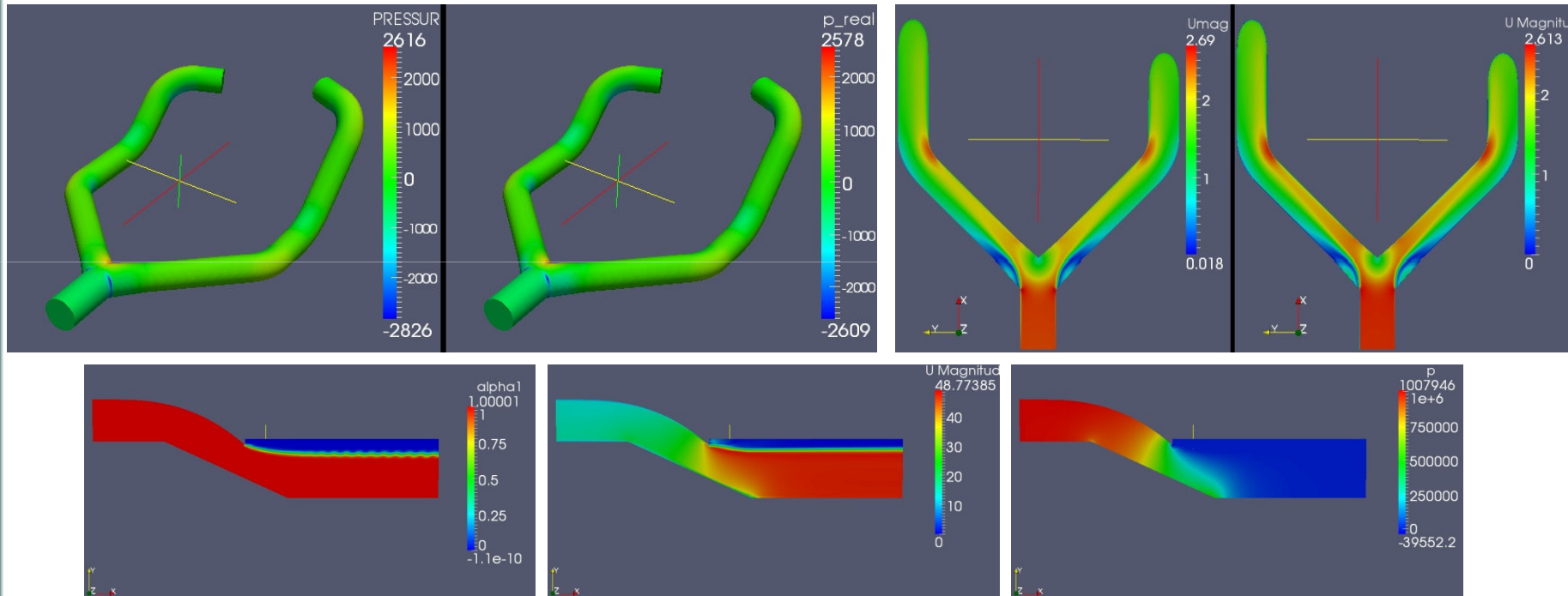
- Αφαίρεση μιας γωνίας σε κάθε κλάδο - αντικατάσταση της με ευθεία
- Αντικατάσταση γωνιών πριν τα ακροφύσια
- Αντικατάσταση διακλάδωσης για αποφυγή αποκόλλησης/ανακυκλοφορίας

Μείωση απωλειών πίεσης στα 530Pa από 970Pa (-45%)



Χρήση OpenFoam για σωληνώσεις/ακροφύσια

Το OpenFoam είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής ανοικτού κώδικα (<http://www.openfoam.com/>). Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων με το Paraview (<http://www.paraview.org/>)



