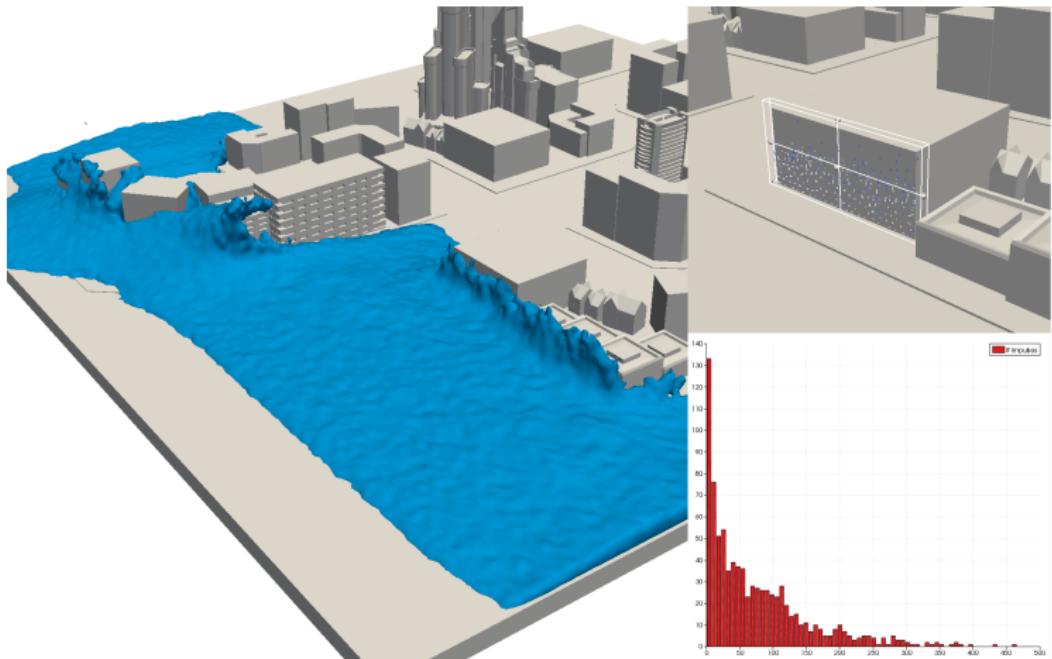


Προσομοίωση Πρόσπιτωσης Tsunami (津波) σε Ακτογραμμή



Αριστοτέλης Σπαθής-Παπαδιώτης

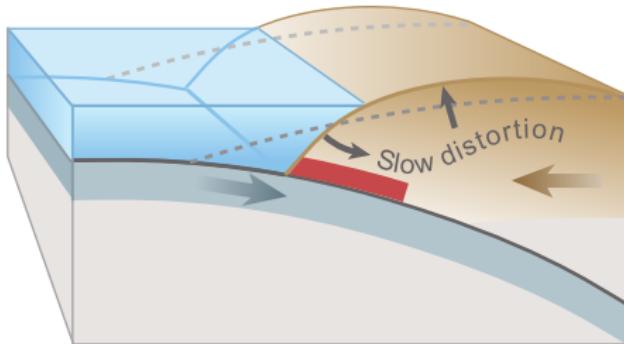
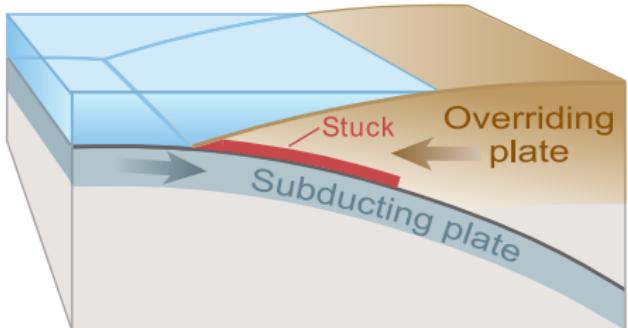
Τμήμα ΗΜ&ΤΥ, Πανεπιστήμιο Πατρών

24 Φεβρουαρίου 2016

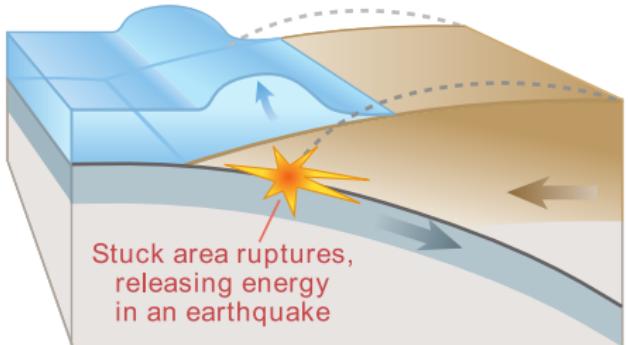
Στόχος

Η ανάπτυξη ενός ακριβούς, παραμετρικού προσομοιωτή δυναμικής ασυμπίεστων ρευστών και καταγραφής της αλληλεπίδρασής τους με το περιβάλλον

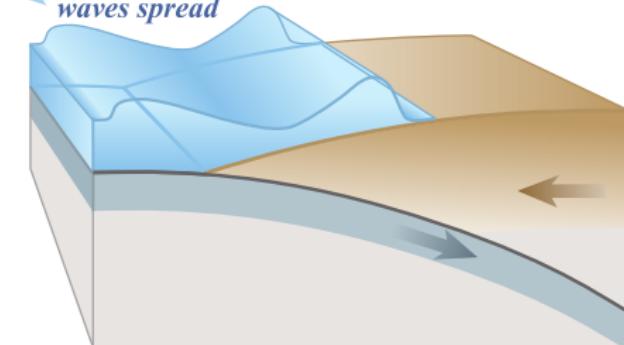
Η γένεση ενός tsunami



Tsunami starts during earthquake



Tsunami waves spread





Μεθοδολογία Προσομοίωσης

Προσομοίωση ρευστών

Εξίσωση Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \vec{f},$$

όπου

- ▶ ρ η πυκνότητα
- ▶ \vec{v} η ταχύτητα
- ▶ p η πίεση
- ▶ \mathbb{T} ο όρος παραμόρφωσης του τανυστή τάσης
- ▶ \vec{f} η δύναμη ανά μονάδα όγκου

Η εξίσωση είναι ισχυρά μη γραμμική, ενώ υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη λύση της.

Προσομοίωση ρευστών

Εξίσωση Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbb{T} + \vec{f},$$

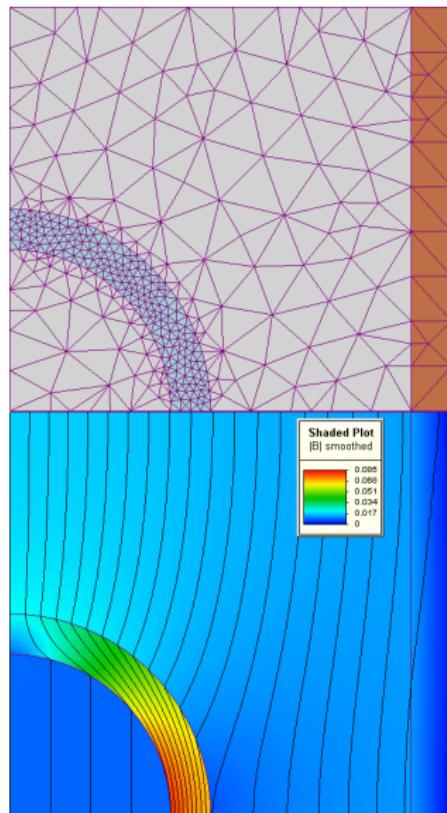
όπου

- ▶ ρ η πυκνότητα
- ▶ \vec{v} η ταχύτητα
- ▶ p η πίεση
- ▶ \mathbb{T} ο όρος παραμόρφωσης του τανυστή τάσης
- ▶ \vec{f} η δύναμη ανά μονάδα όγκου

Η εξίσωση είναι ισχυρά μη γραμμική, ενώ υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη λύση της.

Δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων:

- ▶ Αριθμητικές – χρησιμοποιούν δίκτυο (mesh-based)
- ▶ Σωματιδιακές – δεν χρησιμοποιούν δίκτυο (meshfree)
 - ▶ Smoothed-particle hydrodynamics
 - ▶ Lattice Boltzmann method



Θεωρητική Θεμελίωση SPH

Ξεκινάμε από την ταυτότητα δειγματοληψίας

$$f(\vec{r}) = \int_V f(\vec{x})\delta(\vec{r} - \vec{x})d\vec{x},$$

Θεωρητική θεμελίωση SPH

Ξεκινάμε από την ταυτότητα δειγματοληψίας

$$f(\vec{r}) = \int_V f(\vec{x}) \delta(\vec{r} - \vec{x}) d\vec{x},$$

αντικαθιστώντας την $\delta(\vec{r})$ με έναν γενικότερο πυρήνα εξομάλυνσης $W(\vec{r}, h)$ τέτοιο ώστε

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r}, h) = \delta(\vec{r}) \quad \text{και} \quad \int_V W(\vec{r}, h) d\vec{x} = 1$$

Θεωρητική θεμελίωση SPH

Ξεκινάμε από την ταυτότητα δειγματοληψίας

$$f(\vec{r}) = \int_V f(\vec{x}) \delta(\vec{r} - \vec{x}) d\vec{x},$$

αντικαθιστώντας την $\delta(\vec{r})$ με έναν γενικότερο πυρήνα εξομάλυνσης $W(\vec{r}, h)$ τέτοιο ώστε

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r}, h) = \delta(\vec{r}) \quad \text{και} \quad \int_V W(\vec{r}, h) d\vec{x} = 1$$

λαμβάνουμε έναν προσεγγιστικό εκπιμητή για την f

$$f(\vec{r}) \approx \int_V f(\vec{x}) W(\vec{r} - \vec{x}, h) d\vec{x}$$

Θεωρητική θεμελίωση SPH

Ξεκινάμε από την ταυτότητα δειγματοληψίας

$$f(\vec{r}) = \int_V f(\vec{x}) \delta(\vec{r} - \vec{x}) d\vec{x},$$

αντικαθιστώντας την $\delta(\vec{r})$ με έναν γενικότερο πυρήνα εξομάλυνσης $W(\vec{r}, h)$ τέτοιο ώστε

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\vec{r}, h) = \delta(\vec{r}) \quad \text{και} \quad \int_V W(\vec{r}, h) d\vec{x} = 1$$

λαμβάνουμε έναν προσεγγιστικό εκτιμητή για την f

$$f(\vec{r}) \approx \int_V f(\vec{x}) W(\vec{r} - \vec{x}, h) d\vec{x}$$

Αν διακριτοποιήσουμε το πεδίο f ο εκτιμητής μετασχηματίζεται σε διακριτό άθροισμα

$$f(\vec{r}) \approx \sum_i \frac{\rho_i d\vec{x}}{\rho_i} f(\vec{r}_i) W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} f(\vec{r}_i) W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

όπου κάθε σημείο i συνεισφέρει ανάλογα με το λόγο της μάζας του m_i προς την τοπική πυκνότητα ρ_i .

Βάθμωση και απόκλιση

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό της SPH είναι η αποκλειστική εξάρτηση των διανυσματικών τελεστών από τους αντίστοιχους του πυρήνα εξομάλυνσης W

$$\nabla A(\vec{r}) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} A(\vec{r}_i) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

Βάθμωση και απόκλιση

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό της SPH είναι η αποκλειστική εξάρτηση των διανυσματικών τελεστών από τους αντίστοιχους του πυρήνα εξομάλυνσης W

$$\nabla A(\vec{r}) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} A(\vec{r}_i) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

Για την εξασφάλιση συμμετρίας δυνάμεων όπως αυτών που δημιουργούνται από τη βάθμωση της πίεσης P , μπορούμε να εξάγουμε εναλλακτικούς εκπιμητές. Από την ταυτότητα του γινομένου

$$\nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) = \frac{\nabla P}{\rho} - \frac{P}{\rho^2} \nabla \rho \quad \Leftrightarrow \quad \nabla P = \rho \left[\frac{P}{\rho^2} \nabla \rho + \nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) \right]$$

Βάθμωση και απόκλιση

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό της SPH είναι η αποκλειστική εξάρτηση των διανυσματικών τελεστών από τους αντίστοιχους του πυρήνα εξομάλυνσης W

$$\nabla A(\vec{r}) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} A(\vec{r}_i) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

Για την εξασφάλιση συμμετρίας δυνάμεων όπως αυτών που δημιουργούνται από τη βάθμωση της πίεσης P , μπορούμε να εξάγουμε εναλλακτικούς εκπιμητές. Από την ταυτότητα του γινομένου

$$\nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) = \frac{\nabla P}{\rho} - \frac{P}{\rho^2} \nabla \rho \quad \Leftrightarrow \quad \nabla P = \rho \left[\frac{P}{\rho^2} \nabla \rho + \nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) \right]$$

αντικαθιστώντας στο δεξί μέλος τις βαθμώσεις με τους εκπιμητές τους κατά SPH

$$\begin{aligned} \nabla P &= \rho \left[\frac{P}{\rho^2} \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} \rho_i \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) + \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} \frac{P_i}{\rho_i} \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) \right] \\ &= \rho \sum_i m_i \left(\frac{P}{\rho^2} + \frac{P_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) \end{aligned}$$

Βάθμωση και απόκλιση

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό της SPH είναι η αποκλειστική εξάρτηση των διανυσματικών τελεστών από τους αντίστοιχους του πυρήνα εξομάλυνσης W

$$\nabla A(\vec{r}) = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} A(\vec{r}_i) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

Για την εξασφάλιση συμμετρίας δυνάμεων όπως αυτών που δημιουργούνται από τη βάθμωση της πίεσης P , μπορούμε να εξάγουμε εναλλακτικούς εκπιμητές. Από την ταυτότητα του γινομένου

$$\nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) = \frac{\nabla P}{\rho} - \frac{P}{\rho^2} \nabla \rho \quad \Leftrightarrow \quad \nabla P = \rho \left[\frac{P}{\rho^2} \nabla \rho + \nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) \right]$$

αντικαθιστώντας στο δεξί μέλος τις βαθμώσεις με τους εκπιμητές τους κατά SPH

$$\begin{aligned} \nabla P &= \rho \left[\frac{P}{\rho^2} \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} \rho_i \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) + \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} \frac{P_i}{\rho_i} \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) \right] \\ &= \rho \sum_i m_i \left(\frac{P}{\rho^2} + \frac{P_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W(\vec{r} - \vec{r}_i, h) \end{aligned}$$

Αντίστοιχα για τη λαπλασιανή του διανυσματικού πεδίου ταχύτητας \vec{v}

$$\nabla^2 \vec{v} = \sum_i \frac{m_i}{\rho_i} (\vec{v}_i - \vec{v}) \nabla^2 W(\vec{r} - \vec{r}_i, h)$$

Καταστατική εξίσωση και πυρήνες εξομάλυνσης

Η καταστατική εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης από την τοπική πυκνότητα.

$$P = k(\rho - \rho_0)$$

$$P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right)$$

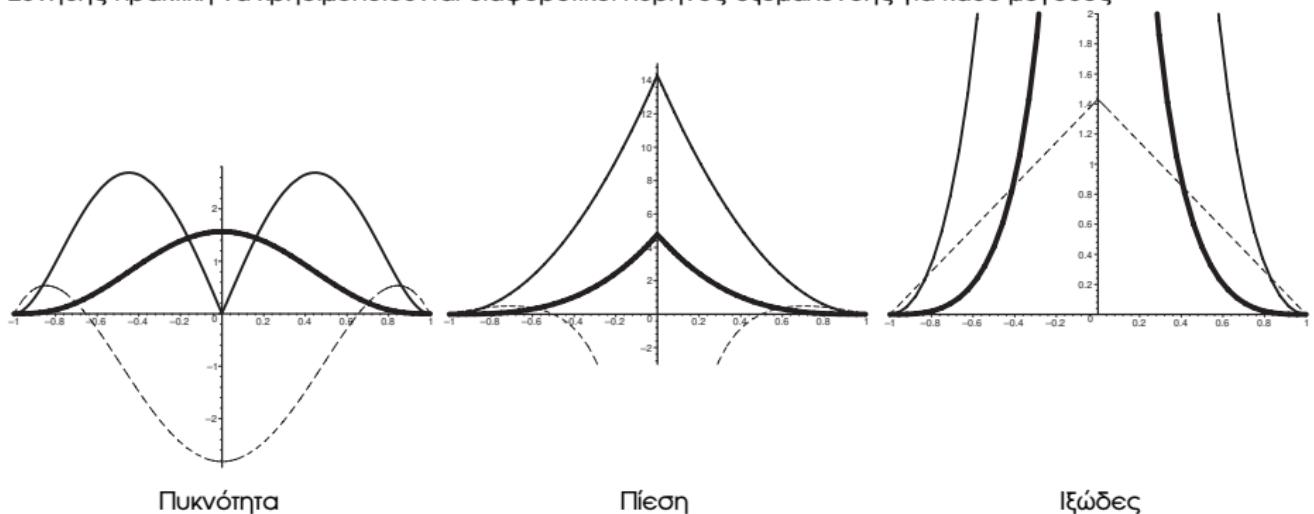
Καταστατική εξίσωση και πυρήνες εξομάλυνσης

Η καταστατική εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης από την τοπική πυκνότητα.

$$P = k(\rho - \rho_0)$$

$$P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right)$$

Συνήθης πρακτική να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί πυρήνες εξομάλυνσης για κάθε μέγεθος



Πλεονεκτήματα

- ▶ Εγγενής διατήρηση πολλών μεγεθών στο σύστημα, όπως μάζα, ορμή και ενέργεια.