Open  FOAM

 **ParaView**
Parallel Visualization Application



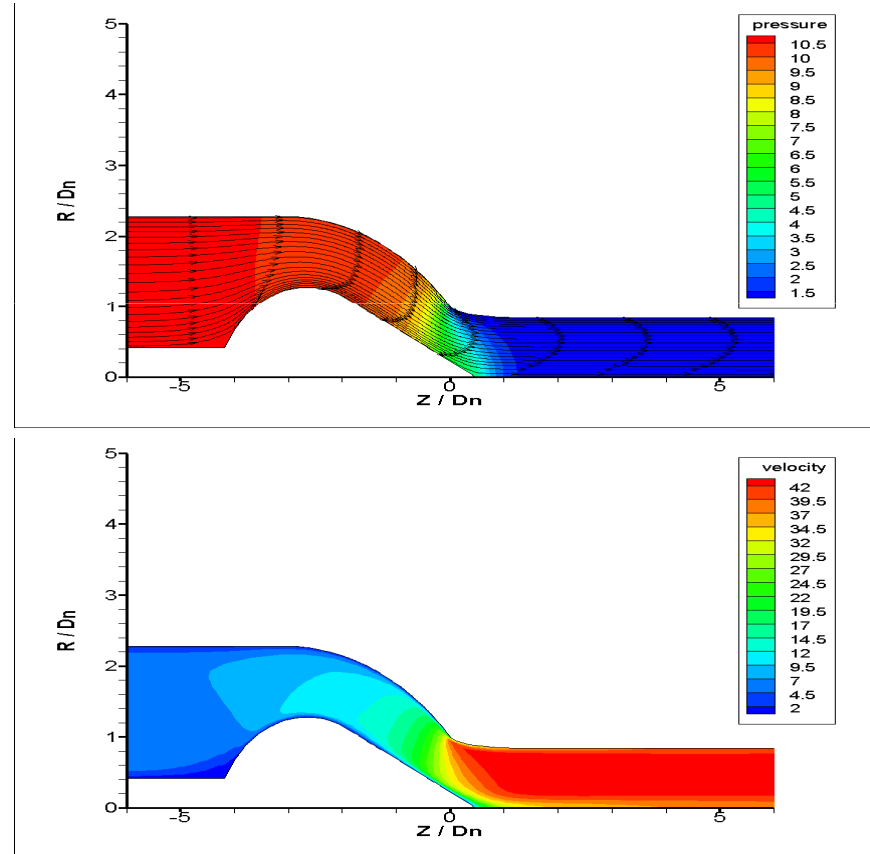
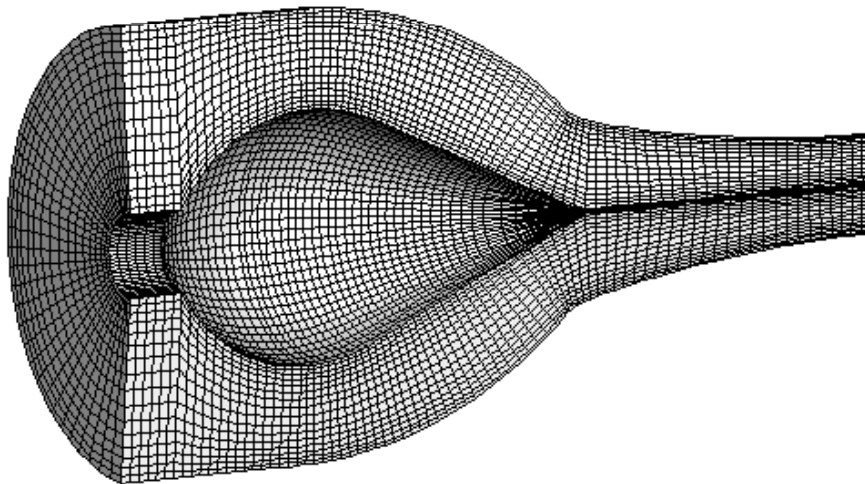
Department of Mechanical Engineering

Laboratory of
Hydraulic Turbomachines

Χρήση αλγορίθμου ψευδοσυμπίεστικότητας

Στο εργαστήριο αναπτύχθηκε αλγόριθμος επίλυσης ασυμπίεστης ροής, βασισμένος στην τεχνική της ψευδοσυμπίεστικότητας (Chorin 1967). Τροποποιήθηκε από τον υποψήφιο διδάκτορα Α. Νεσιάδη, για την επίλυση ελεύθερης επιφάνειας και για την προσομοίωση της ροής σε ακροφύσια.

Ο αλγόριθμος μπορεί να λύσει το
αξονοσυμμετρικό ή το 3-διάστατο πρόβλημα



Σύνοψη / Επίλογος

- Στο εργαστήριο υδροδυναμικών υπάρχει το απαιτούμενο λογισμικό & τεχνογνωσία για την προσομοίωση υδροστροβίλων δράσης
- Το διαθέσιμο λογισμικό υπόκειται συνεχούς βελτίωσης, για την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.
- Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικές μετρήσεις από τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις.



Ευχαριστώ για την προσοχή σας !

Ερωτήσεις ?