Πλεονεκτήματα

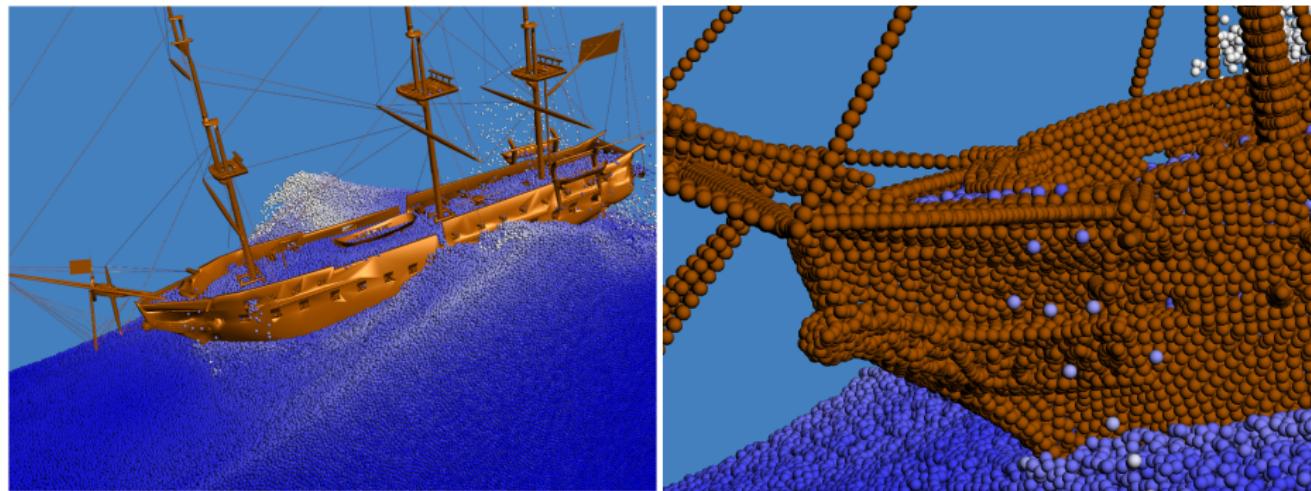
- ▶ Εγγενής διατήρηση πολλών μεγεθών στο σύστημα, όπως μάζα, ορμή και ενέργεια.
- ▶ Ακριβής, ισότροπος και αμετάβλητος σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Galilean invariant) χειρισμός της καθαρής μεταφοράς (pure advection)

Πλεονεκτήματα

- ▶ Εγγενής διατήρηση πολλών μεγεθών στο σύστημα, όπως μάζα, ορμή και ενέργεια.
- ▶ Ακριβής, ισότροπος και αμετάβλητος σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Galilean invariant) χειρισμός της καθαρής μεταφοράς (pure advection)
- ▶ Δυνατότητα προσαρμογής της αναλυτικότητας (resolution) και κατά συνέπεια του υπολογιστικού φόρτου δυναμικά συναρτήσει της θέσης, χρόνου ή άλλων παραγόντων.

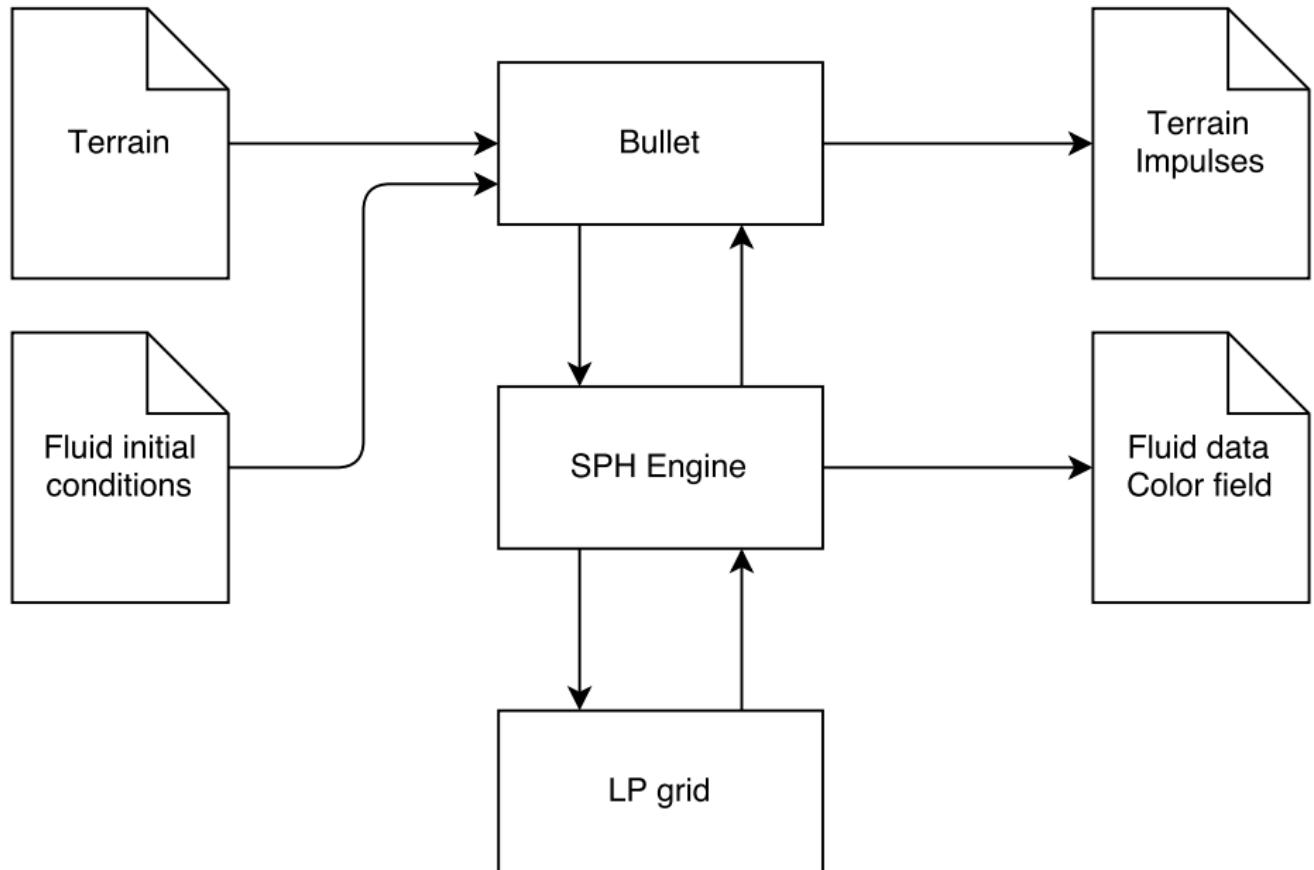
Πλεονεκτήματα

- ▶ Εγγενής διατήρηση πολλών μεγεθών στο σύστημα, όπως μάζα, ορμή και ενέργεια.
- ▶ Ακριβής, ισότροπος και αμετάβλητος σε κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς (Galilean invariant) χειρισμός της καθαρής μεταφοράς (pure advection)
- ▶ Δυνατότητα προσαρμογής της αναλυτικότητας (resolution) και κατά συνέπεια του υπολογιστικού φόρτου δυναμικά συναρτήσει της θέσης, χρόνου ή άλλων παραγόντων.
- ▶ Εύκολος χειρισμός ορίων και ειδικών αλληλεπιδράσεων σε εφαρμογές πολλαπλών φάσεων και συστατικών, μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων.



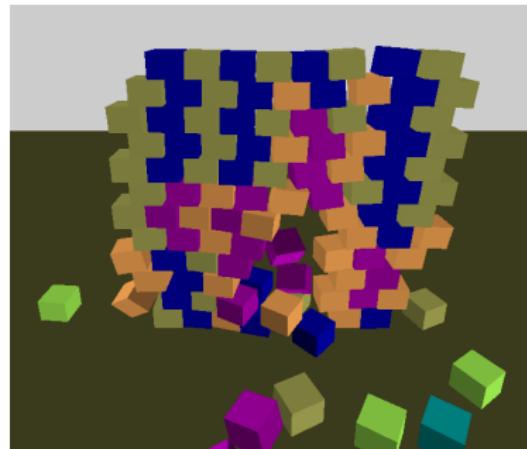
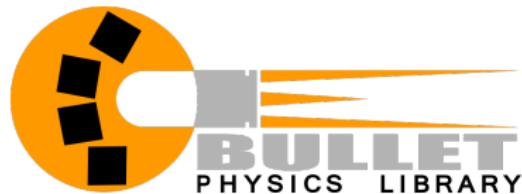
Υλοποίηση

Αρχιτεκτονική



Bullet

- ▶ Μηχανή προσομοίωσης μηχανικών αλληλεπιδράσεων
- ▶ Ελεύθερο λογισμικό
- ▶ Ευέλικτη αντικειμενοστραφής αρχιτεκτονική
- ▶ Μηχανική στρεβεών και μαλακών σωμάτων με διακριτή και συνεχή ανίχνευση συγκρούσεων.
- ▶ Διάφορα σχήματα συγκρούσεων όπως σφαίρα και τριγωνικά πλέγματα επιφάνειας
- ▶ Δυνατότητα εφαρμογής κίνησης, γεωμετρικών περιορισμών, δυνάμεων, ώσεων
- ▶ Λεπτομερής καταγραφή πολλαπλών πληροφοριών για κάθε αλληλεπίδραση
- ▶ Position Based Fluids



LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

- ▶ Συνεκτική αποθήκευση των σωματιδίων. Δεσμεύεται χώρος στη μνήμη ακριβώς ίσος με τον ελάχιστο δυνατό βάσει του μεγέθους της εσωτερικής αναπαράστασης των σωματιδίων.

LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

- ▶ Συνεκτική αποθήκευση των σωματιδίων. Δεσμεύεται χώρος στη μνήμη ακριβώς ίσος με τον ελάχιστο δυνατό βάσει του μεγέθους της εσωτερικής αναπαράστασης των σωματιδίων.
- ▶ Γρήγορη $O(1)$ πρόσβαση. Η ανάκτηση των σωματιδίων με βάση τη θέση τους γίνεται με λογική hash table και είναι εγγυημένο ότι βρίσκονται όλα σε συνεχή περιοχή της μνήμης.

LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

- ▶ Συνεκτική αποθήκευση των σωματιδίων. Δεσμεύεται χώρος στη μνήμη ακριβώς ίσος με τον ελάχιστο δυνατό βάσει του μεγέθους της εσωτερικής αναπαράστασης των σωματιδίων.
- ▶ Γρήγορη $O(1)$ πρόσβαση. Η ανάκτηση των σωματιδίων με βάση τη θέση τους γίνεται με λογική hash table και είναι εγγυημένο ότι βρίσκονται όλα σε συνεχή περιοχή της μνήμης.
- ▶ Ενημέρωση in-place. Η ενημέρωση της δομής μετά από κάθε βήμα της προσομοίωσης δεν απαιτεί καμία επαναδεύσμευση (reallocation) μνήμης και απαιτεί κατά κανόνα μικρό χρόνο.

LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

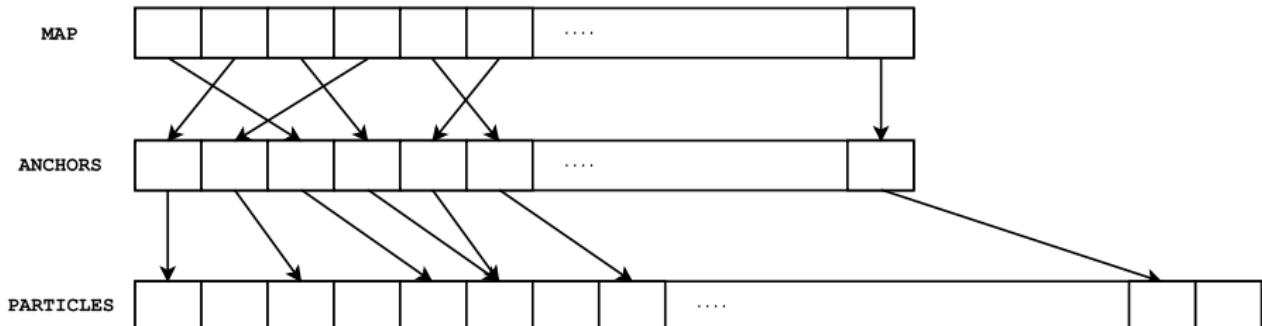
- ▶ Συνεκτική αποθήκευση των σωματιδίων. Δεσμεύεται χώρος στη μνήμη ακριβώς ίσος με τον ελάχιστο δυνατό βάσει του μεγέθους της εσωτερικής αναπαράστασης των σωματιδίων.
- ▶ Γρήγορη $O(1)$ πρόσβαση. Η ανάκτηση των σωματιδίων με βάση τη θέση τους γίνεται με λογική hash table και είναι εγγυημένο ότι βρίσκονται όλα σε συνεχή περιοχή της μνήμης.
- ▶ Ενημέρωση in-place. Η ενημέρωση της δομής μετά από κάθε βήμα της προσομοίωσης δεν απαιτεί καμία επαναδεύσμευση (reallocation) μνήμης και απαιτεί κατά κανόνα μικρό χρόνο.
- ▶ Διατήρηση της τοπικότητας στην διάταξη αποθήκευσης. Τα σωματίδια κάθε κελιού είναι εγγυημένα αποθηκευμένα σε συνεχή περιοχή της μνήμης, ενώ σωματίδια γειτονικών κελιών βρίσκονται σε γειτονικές περιοχές της μνήμης, γεγονός που βελτιστοποιεί τη χρήση της κρυφής μνήμης σε υπολογισμούς αλληλεπιδράσεων εξαρτώμενων από την απόσταση στο χώρο.

LP grid

Ειδική δομή για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και πρόσβασης στα σωματίδια.

Ο χώρος της προσομοίωσης διαιρείται σε κανονικό πλέγμα κυβικών κελιών, μήκους ακμής h .

- ▶ Συνεκτική αποθήκευση των σωματιδίων. Δεσμεύεται χώρος στη μνήμη ακριβώς ίσος με τον ελάχιστο δυνατό βάσει του μεγέθους της εσωτερικής αναπαράστασης των σωματιδίων.
- ▶ Γρήγορη $O(1)$ πρόσβαση. Η ανάκτηση των σωματιδίων με βάση τη θέση τους γίνεται με λογική hash table και είναι εγγυημένο ότι βρίσκονται όλα σε συνεχή περιοχή της μνήμης.
- ▶ Ενημέρωση in-place. Η ενημέρωση της δομής μετά από κάθε βήμα της προσομοίωσης δεν απαιτεί καμία επαναδεύσμευση (reallocation) μνήμης και απαιτεί κατά κανόνα μικρό χρόνο.
- ▶ Διατήρηση της τοπικότητας στην διάταξη αποθήκευσης. Τα σωματίδια κάθε κελιού είναι εγγυημένα αποθηκευμένα σε συνεχή περιοχή της μνήμης, ενώ σωματίδια γειτονικών κελιών βρίσκονται σε γειτονικές περιοχές της μνήμης, γεγονός που βελτιστοποιεί τη χρήση της κρυφής μνήμης σε υπολογισμούς αλληλεπιδράσεων εξαρτώμενων από την απόσταση στο χώρο.



Αρχικοποίηση

Ακτογραμμή:

- ▶ Εισαγωγή γεωμετρίας από κατάλληλο αρχείο περιγραφής
- ▶ Κλιμάκωση και μετακίνηση του μοντέλου στην αρχή των αξόνων
- ▶ Προσθήκη AABB και τυχόν επιπρόσθετων στοιχείων (λ.χ. κυματοθραύστης)
- ▶ Εξαγωγή πληροφορίας τελικών διαστάσεων χώρου προσομοίωσης

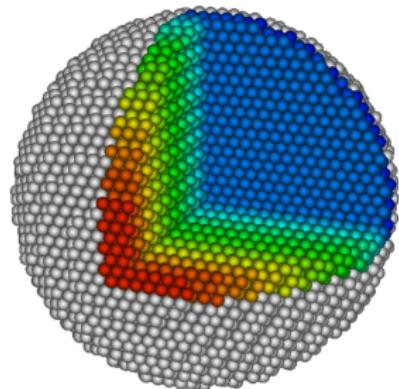
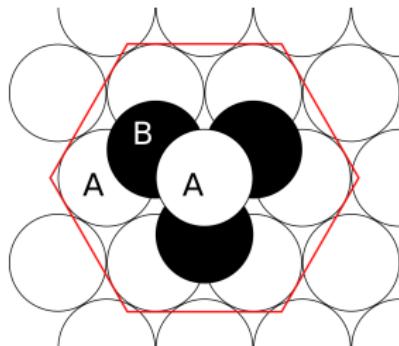
Αρχικοποίηση

Ακτογραμμή:

- ▶ Εισαγωγή γεωμετρίας από κατάλληλο αρχείο περιγραφής
- ▶ Κλιμάκωση και μετακίνηση του μοντέλου στην αρχή των αξόνων
- ▶ Προσθήκη AABB και τυχόν επιπρόσθετων στοιχείων (λ.χ. κυματοθραύστης)
- ▶ Εξαγωγή πληροφορίας τελικών διαστάσεων χώρου προσομοίωσης

Ρευστό:

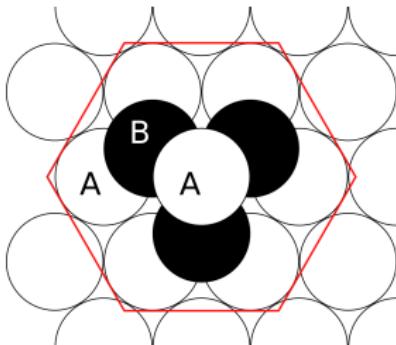
- ▶ Εισαγωγή αρχικών συνθηκών ρευστού
- ▶ Διακριτοποίηση σε σωματίδια σε διάταξη HCP
- ▶ Προσδιορισμός ακτίνας εξομάλυνσης h
- ▶ Προσαρμογή καταστατικής εξίσωσης
- ▶ Καταμέτρηση γειτονικών σωματίδιων
- ▶ Χρονικό βήμα (κριτήριο Courant-Friedrichs-Lowy: $\delta t = C * \delta x / v$)



Αρχικοποίηση

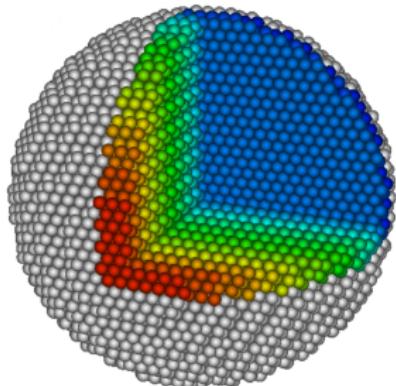
Ακτογραμμή:

- ▶ Εισαγωγή γεωμετρίας από κατάλληλο αρχείο περιγραφής
- ▶ Κλιμάκωση και μετακίνηση του μοντέλου στην αρχή των αξόνων
- ▶ Προσθήκη AABB και τυχόν επιπρόσθετων στοιχείων (λ.χ. κυματοθραύστης)
- ▶ Εξαγωγή πληροφορίας τελικών διαστάσεων χώρου προσομοίωσης



Ρευστό:

- ▶ Εισαγωγή αρχικών συνθηκών ρευστού
- ▶ Διακριτοποίηση σε σωματίδια σε διάταξη HCP
- ▶ Προσδιορισμός ακτίνας εξομάλυνσης h
- ▶ Προσαρμογή καταστατικής εξίσωσης
- ▶ Καταμέτρηση γειτονικών σωματίδιων
- ▶ Χρονικό βήμα (κριτήριο Courant-Friedrichs-Lowy: $\delta t = C * \delta x / v$)



LP grid:

- ▶ Διαχωρισμός χώρου προσομοίωσης σε κυβικά κελιά ακμής h
- ▶ Δέσμευση μνήμης για την αποθήκευση των δεδομένων της προσομοίωσης
- ▶ Αρχική αποθήκευση σωματιδίων στη δομή

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πικνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας
5. Υπολογισμός και εφαρμογή των ώσεων που υπολογίζονται ως το γινόμενο των δυνάμεων πίεσης/ιξώδους και του χρονικού βήματος, αντισυμμετρικών για κάθε ζεύγος αλληλεπίδρασης

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας
5. Υπολογισμός και εφαρμογή των ώσεων που υπολογίζονται ως το γινόμενο των δυνάμεων πίεσης/ιξώδους και του χρονικού βήματος, αντισυμμετρικών για κάθε ζεύγος αλληλεπίδρασης
6. Καταγραφή/αποθήκευση των ώσεων (impulses) του ρευστού προς την ακτογραμμή

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

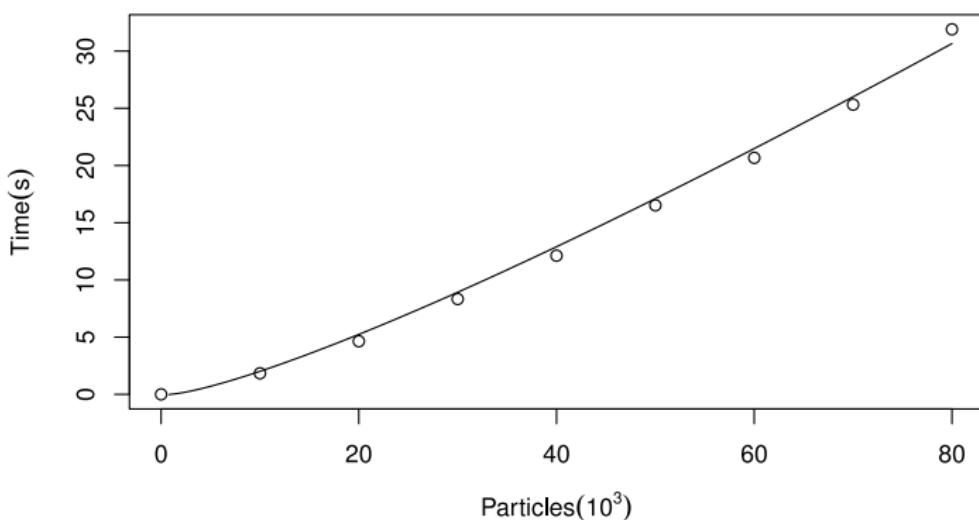
1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας
5. Υπολογισμός και εφαρμογή των ώσεων που υπολογίζονται ως το γινόμενο των δυνάμεων πίεσης/ιξώδους και του χρονικού βήματος, αντισυμμετρικών για κάθε ζεύγος αλληλεπίδρασης
6. Καταγραφή/αποθήκευση των ώσεων (impulses) του ρευστού προς την ακτογραμμή
7. Ενημέρωση του πλέγματος αποθήκευσης των σωματιδίων

Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας
5. Υπολογισμός και εφαρμογή των ώσεων που υπολογίζονται ως το γινόμενο των δυνάμεων πίεσης/ιξώδους και του χρονικού βήματος, αντισυμμετρικών για κάθε ζεύγος αλληλεπίδρασης
6. Καταγραφή/αποθήκευση των ώσεων (impulses) του ρευστού προς την ακτογραμμή
7. Ενημέρωση του πλέγματος αποθήκευσης των σωματιδίων
8. Υπολογισμός χρωματικού πεδίου και συνεισφοράς στο αθροιστικό πεδίο ώσεων

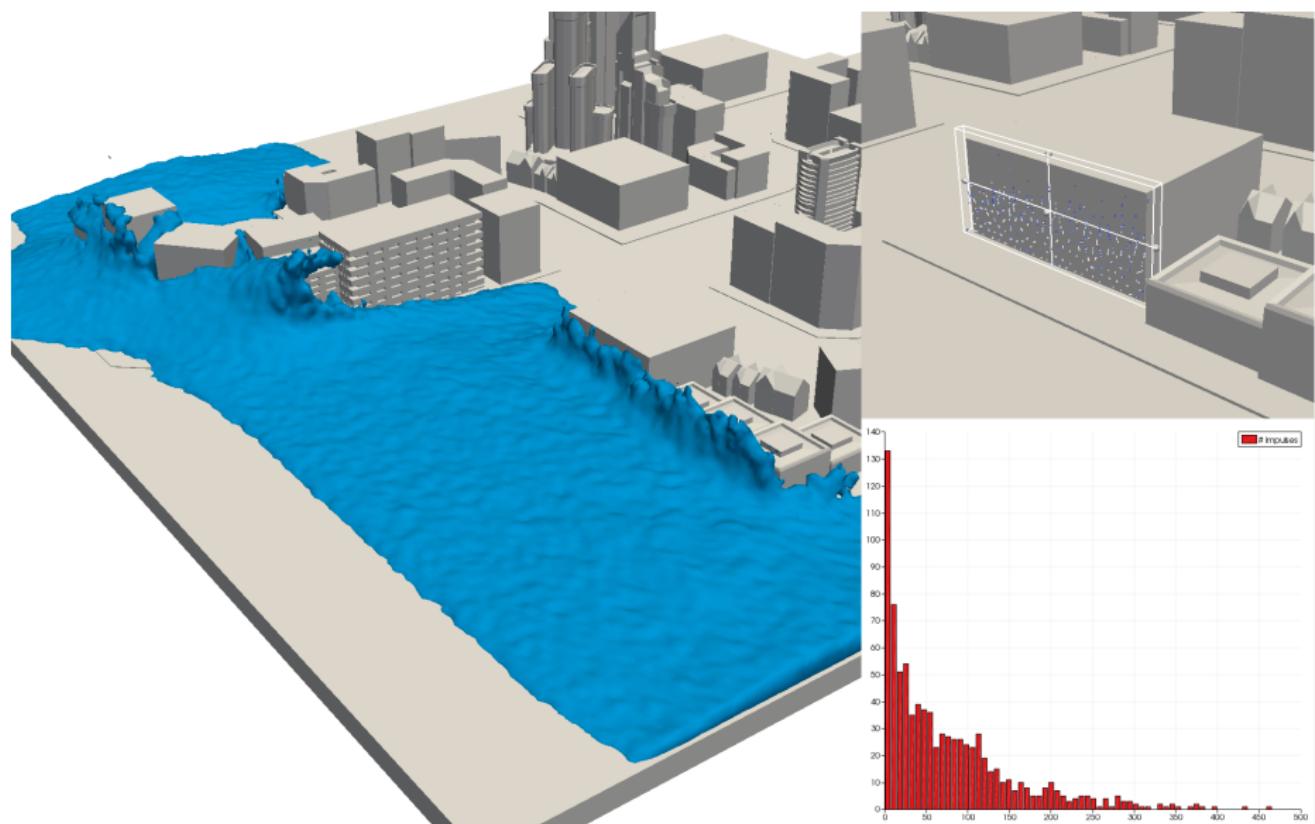
Βήματα βρόχου προσομοίωσης

1. Καθαρισμός δεδομένων των σωματιδίων που πρόκειται να επανυπολογιστούν
2. Ανιχνευση αλληλεπιδράσεων με παράλληλη σάρωση όλου του πλέγματος
3. Υπολογισμός πυκνότητας στις θέσεις των σωματιδίων μέσω προοδευτικής άθροισης των αμοιβαίων συνεισφορών των αλληλεπιδρώντων ζευγών
4. Υπολογισμός πίεσης μέσω της καταστατικής εξίσωσης του ρευστού, συναρτήσει της πυκνότητας
5. Υπολογισμός και εφαρμογή των ώσεων που υπολογίζονται ως το γινόμενο των δυνάμεων πίεσης/ιξώδους και του χρονικού βήματος, αντισυμμετρικών για κάθε ζεύγος αλληλεπίδρασης
6. Καταγραφή/αποθήκευση των ώσεων (impulses) του ρευστού προς την ακτογραμμή
7. Ενημέρωση του πλέγματος αποθήκευσης των σωματιδίων
8. Υπολογισμός χρωματικού πεδίου και συνεισφοράς στο αθροιστικό πεδίο ώσεων

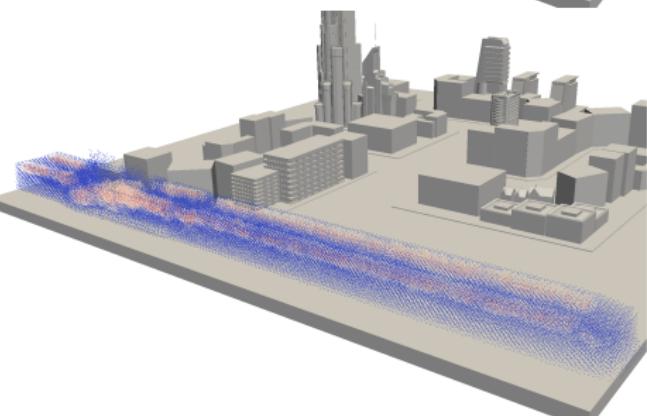
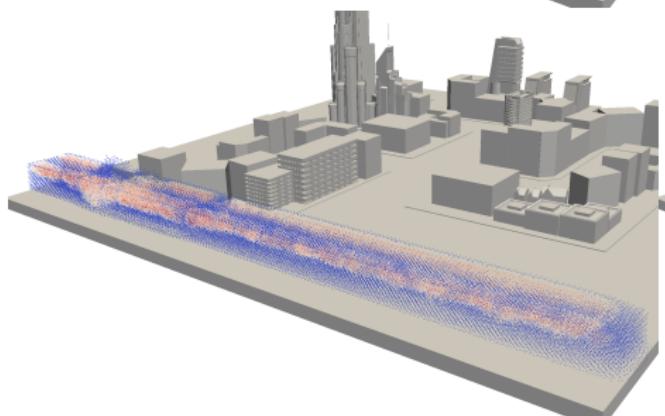
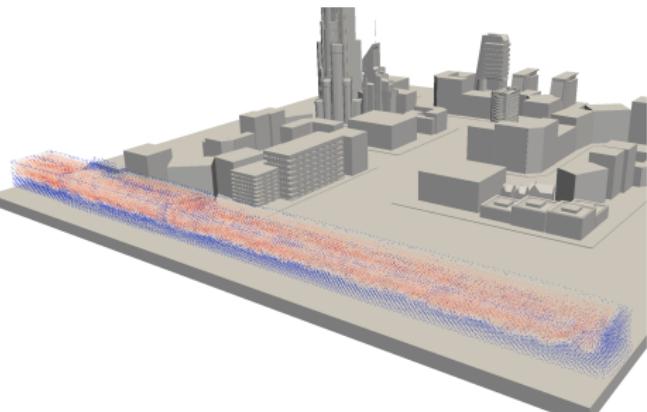
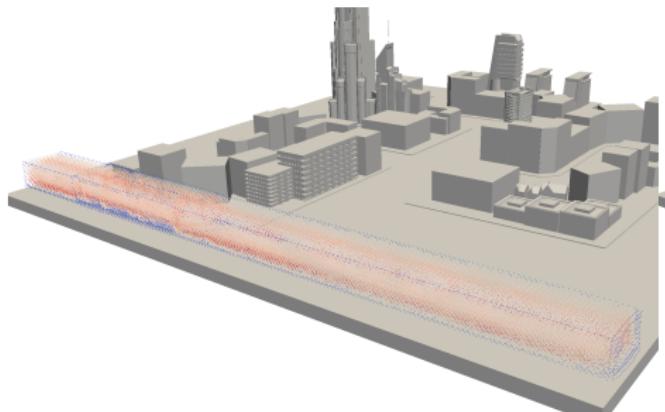


Αποτελέσματα

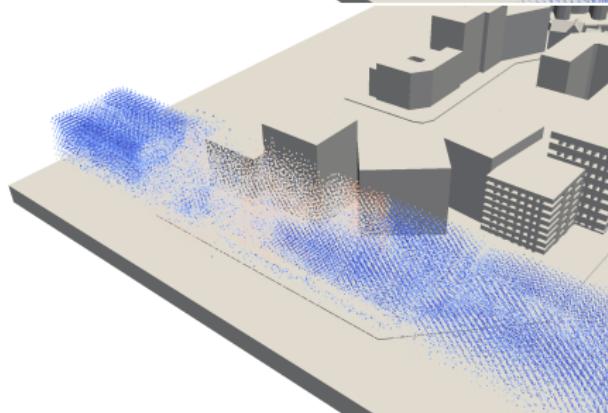
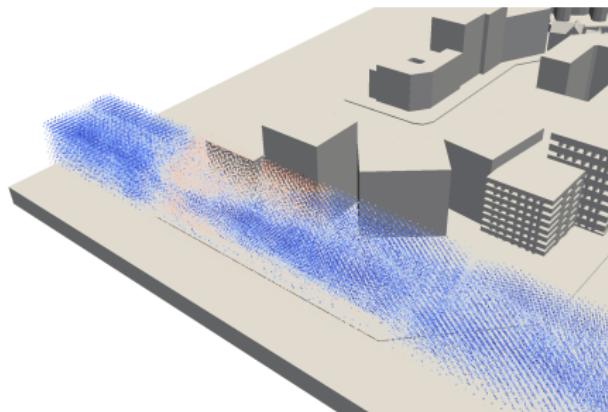
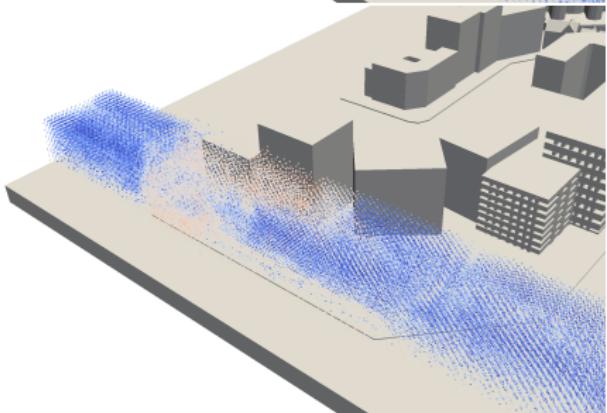
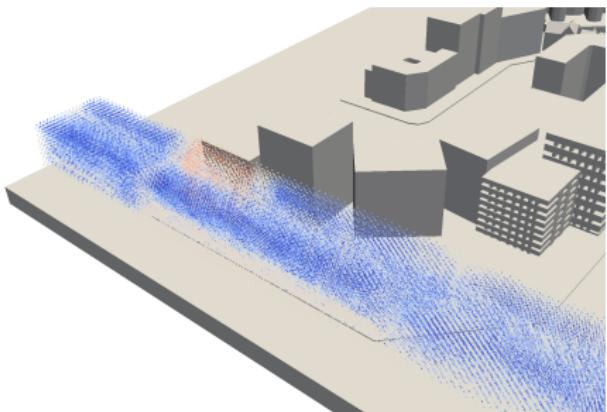
Διαδραστική οπτικοποίηση



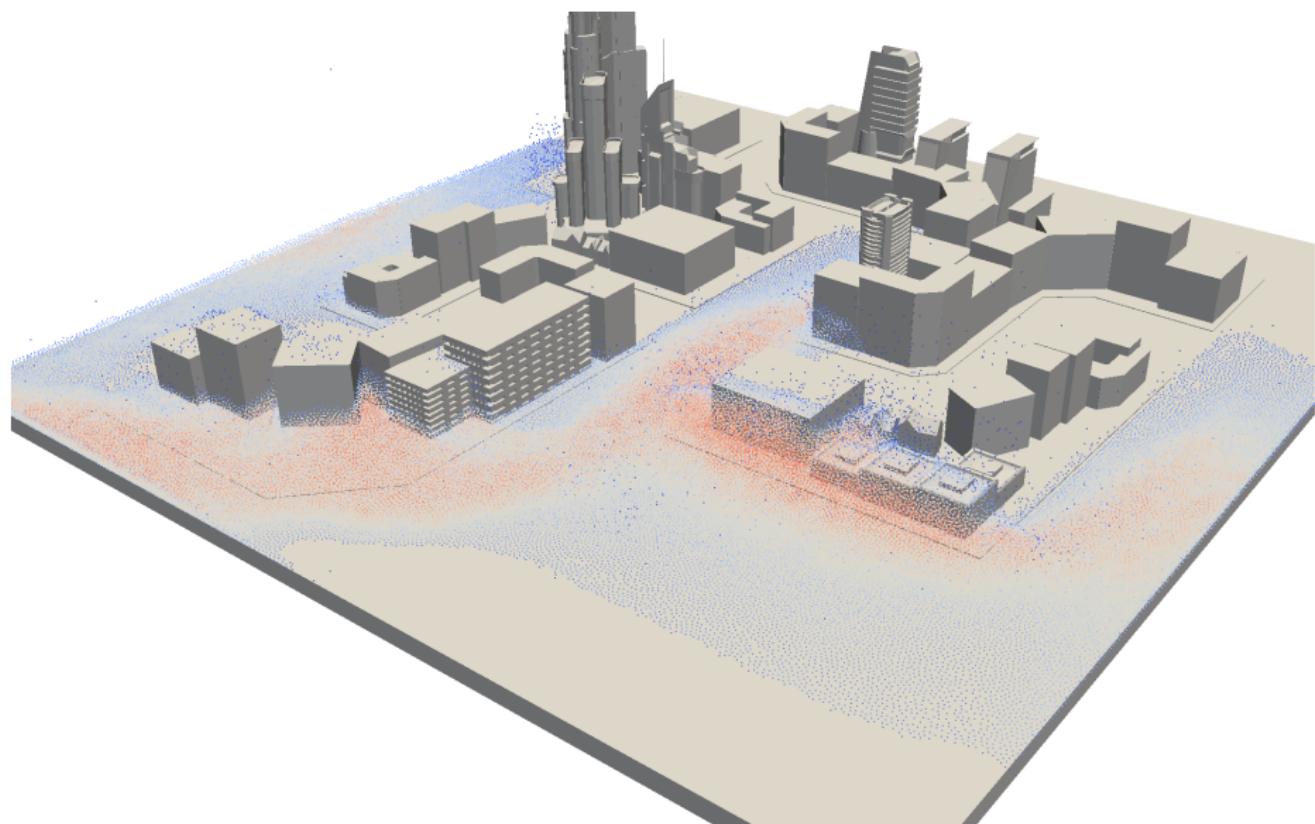
Πίεση



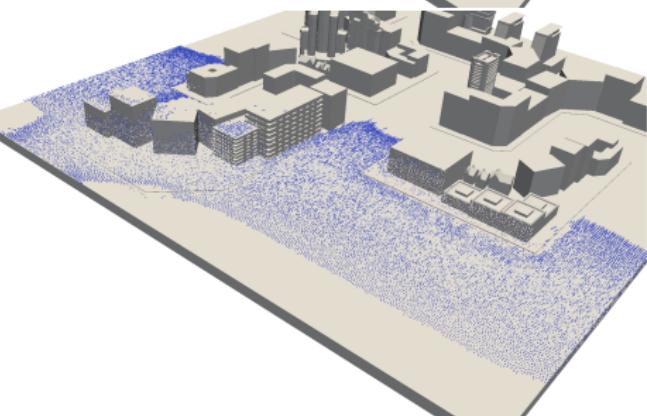
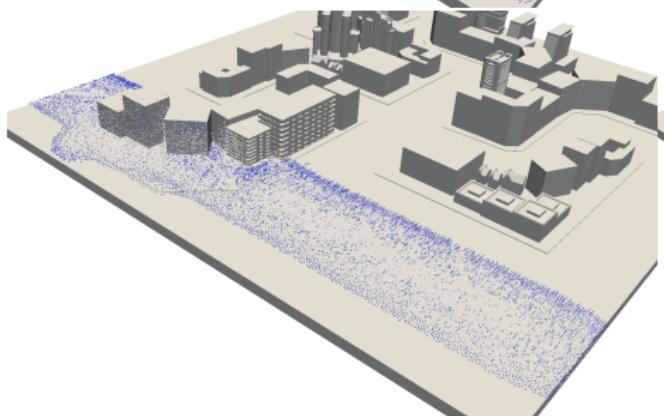
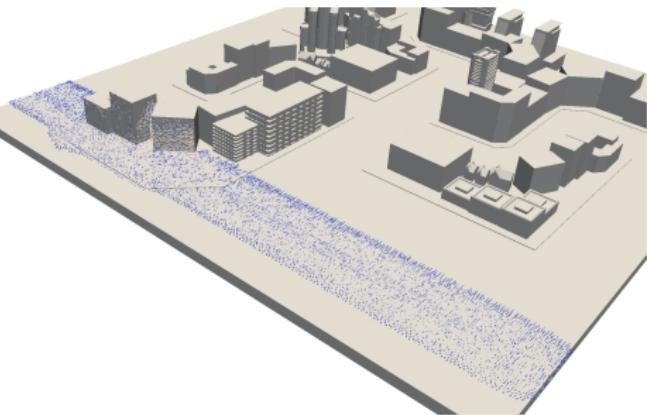
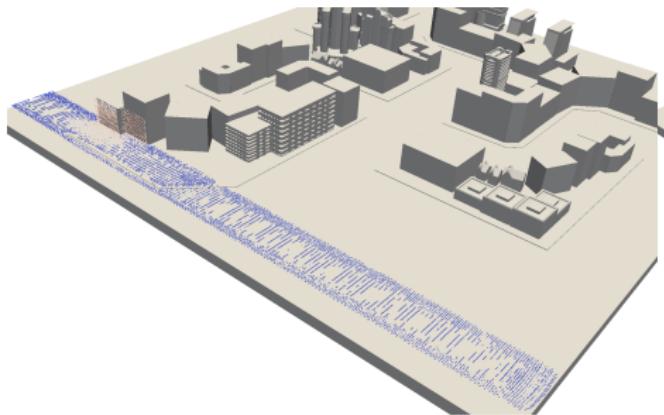
Ιξώδες



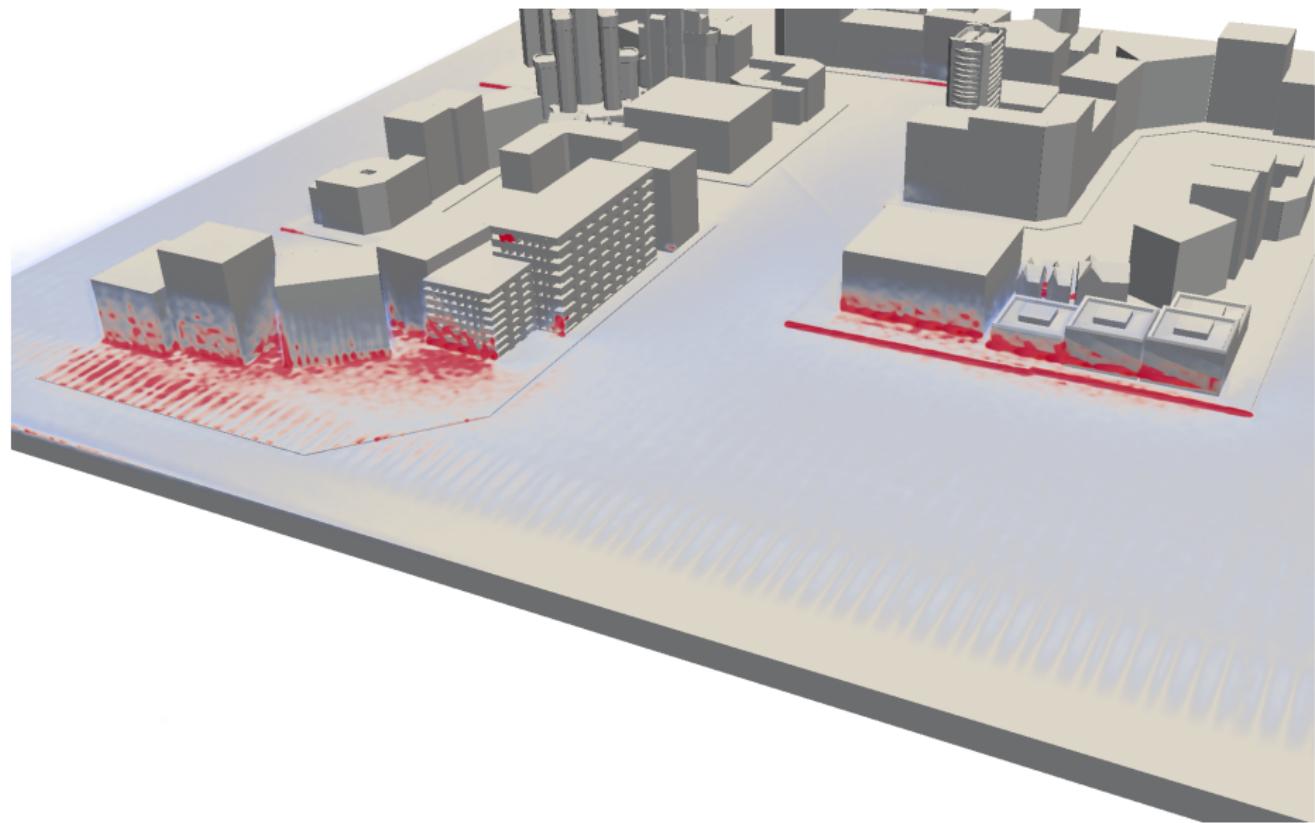
Αριθμός γειτονικών σωματιδίων



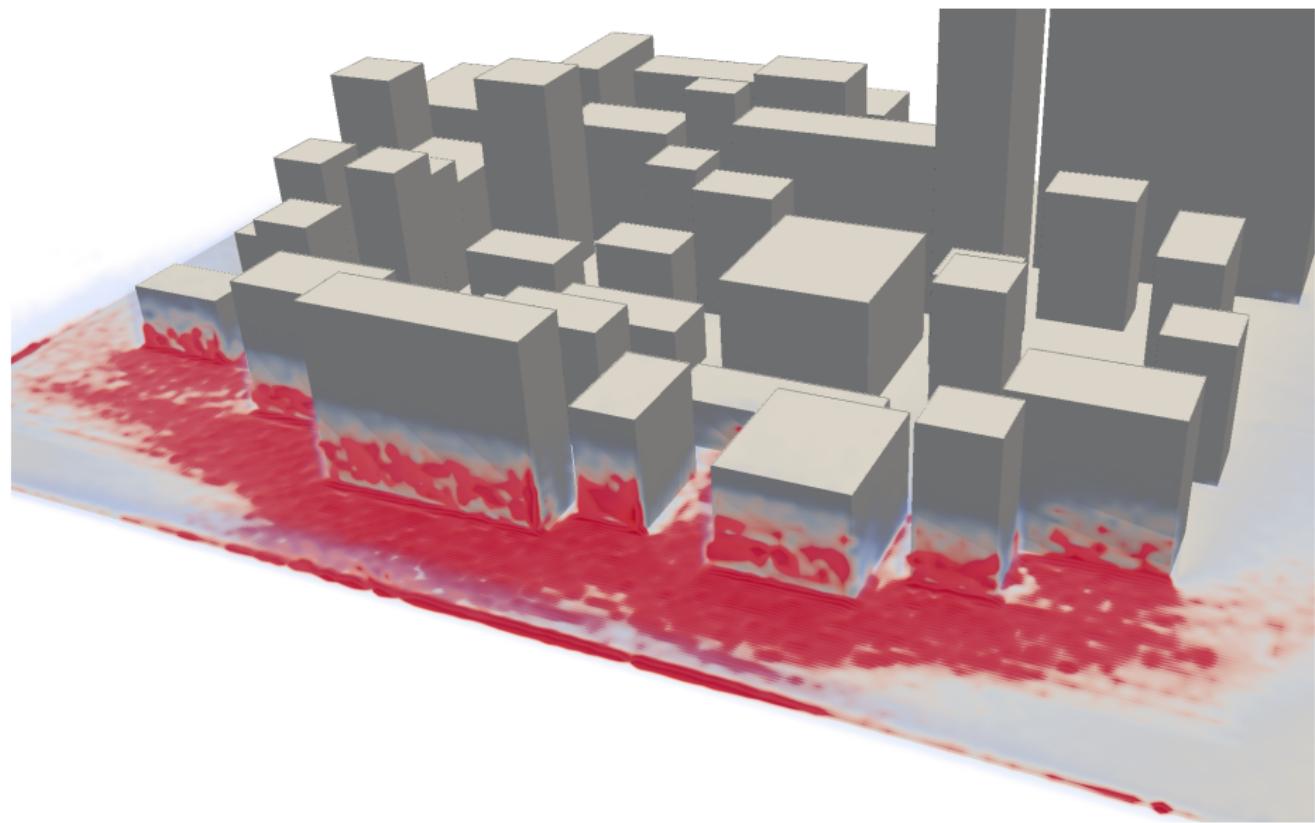
‘Ωσεις



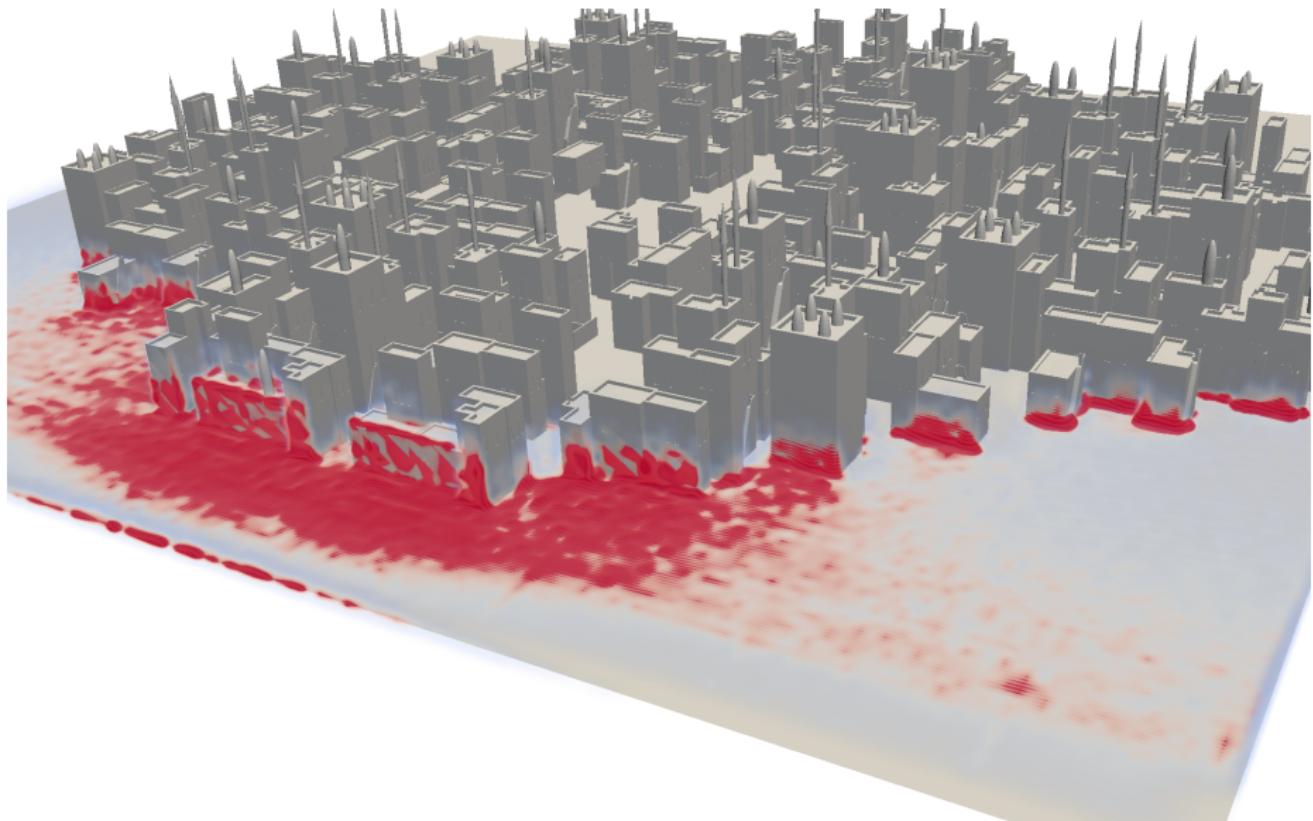
Heatmap ώσεων



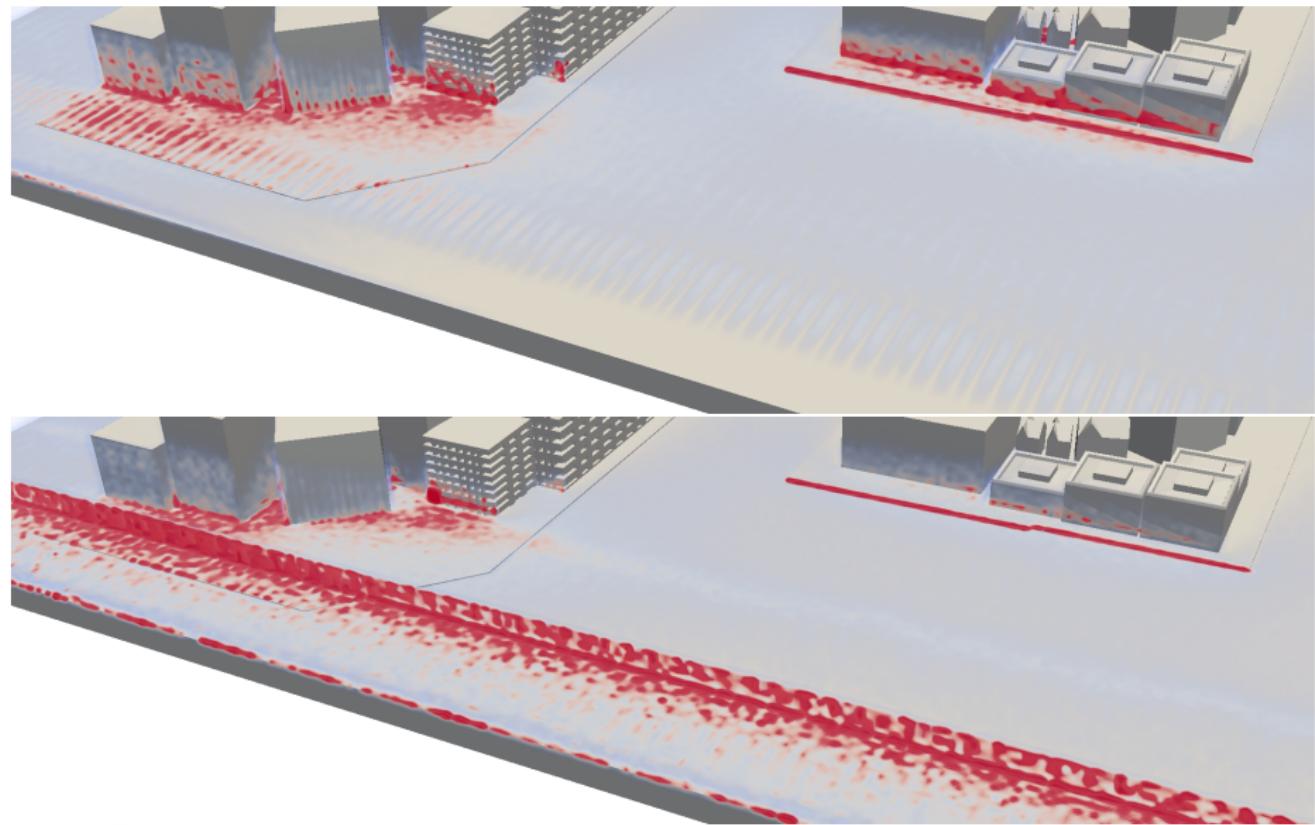
Heatmap ώσεων



Heatmap ώσεων



Αποτελεσματικότητα κυματοθραύστη



Ευχαριστώ!

Ερωτήσεις: