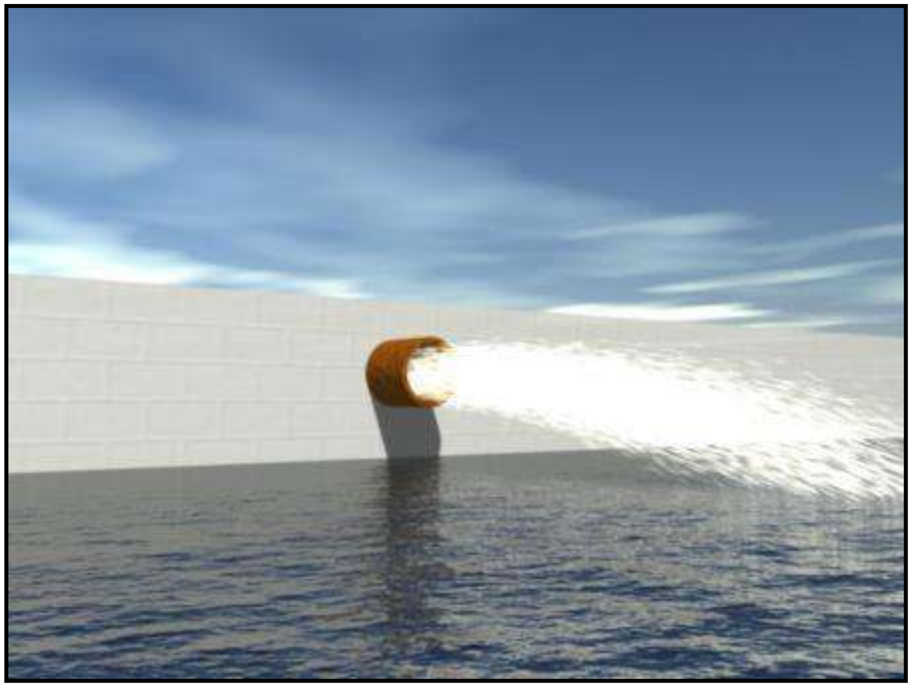
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ανάλυση Φαινομένων Μεταφοράς με το COMSOL

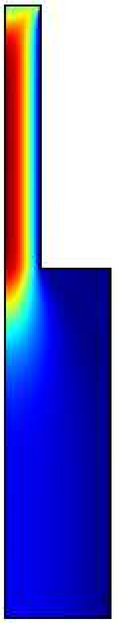
(Μέρος 2^{o})



Διδάσκοντες : Α. Παπαθανασίου – Μ. Καβουσανάκης

Παράδειγμα 1

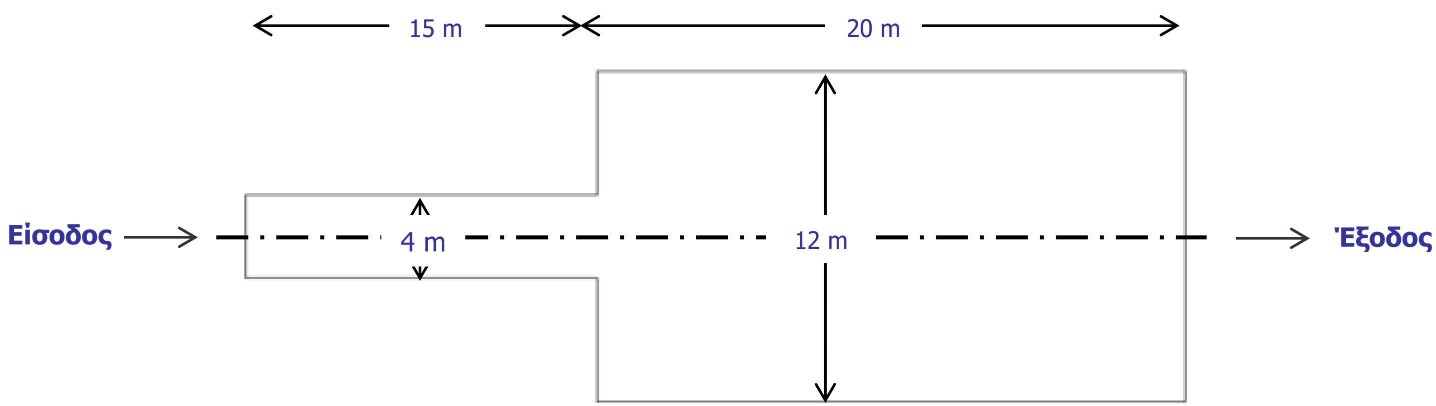
Ροή σε αγωγό με απότομη μεταβολή της διαμέτρου του



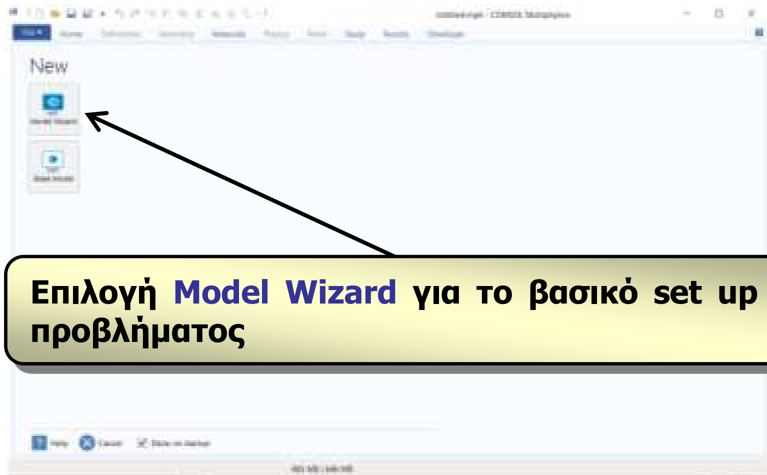
Διατύπωση του προβλήματος

Ρευστό κινείται σε αγωγό κυκλικής διατομής, ο οποίος διευρύνεται απότομα. Χρησιμοποιώντας το COMSOL, θα προσομοιωθεί το φαινόμενο σε μόνιμη κατάσταση, όταν το ρευστό έχει πυκνότητα 1kg/m^3 και κινηματικό ιξώδες 1Pa·s, εισάγεται δε στον αγωγό με ταχύτητα 3 m/s. Η επίδραση της βαρύτητας θεωρείται αμελητέα.

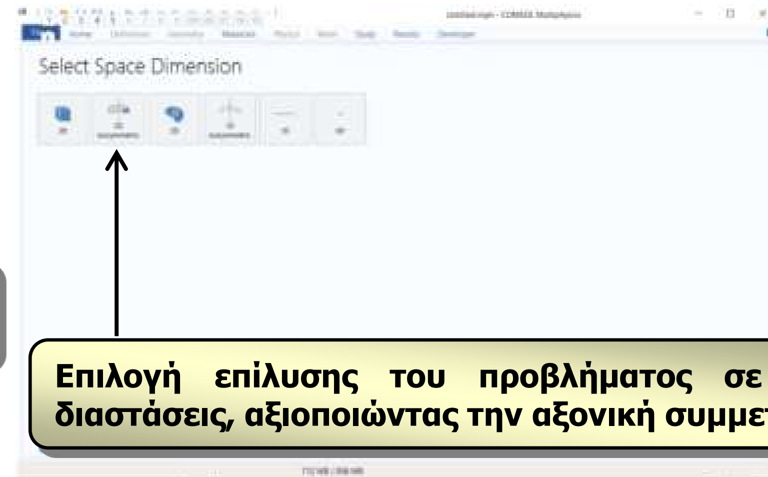
Η σχηματική απεικόνιση του προβλήματος είναι η ακόλουθη :



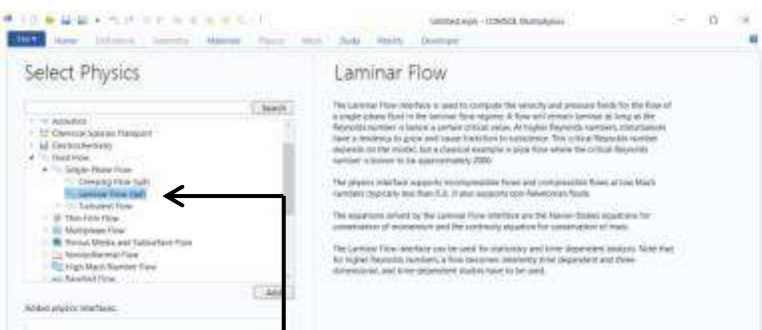
Βήμα 1 : Ρυθμίσεις στον οδηγό πλοήγησης



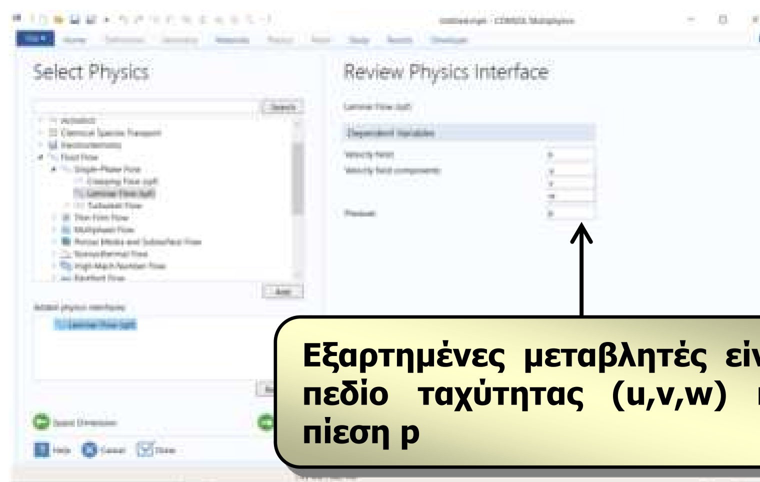
Επιλογή Model Wizard για το βασικό set up του προβλήματος



Επιλογή επίλυσης του προβλήματος σε δύο διαστάσεις, αξιοποιώντας την αξονική συμμετρία



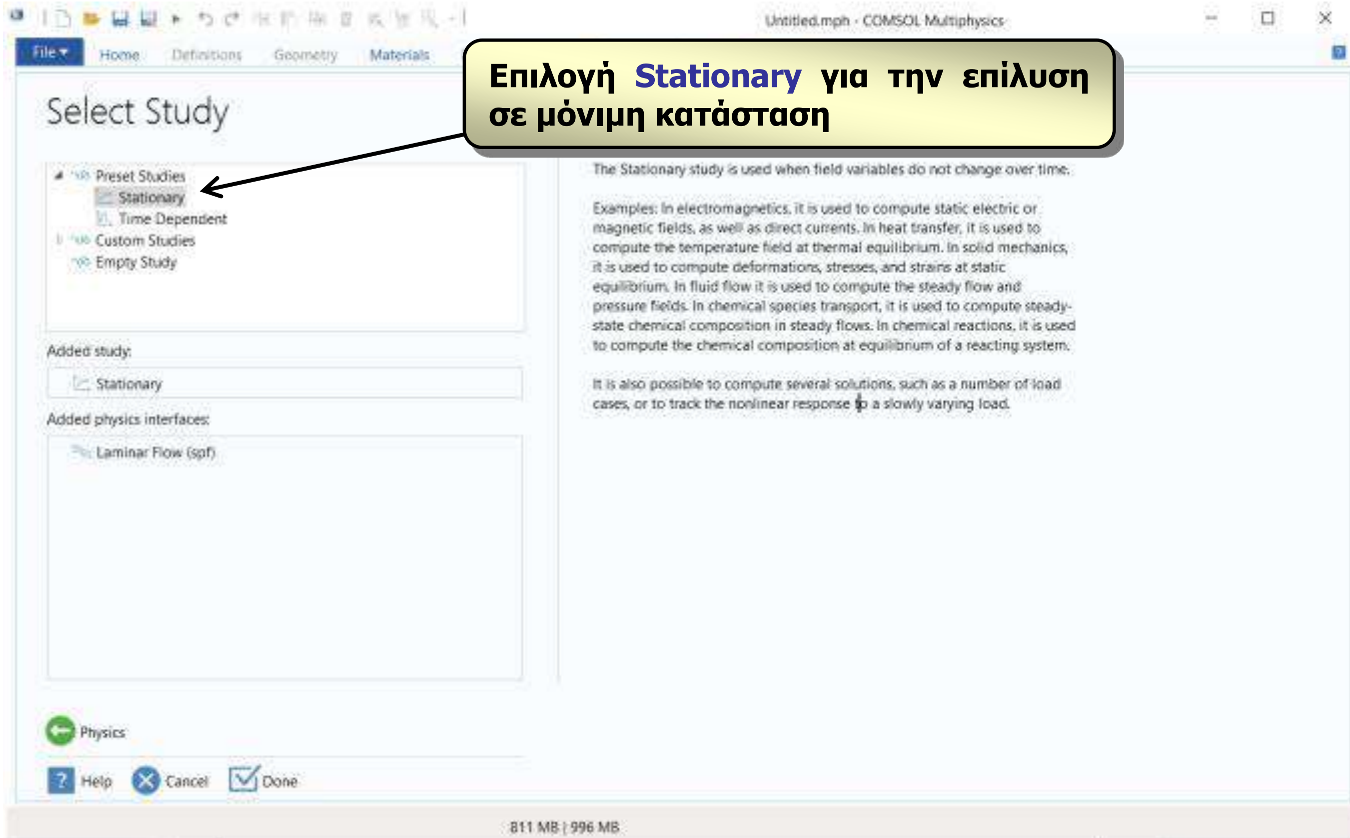
Θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Navier-Stokes. Επιλέγονται διαδοχικά : Fluid Flow > Single-Phase Flow > Laminar Flow (spf)



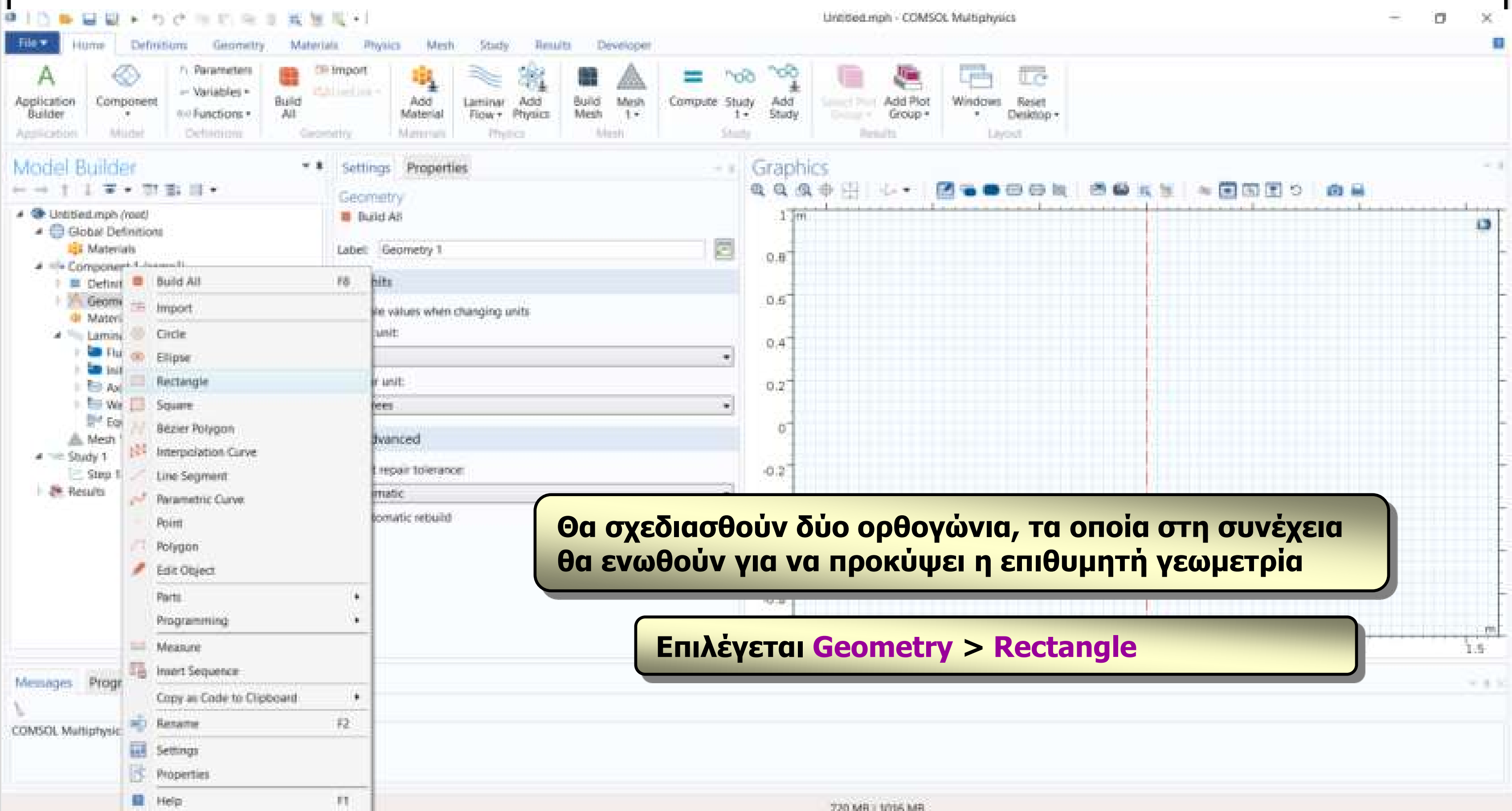
Εξαρτημένες μεταβλητές είναι το πεδίο ταχύτητας (u,v,w) και η πίεση p

Βήμα 1 : Ρυθμίσεις στον οδηγό πλοήγησης

Επιλογή Stationary για την επίλυση σε μόνιμη κατάσταση



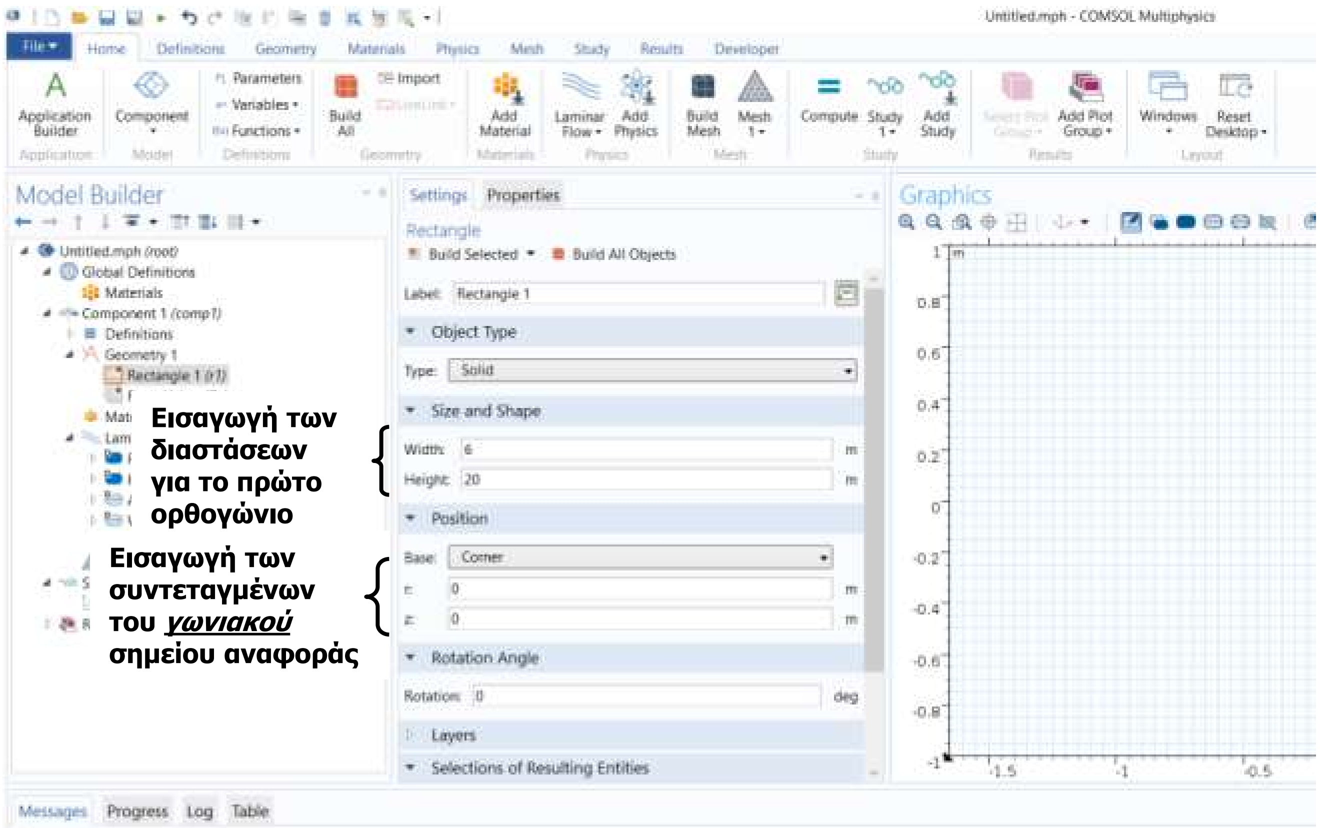
Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας



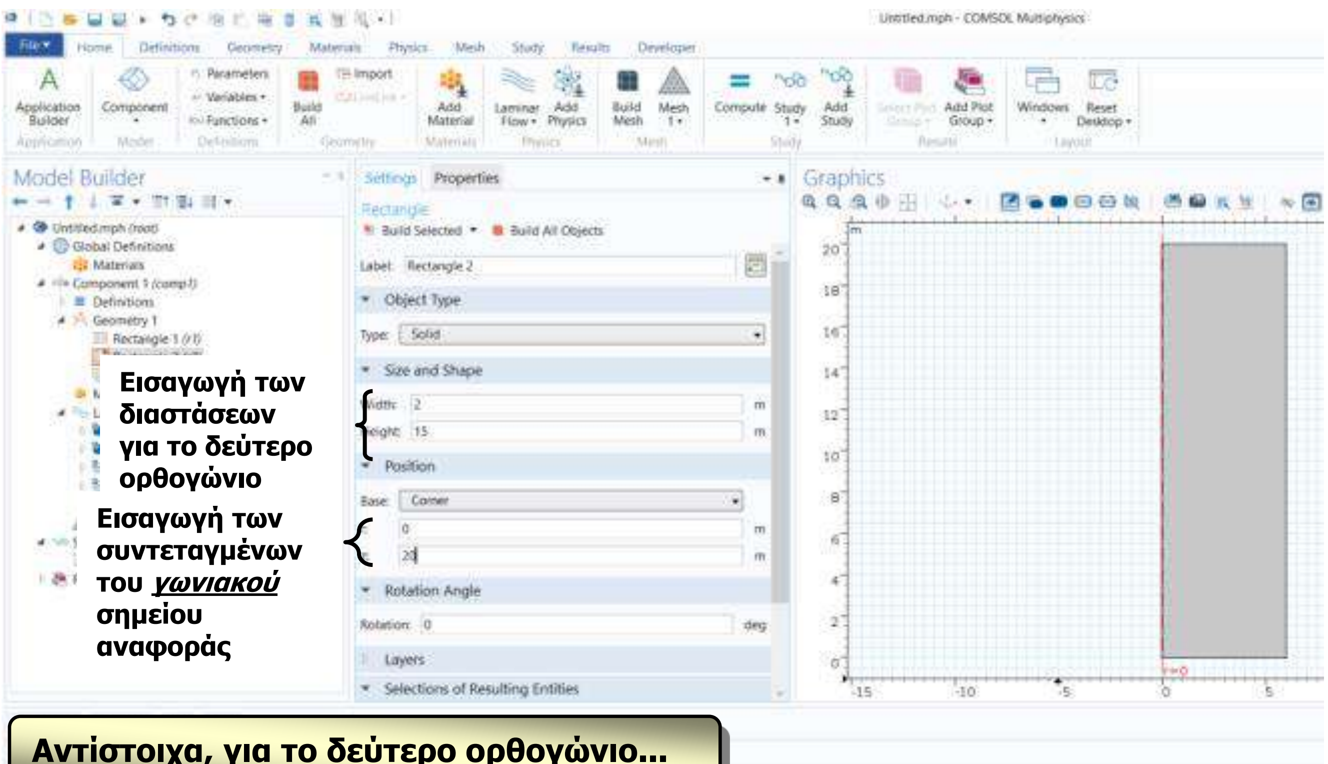
Θα σχεδιασθούν δύο ορθογώνια, τα οποία στη συνέχεια θα ενωθούν για να προκύψει η επιθυμητή γεωμετρία

Επιλέγεται Geometry > Rectangle

<u>Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας</u>



Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας

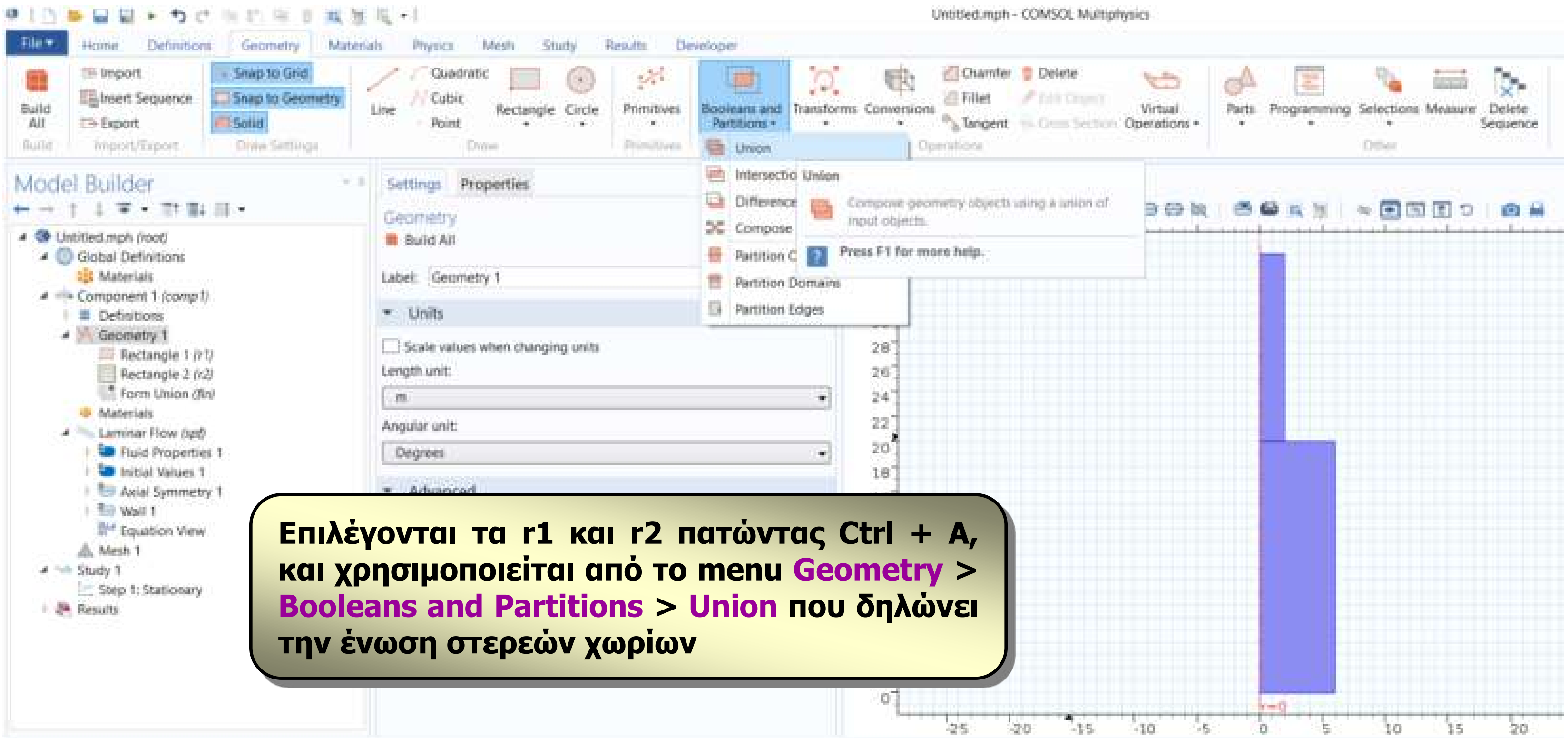


Εισαγωγή των διαστάσεων για το δεύτερο ορθογώνιο

Εισαγωγή των συντεταγμένων του ***γωνιακού*** σημείου αναφοράς

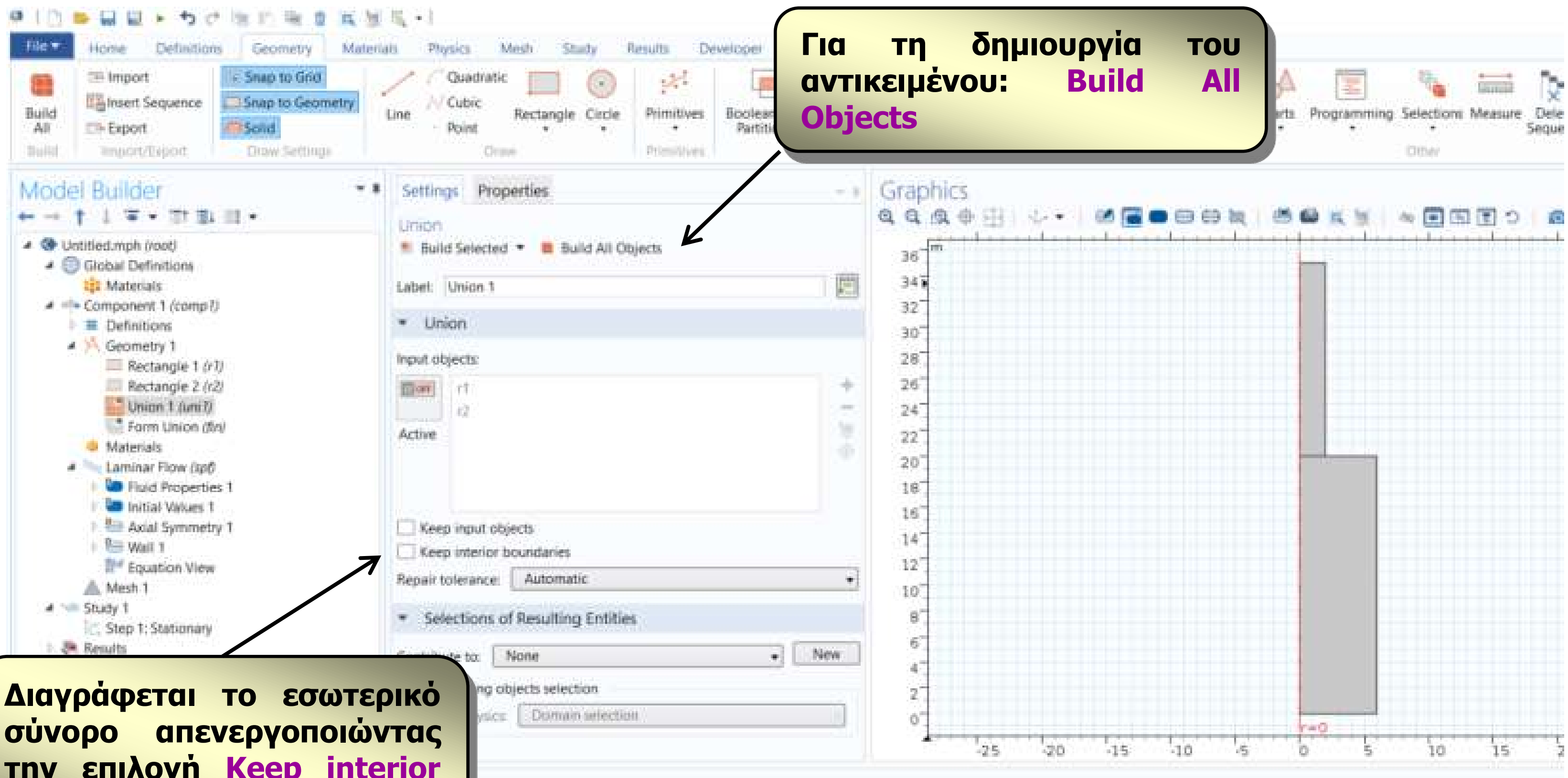
Αντίστοιχα, για το δεύτερο ορθογώνιο…

Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας



Επιλέγονται τα r1 και r2 πατώντας Ctrl + A, και χρησιμοποιείται από το menu Geometry > Booleans and Partitions > Union που δηλώνει την ένωση στερεών χωρίων

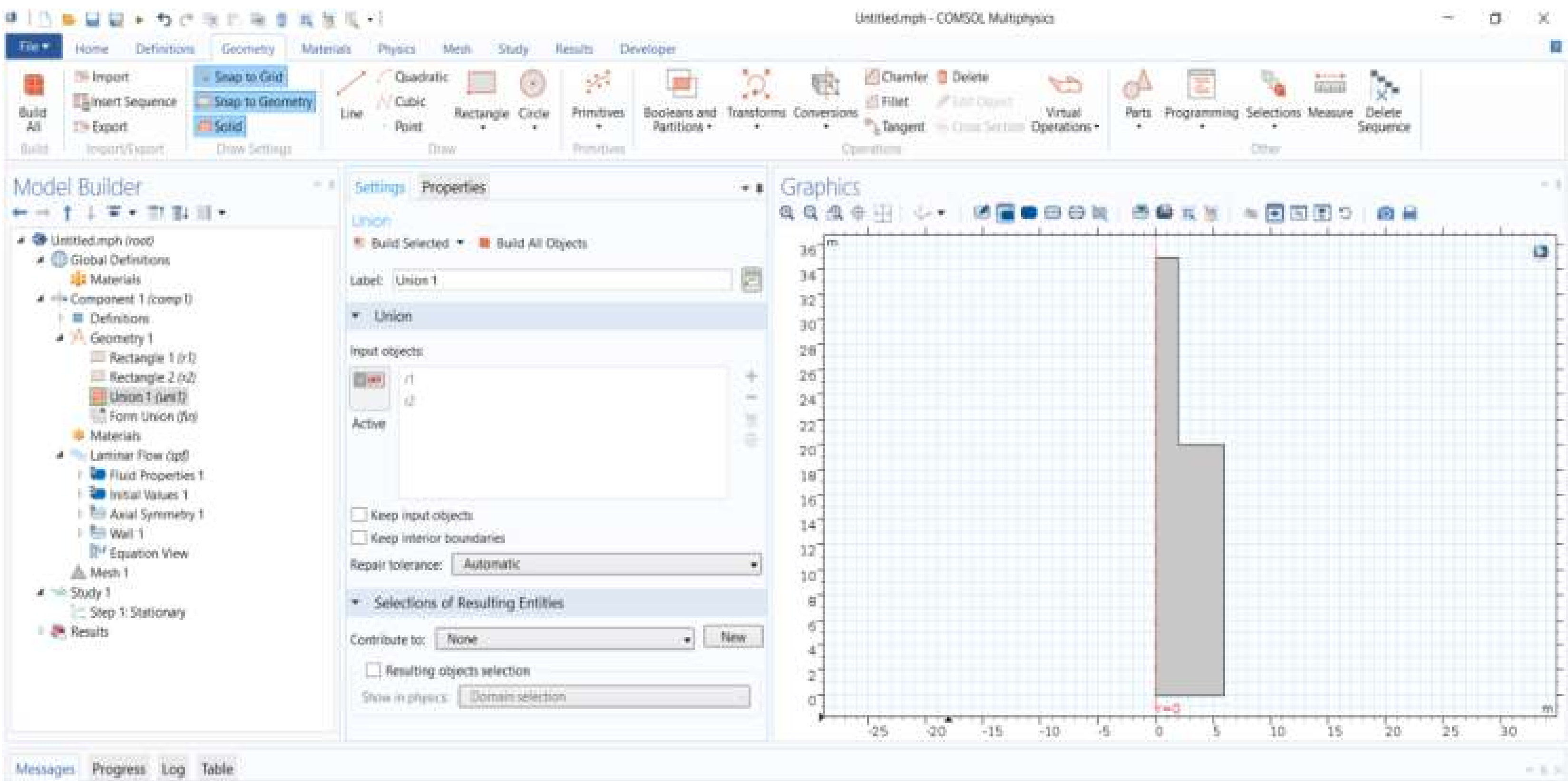
Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας



Για τη δημιουργία του αντικειμένου: **Build All Objects**

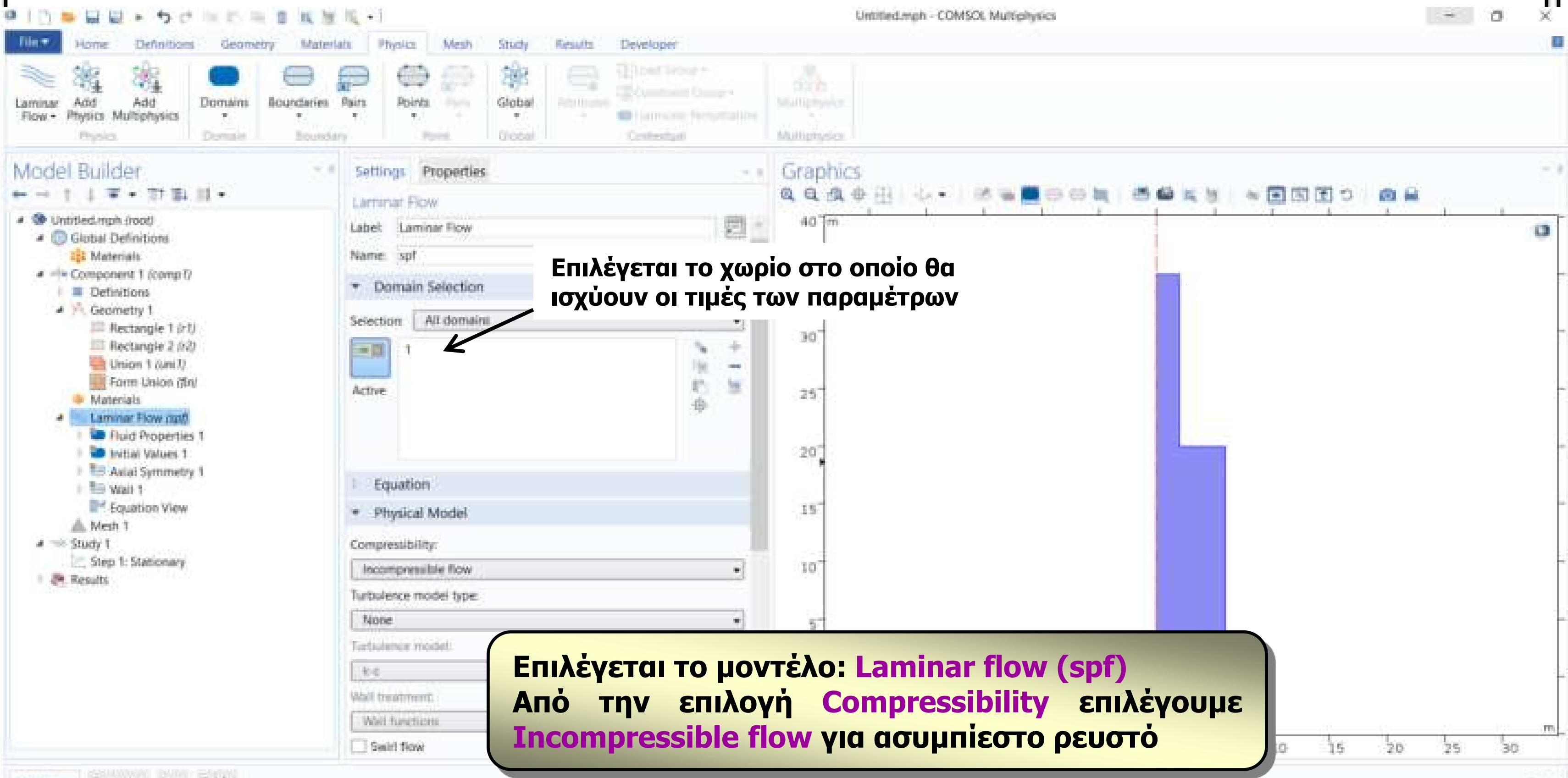
Διαγράφεται το εσωτερικό σύνορο απενεργοποιώντας την επιλογή **Keep interior boundaries**

Βήμα 2 : Σχεδιασμός γεωμετρίας



Η γεωμετρία είναι έτοιμη!

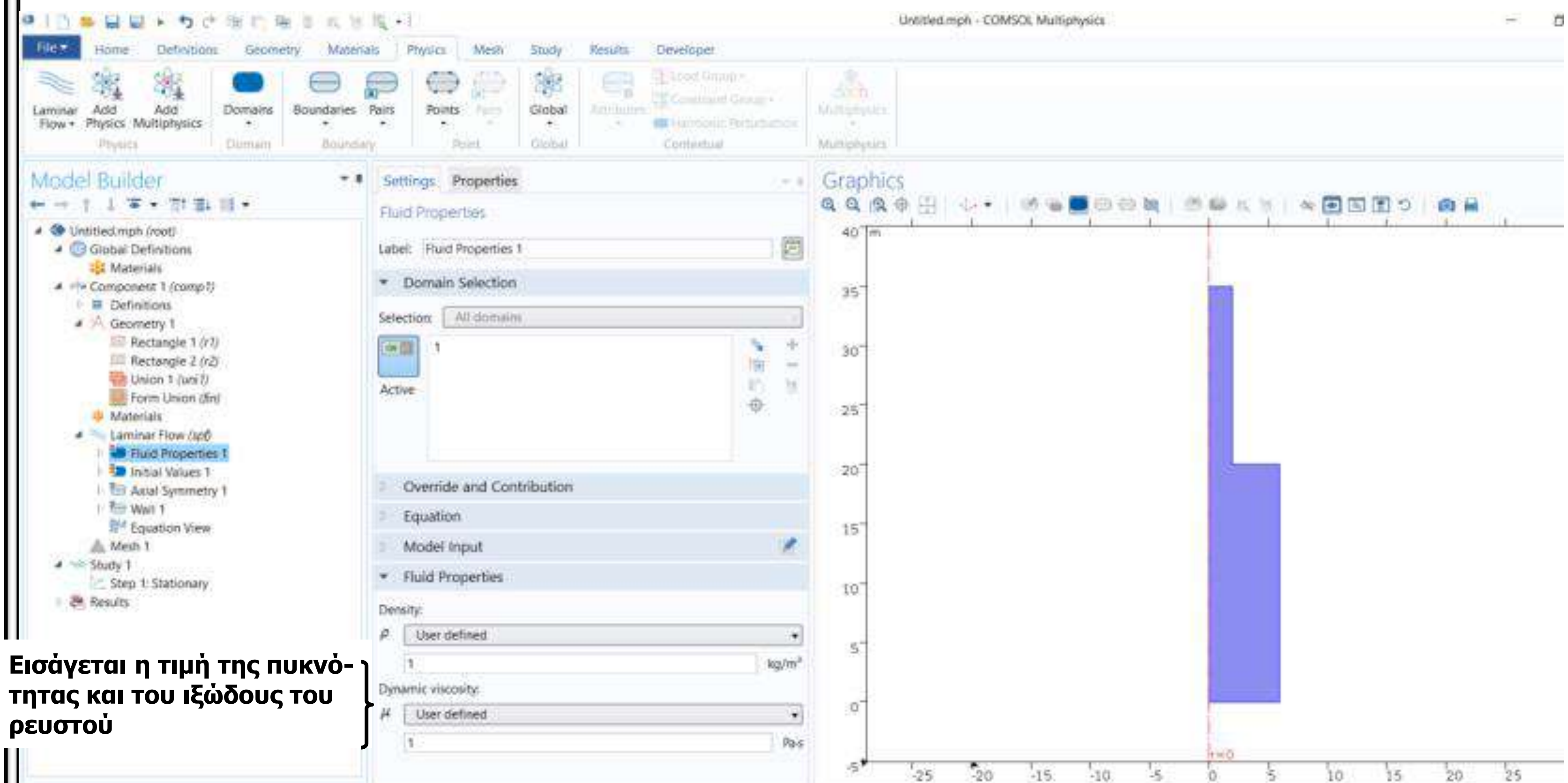
Βήμα 3 : Ορισμός των παραμέτρων



Επιλέγεται το χωρίο στο οποίο θα ισχύουν οι τιμές των παραμέτρων

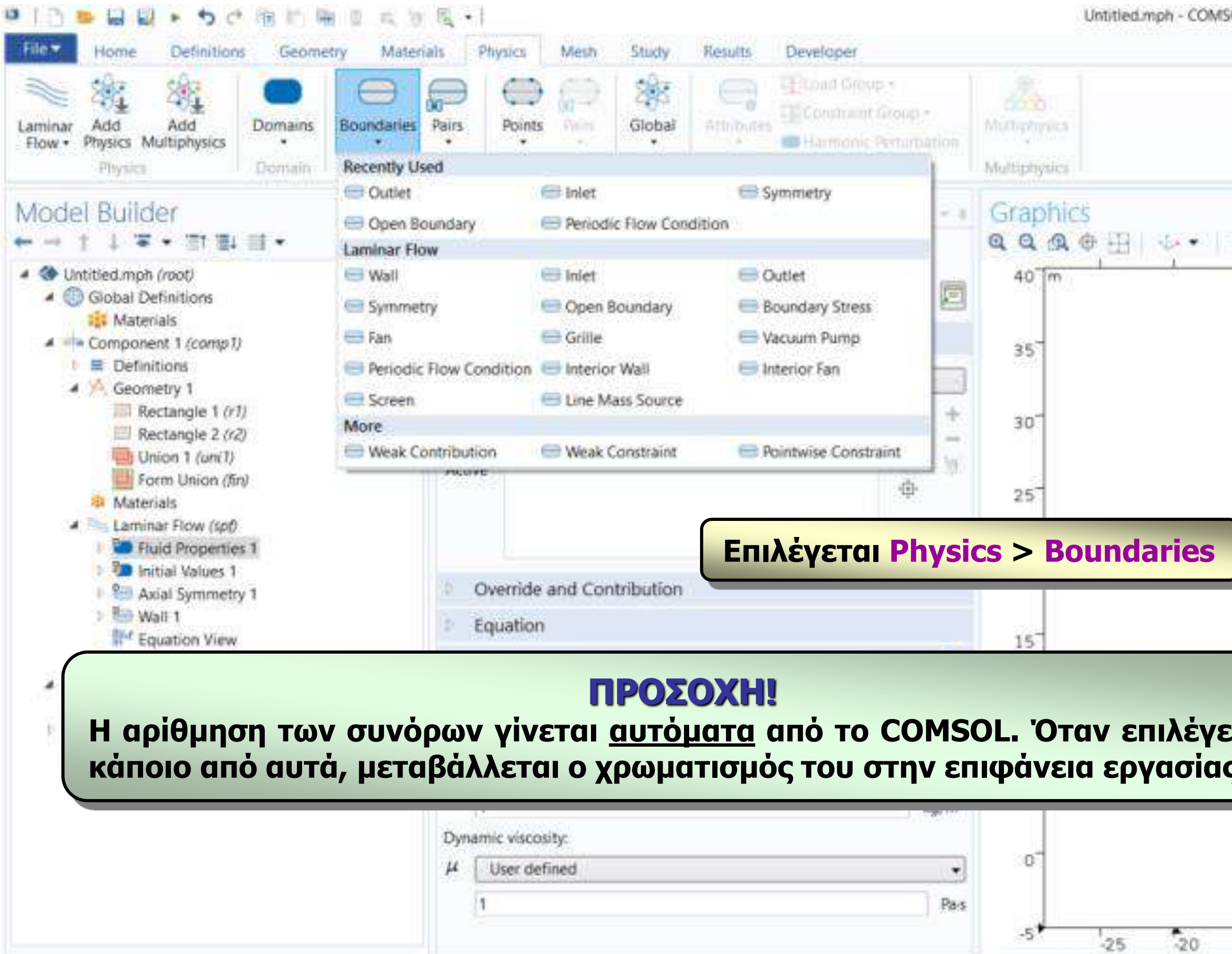
Επιλέγεται το μοντέλο: Laminar flow (spf)
Από την επιλογή Compressibility επιλέγουμε Incompressible flow για ασυμπίεστο ρευστό

Βήμα 3 : Ορισμός των παραμέτρων



Εισάγεται η τιμή της πυκνό-τητας και του ιξώδους του ρευστού

Βήμα 4 : Επιβολή συνοριακών συνθηκών

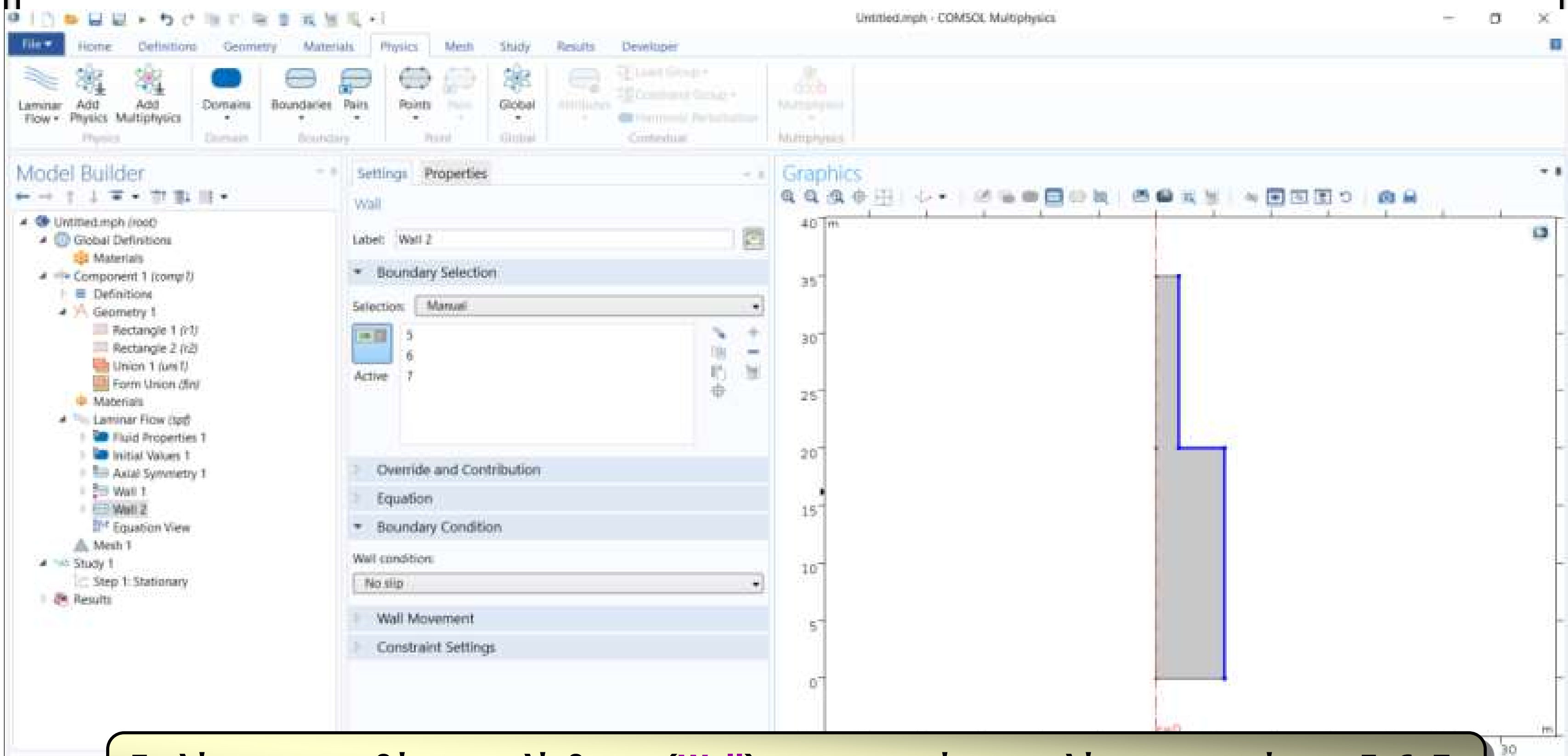


Επιλέγεται Physics > Boundaries

ΠΡΟΣΟΧΗ!

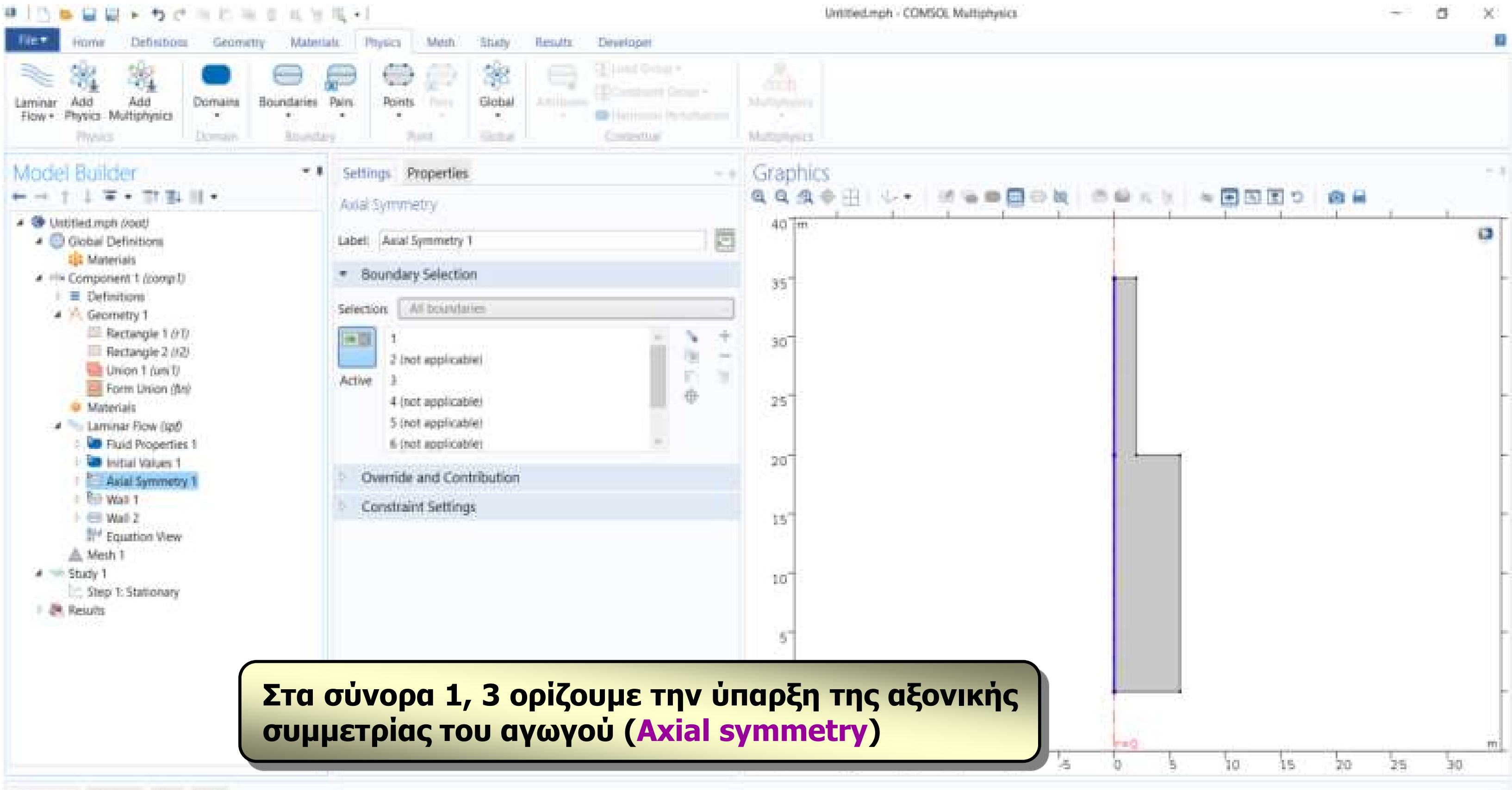
Η αρίθμηση των συνόρων γίνεται <u>αυτόματα</u> από το COMSOL. Όταν επιλέγεται κάποιο από αυτά, μεταβάλλεται ο χρωματισμός του στην επιφάνεια εργασίας.

Βήμα 4 : Επιβολή συνοριακών συνθηκών



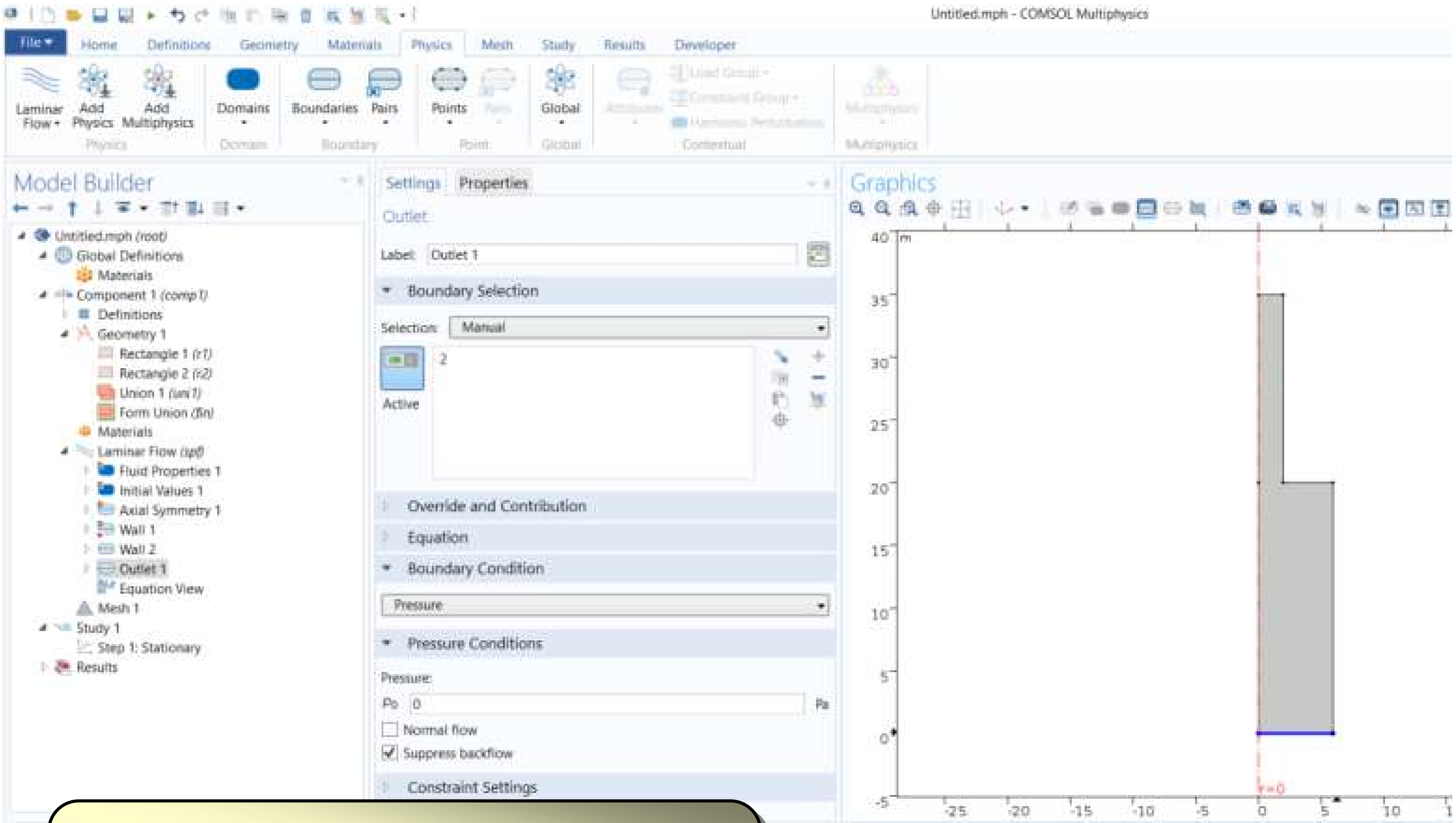
Επιλέγεται η συνθήκη μη ολίσθησης (Wall) και στη συνέχεια επιλέγονται τα σύνορα 5, 6, 7 μιας και πρόκειται για τα τοιχώματα του αγωγού

Βήμα 4 : Επιβολή συνοριακών συνθηκών



Στα σύνορα 1, 3 ορίζουμε την ύπαρξη της αξονικής συμμετρίας του αγωγού (Axial symmetry)

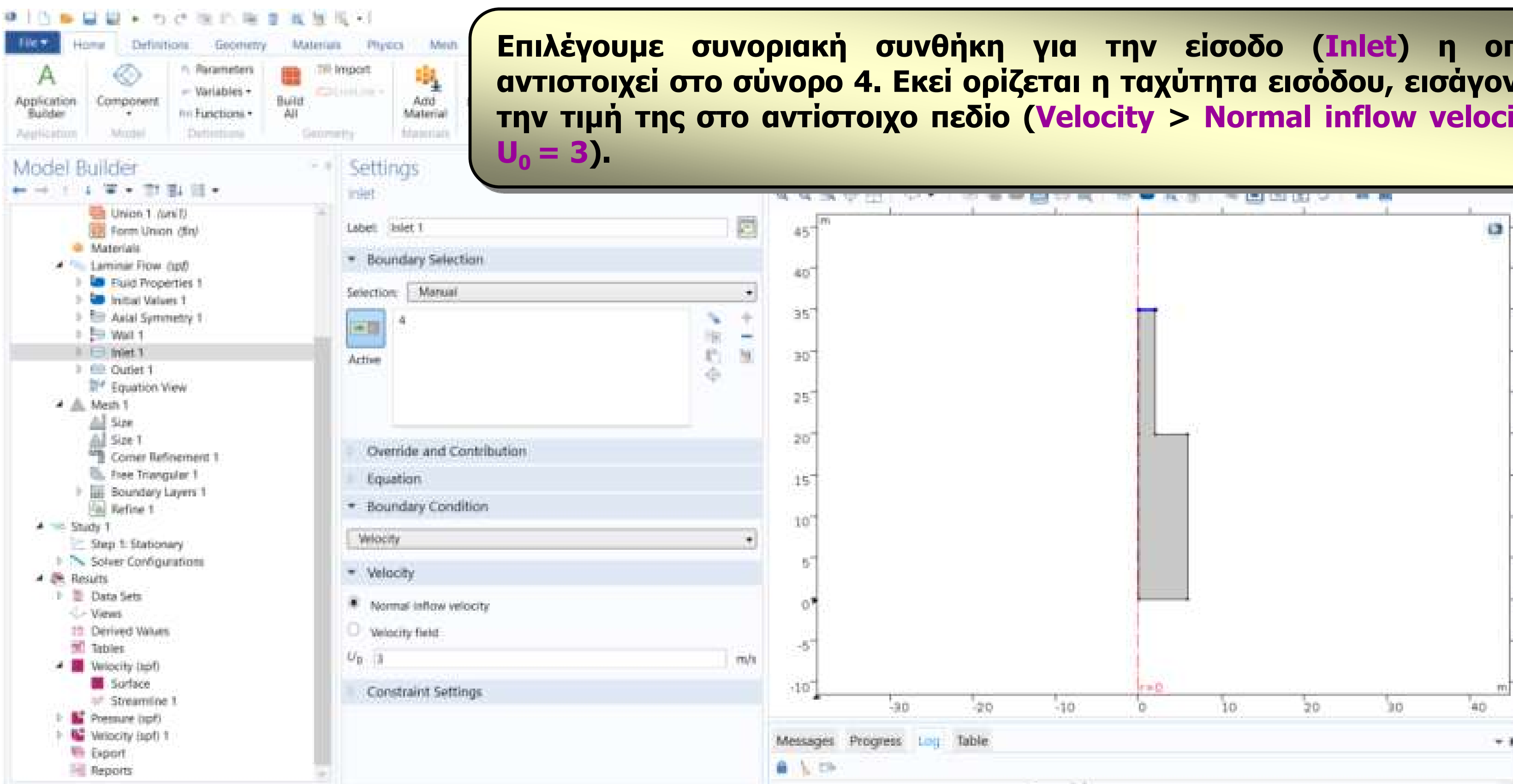
Βήμα 4 : Επιβολή συνοριακών συνθηκών



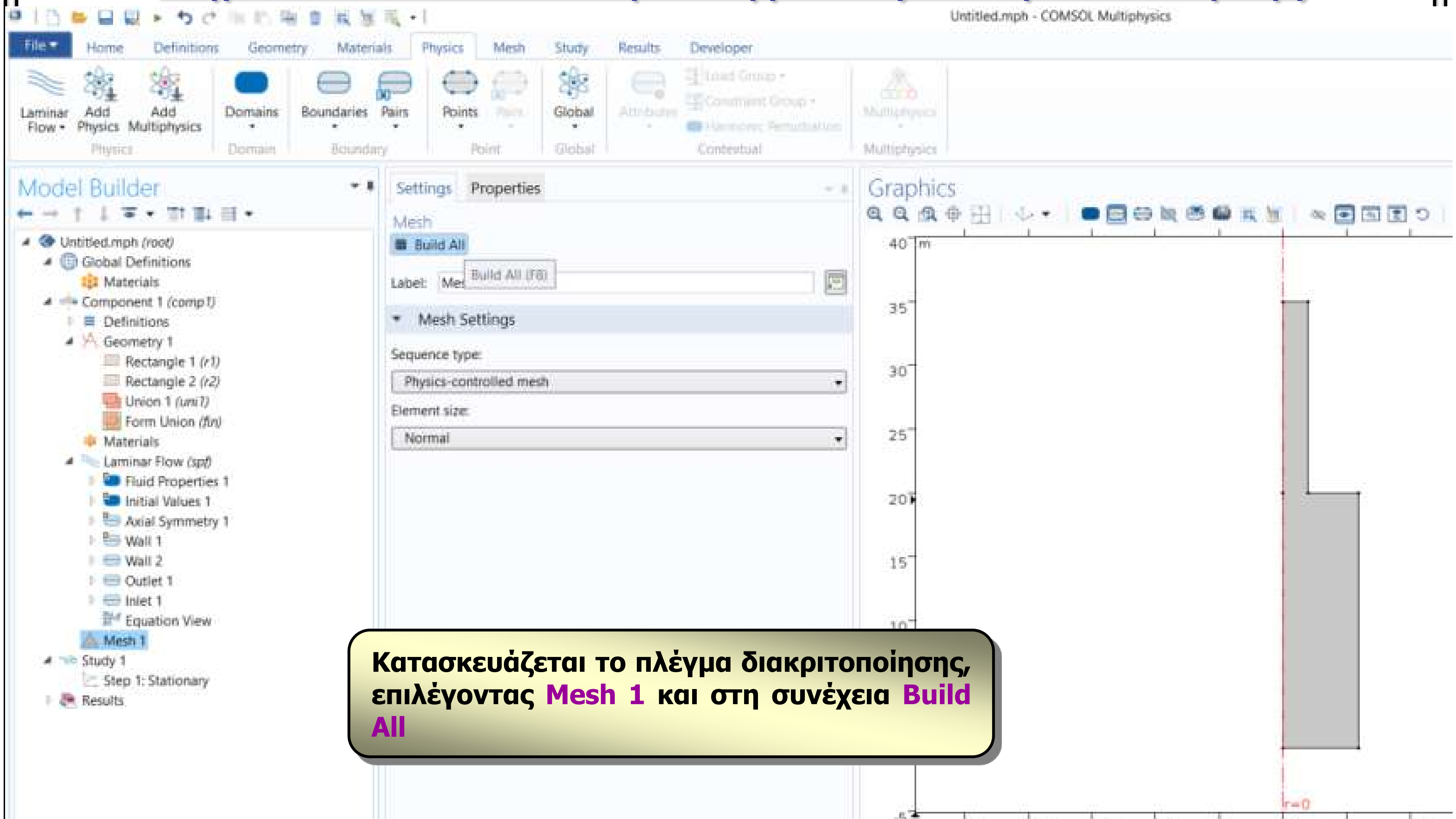
Επιλέγουμε συνοριακή συνθήκη για την έξοδο (Outlet) που αντιστοιχεί στο σύνορο 2. Ορίζεται η πίεση εξόδου ίση με την ατμοσφαιρική (Pressure : P_0=0)

Βήμα 4 : Επιβολή συνοριακών συνθηκών

Επιλέγουμε συνοριακή συνθήκη για την είσοδο (Inlet) η οποία αντιστοιχεί στο σύνορο 4. Εκεί ορίζεται η ταχύτητα εισόδου, εισάγοντας την τιμή της στο αντίστοιχο πεδίο (Velocity > Normal inflow velocity : $U_0 = 3$).

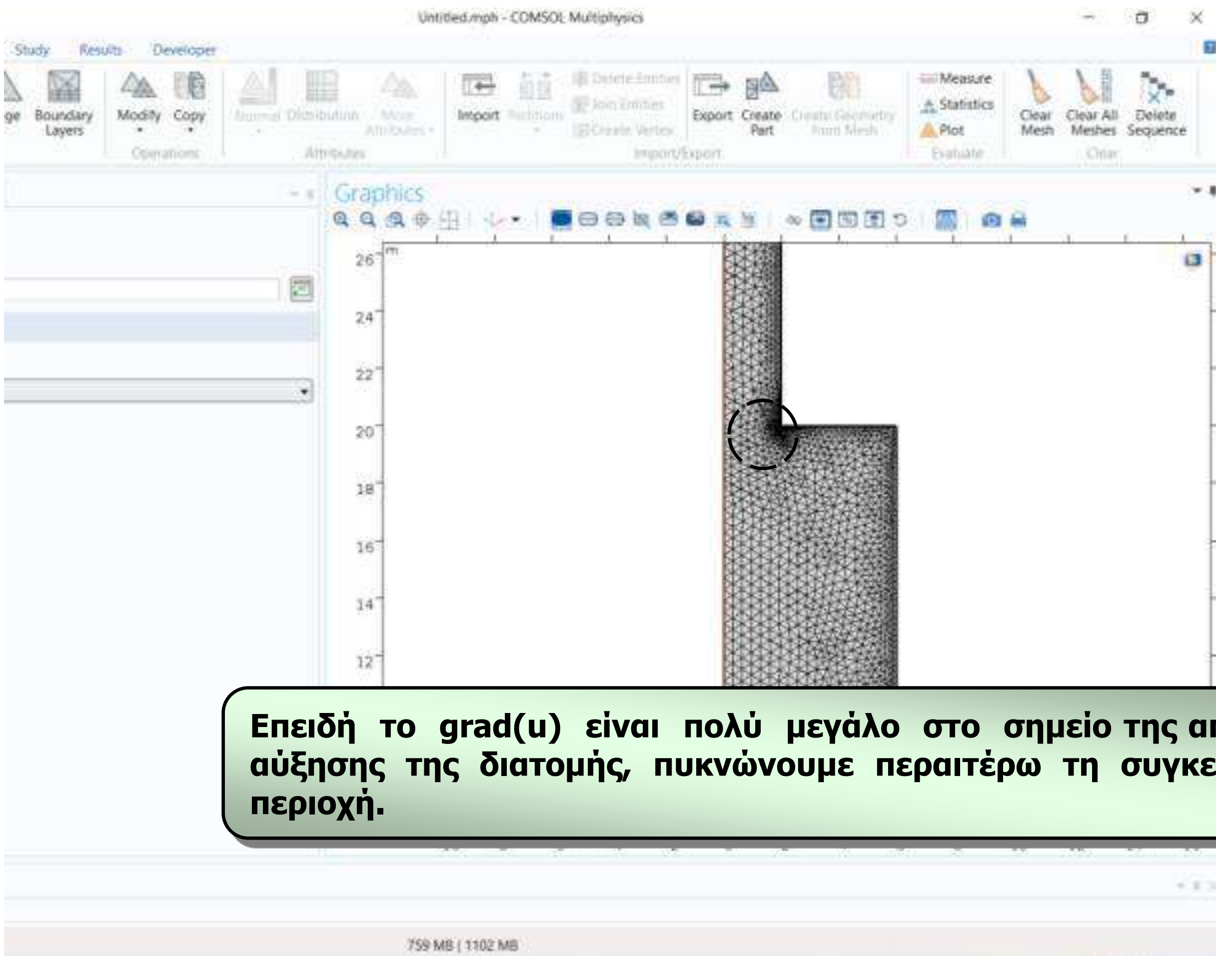


Βήμα 5 : Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης



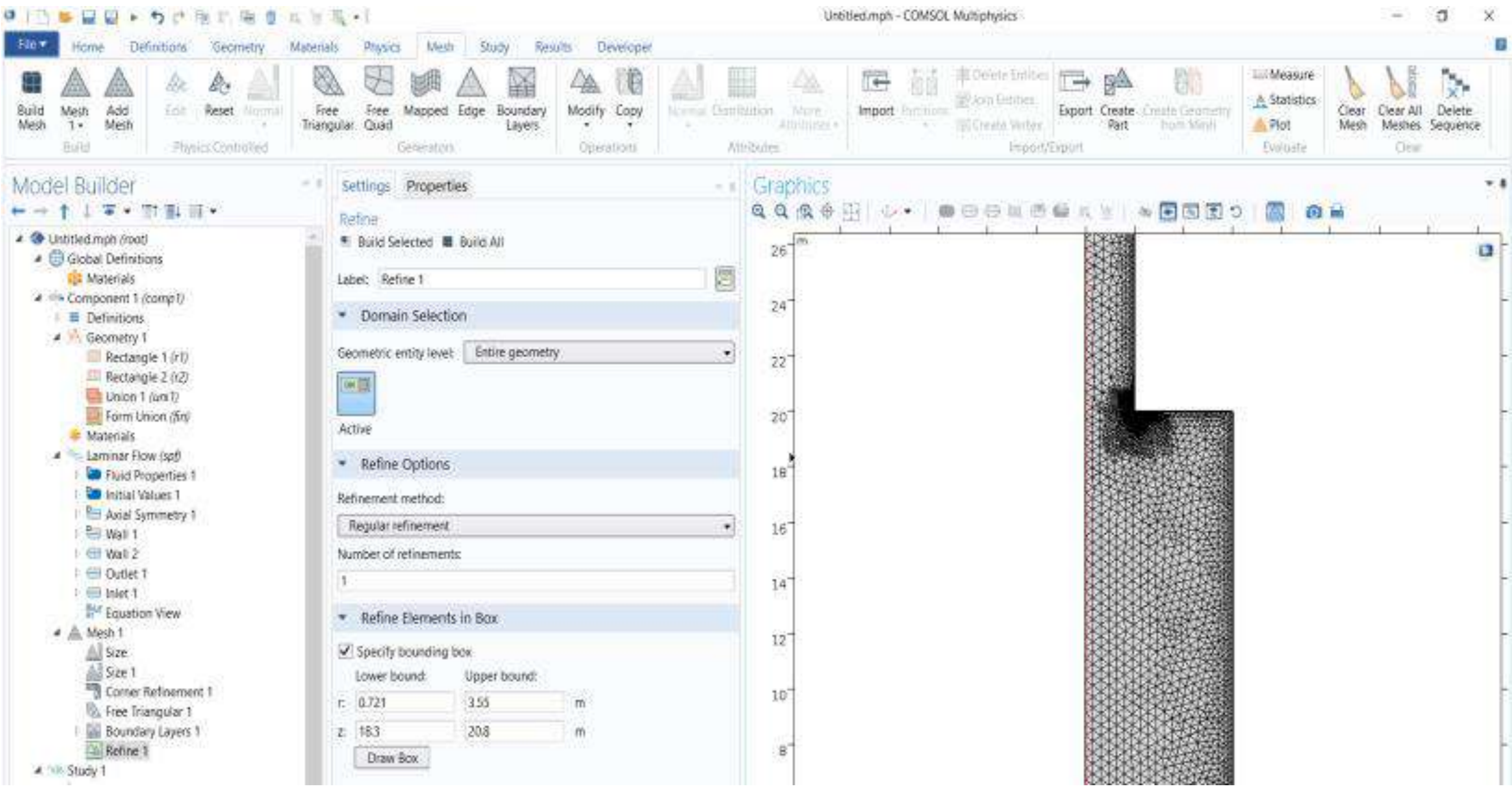
Κατασκευάζεται το πλέγμα διακριτοποίησης, επιλέγοντας Mesh 1 και στη συνέχεια Build All

Βήμα 5 : Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης



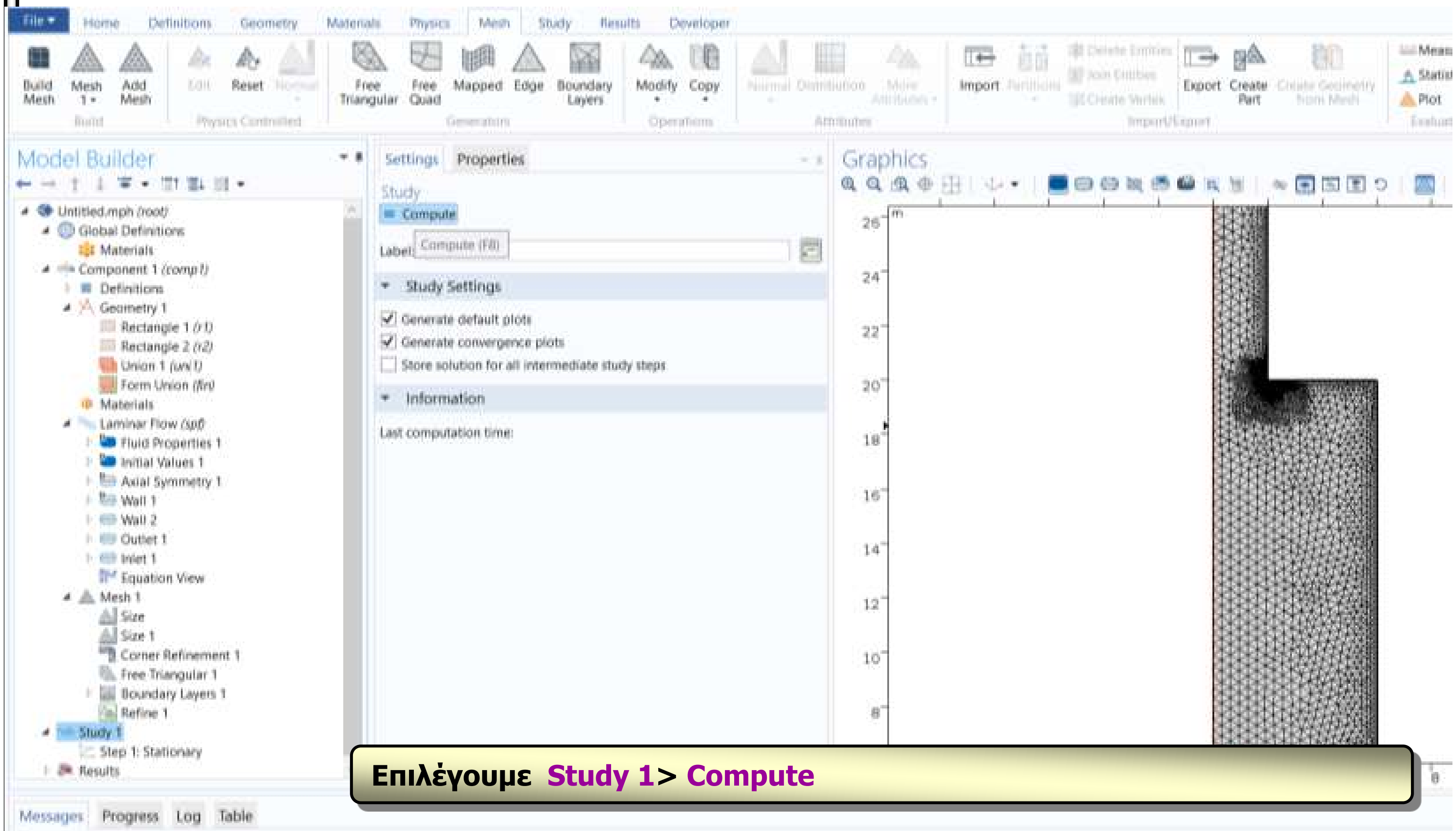
Επειδή το grad(u) είναι πολύ μεγάλο στο σημείο της απότομης αύξησης της διατομής, πυκνώνουμε περαιτέρω τη συγκεκριμένη περιοχή.

Βήμα 5 : Κατασκευή πλέγματος διακριτοποίησης



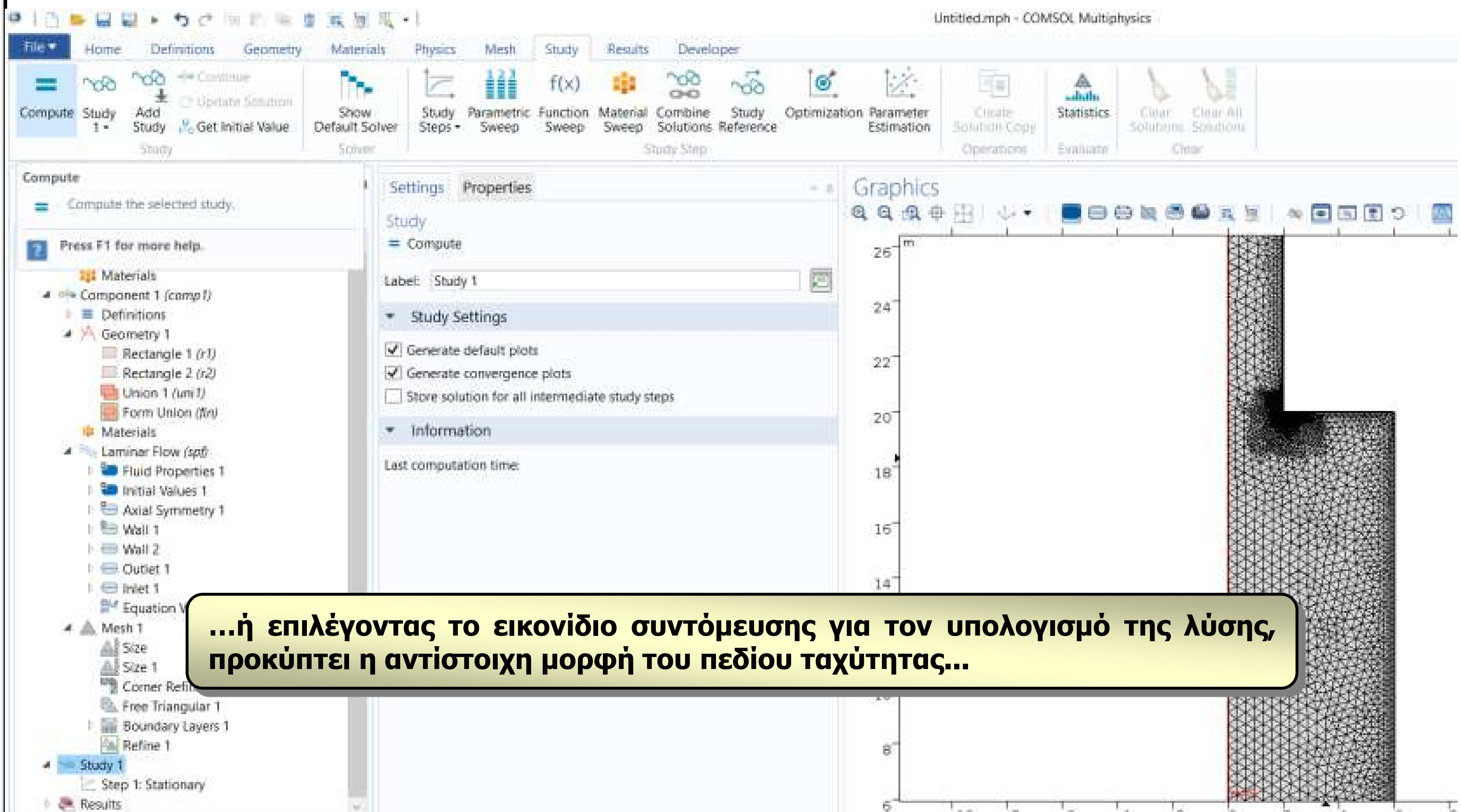
Επιλέγουμε Mesh > Sequence type > User-controlled mesh. Στη συνέχεια από το menu Mesh > Modify > Refine.
Μπορούμε να επιλέξουμε την περιοχή που θα πυκνωθεί περαιτέρω το πλέγμα επιλέγοντας Specify bounding box.

Βήμα 6 : Επίλυση



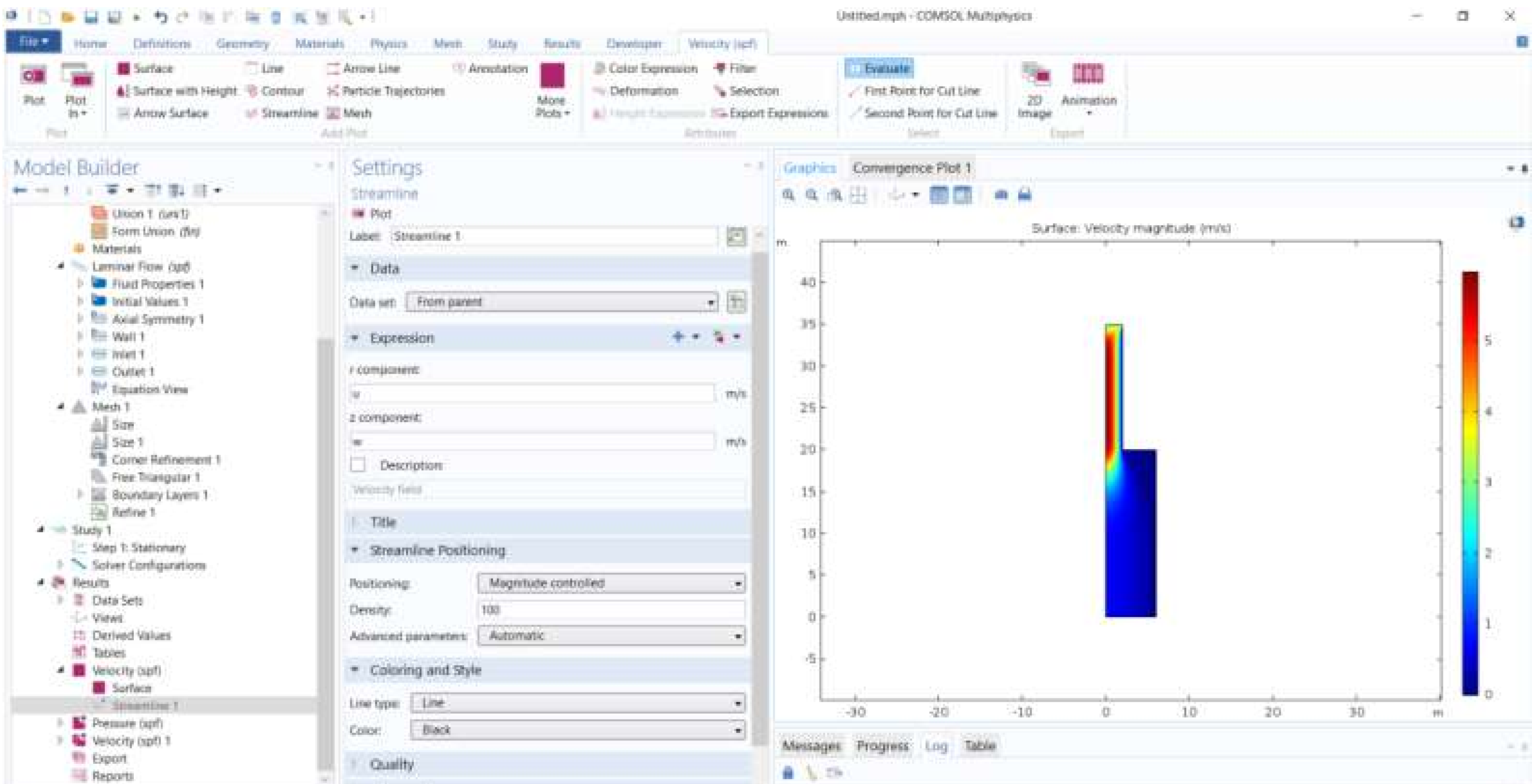
Επιλέγουμε Study 1> Compute

Βήμα 6 : Επιλογή επιλύτη

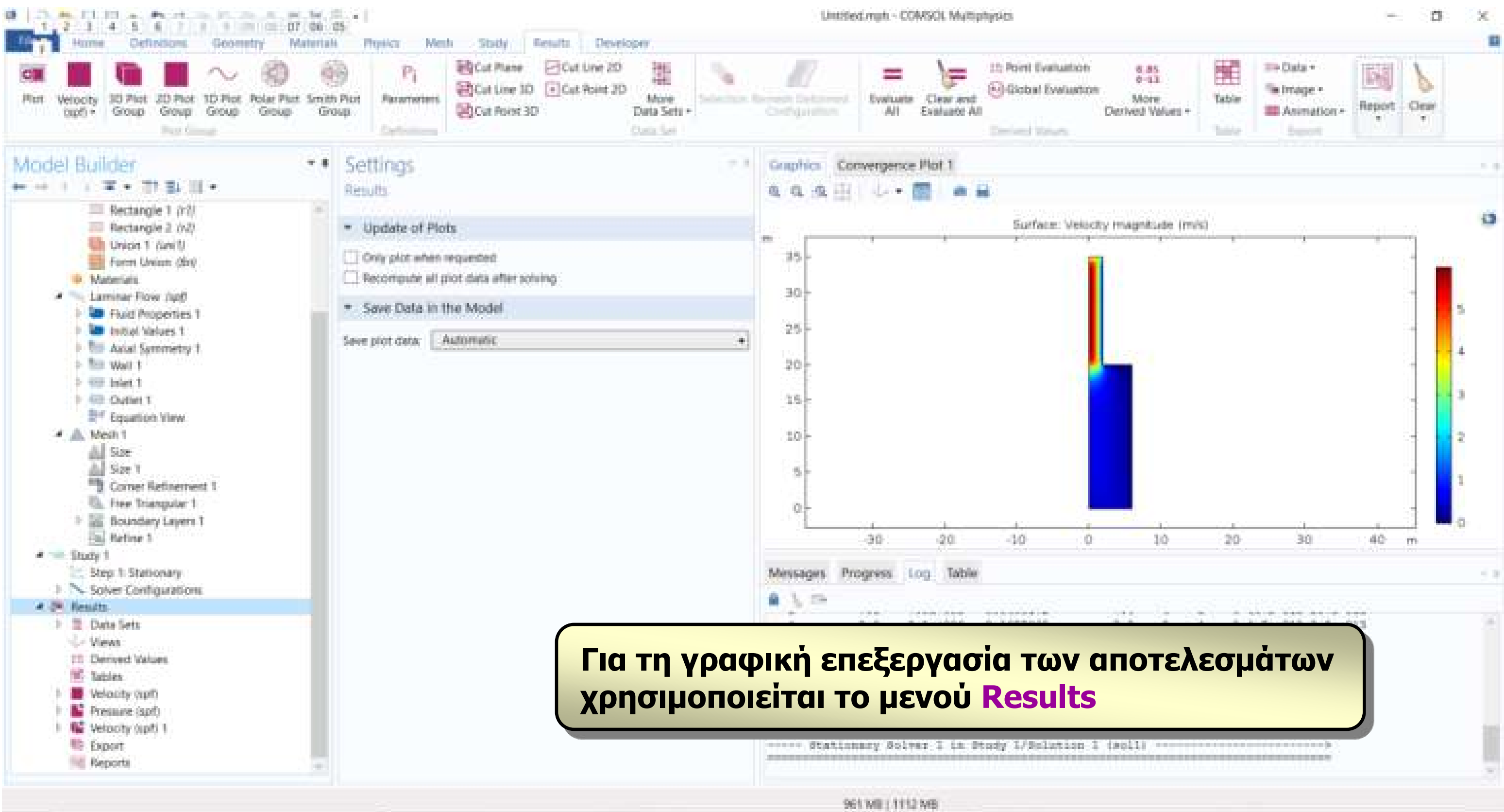


...ή επιλέγοντας το εικονίδιο συντόμευσης για τον υπολογισμό της λύσης, προκύπτει η αντίστοιχη μορφή του πεδίου ταχύτητας...

Βήμα 7 : Επίλυση προβλήματος

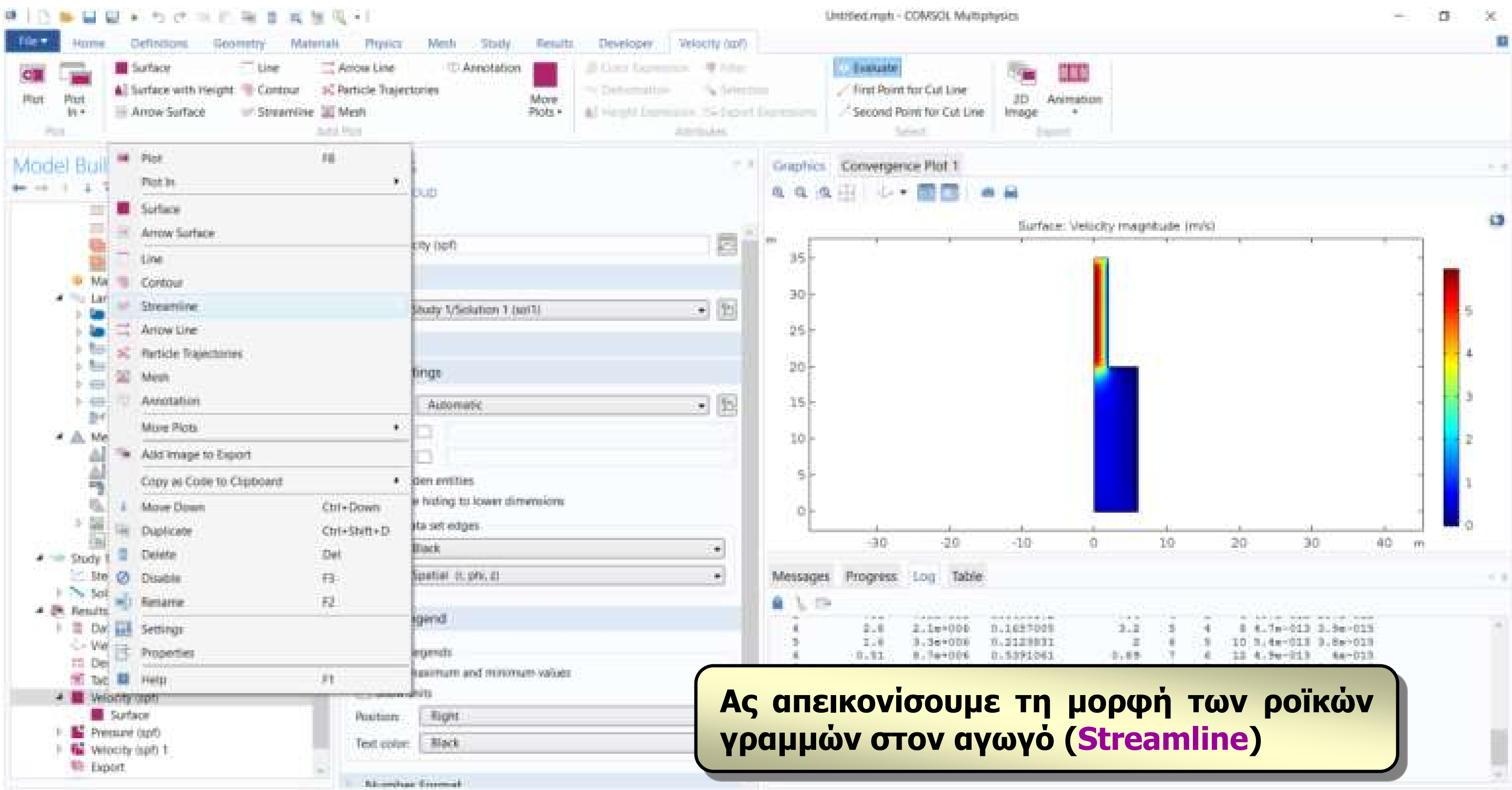


Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



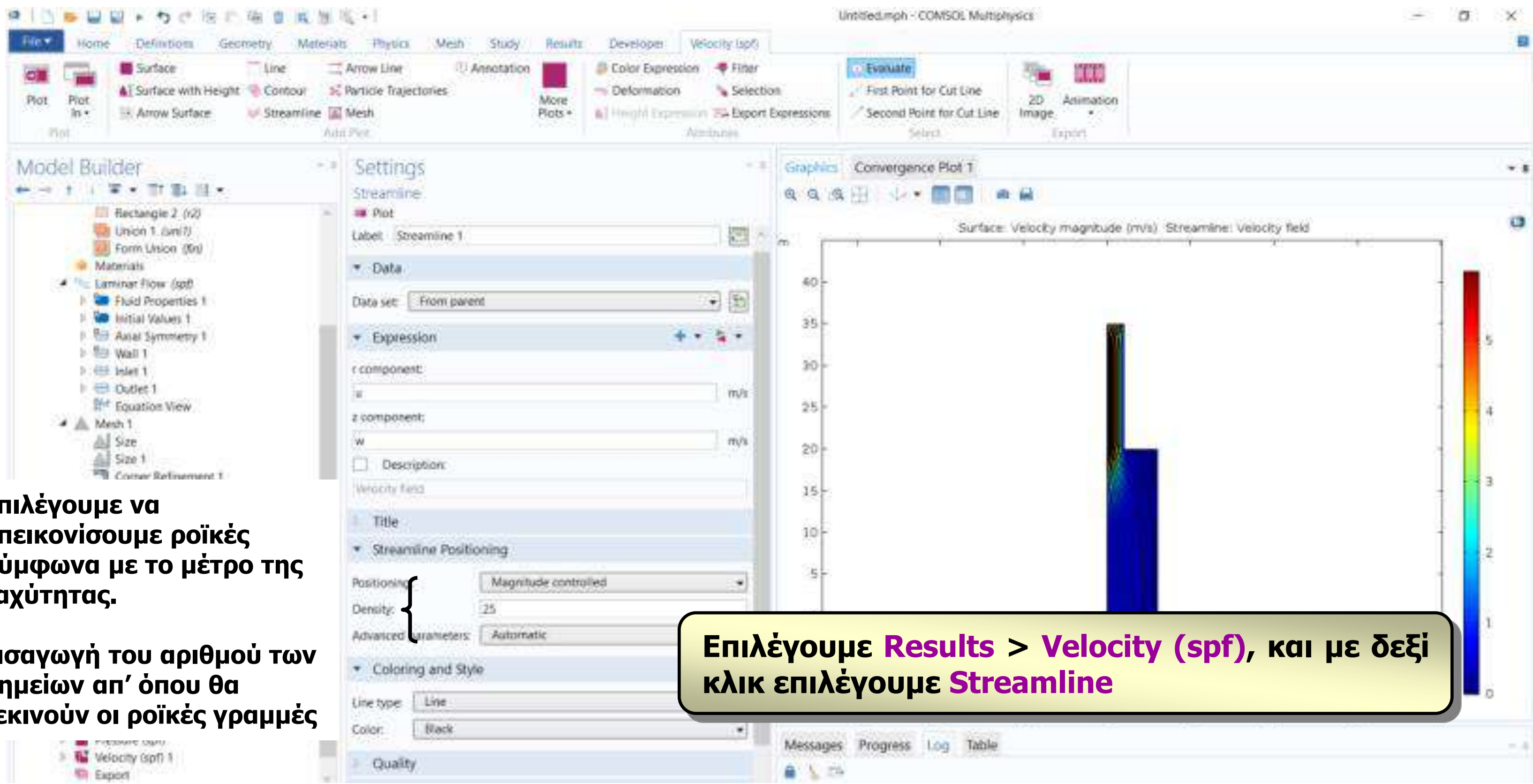
Για τη γραφική επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται το μενού Results

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



Ας απεικονίσουμε τη μορφή των ροϊκών γραμμών στον αγωγό (Streamline)

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων

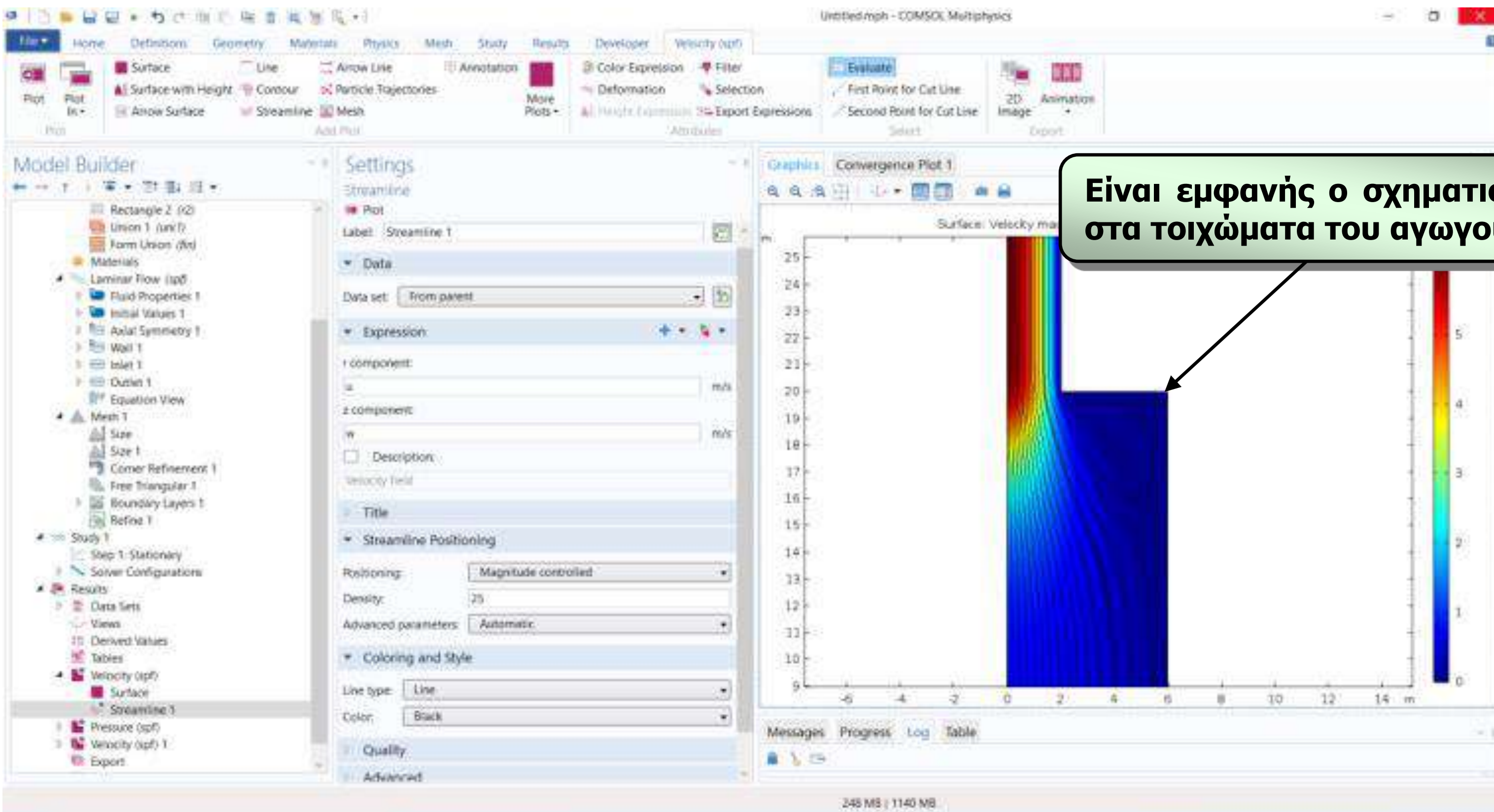


Επιλέγουμε να απεικονίσουμε ροϊκές σύμφωνα με το μέτρο της ταχύτητας.

Εισαγωγή του αριθμού των σημείων απ' όπου θα ξεκινούν οι ροϊκές γραμμές

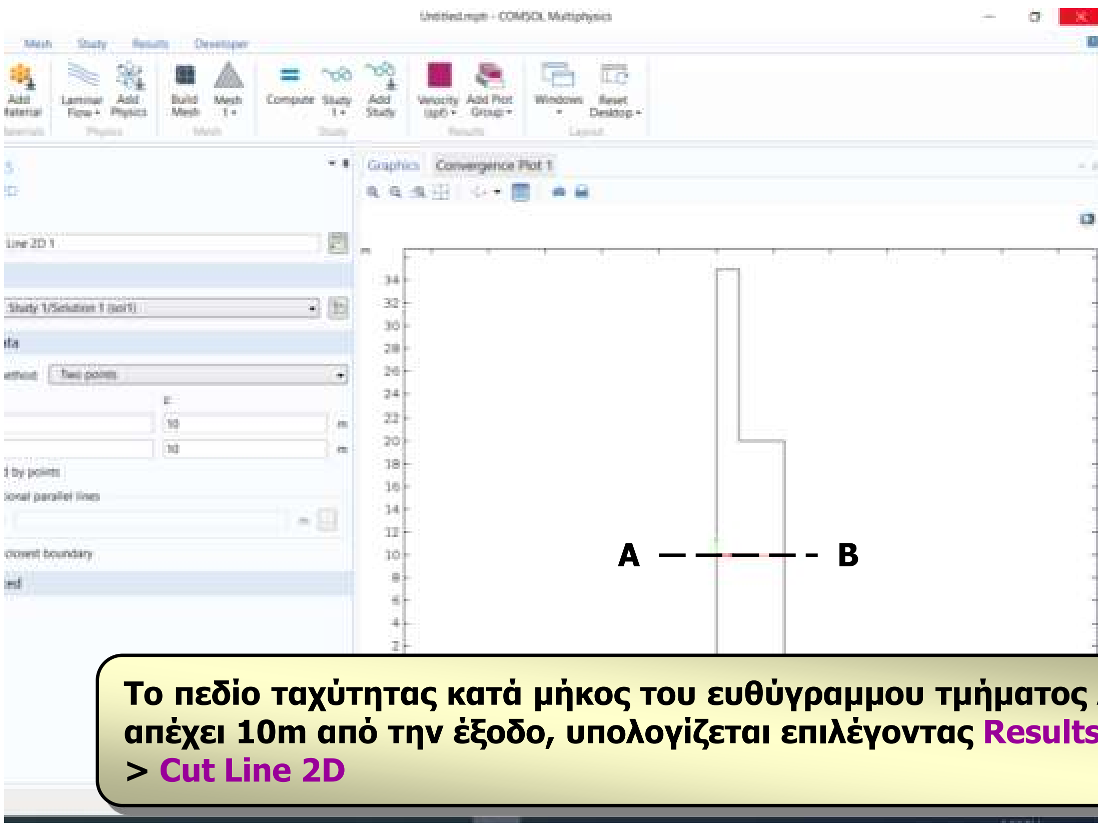
Επιλέγουμε Results > Velocity (spf), και με δεξί κλικ επιλέγουμε Streamline

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



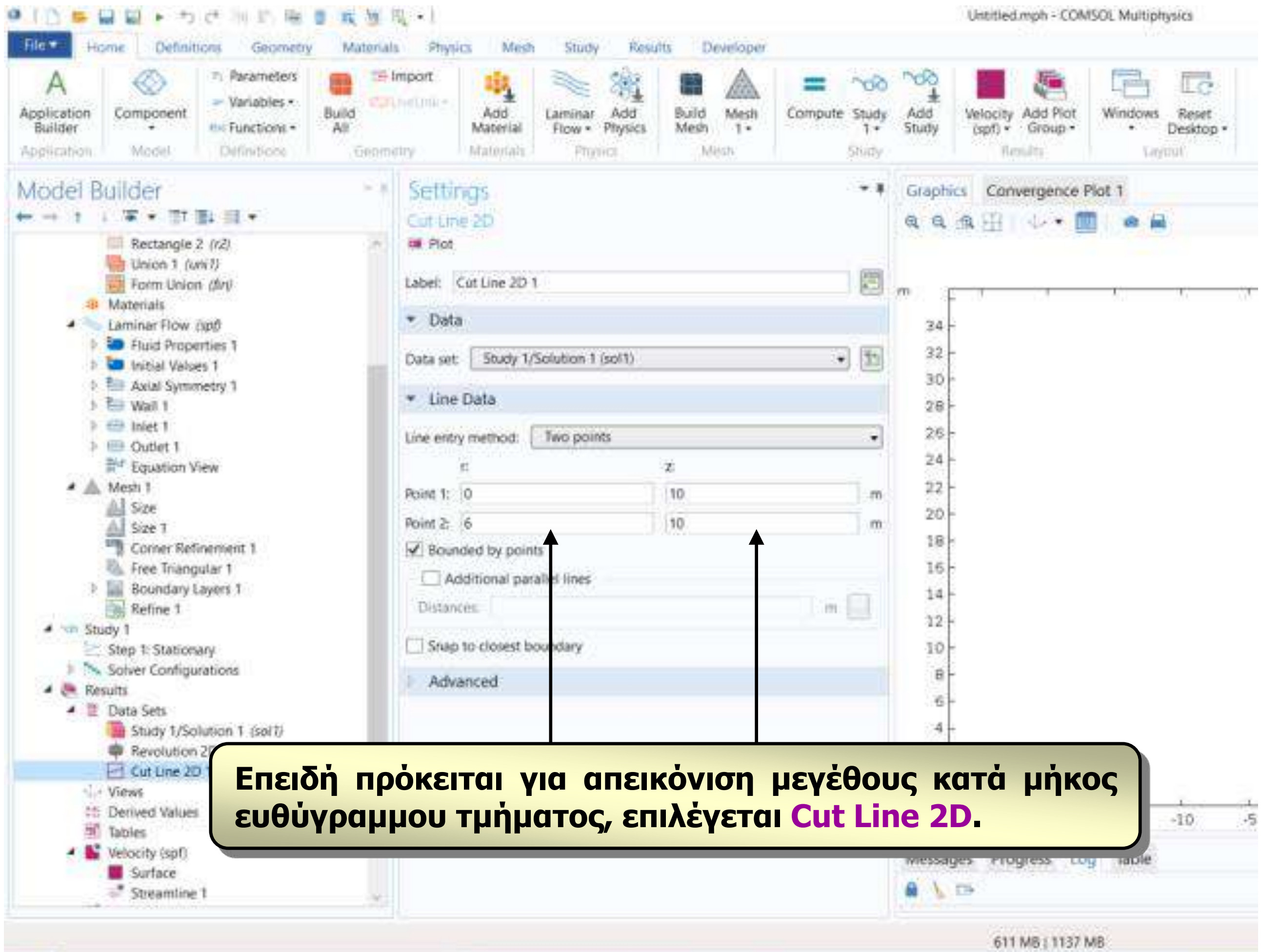
Είναι εμφανής ο σχηματισμός δινών στα τοιχώματα του αγωγού...

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



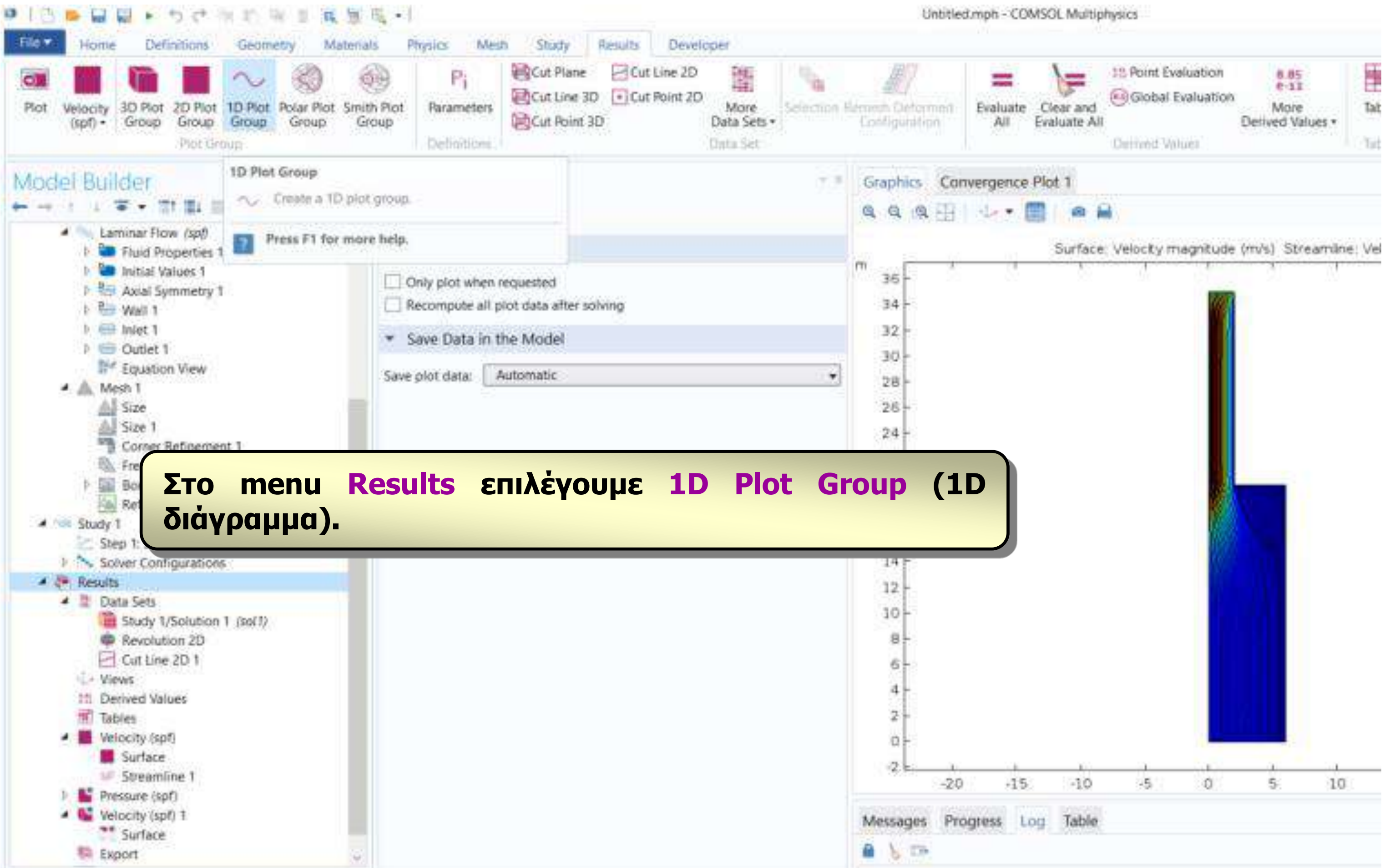
Το πεδίο ταχύτητας κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ΑΒ, το οποίο απέχει 10m από την έξοδο, υπολογίζεται επιλέγοντας Results > Data sets > Cut Line 2D

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



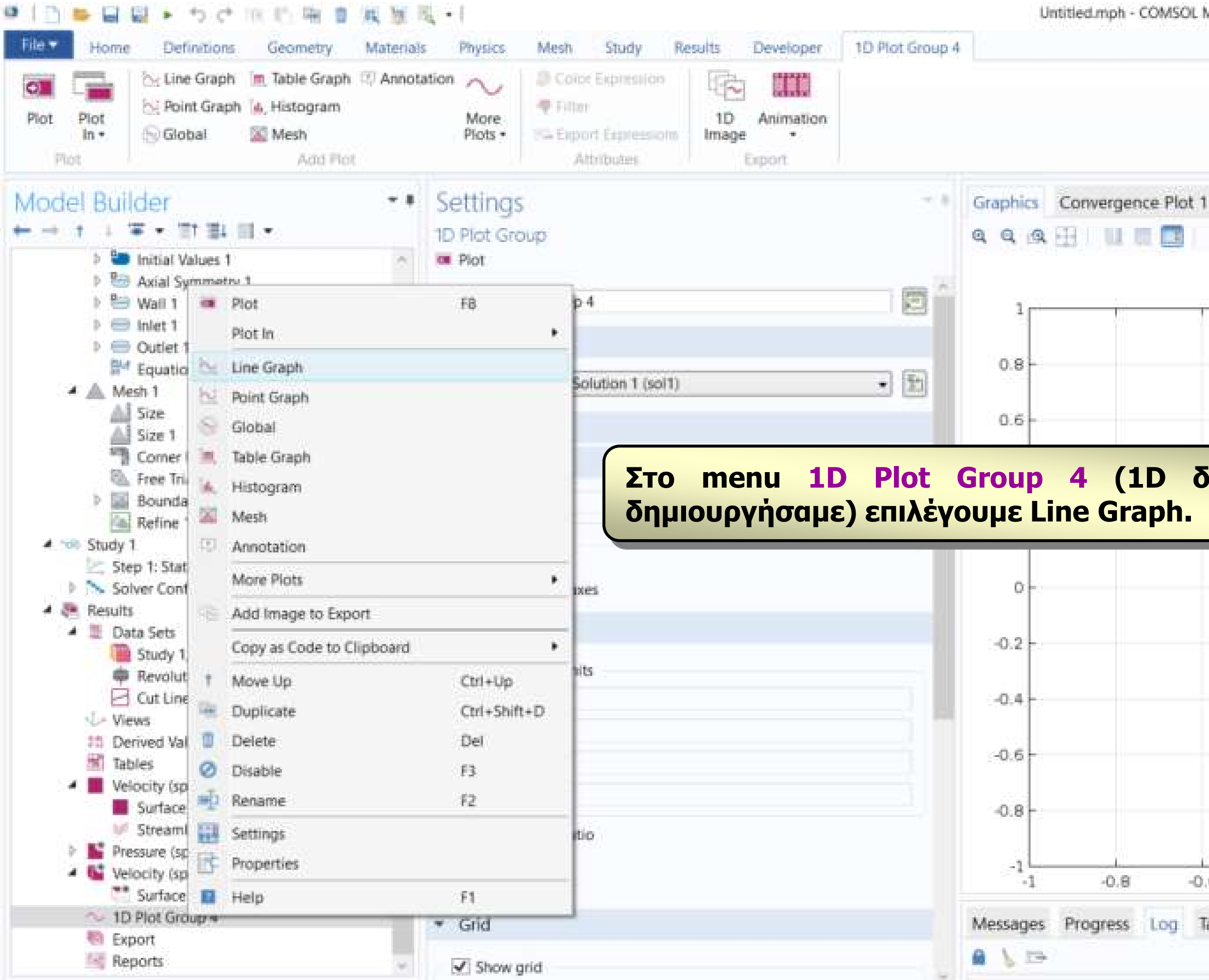
Επειδή πρόκειται για απεικόνιση μεγέθους κατά μήκος ευθύγραμμου τμήματος, επιλέγεται Cut Line 2D.

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



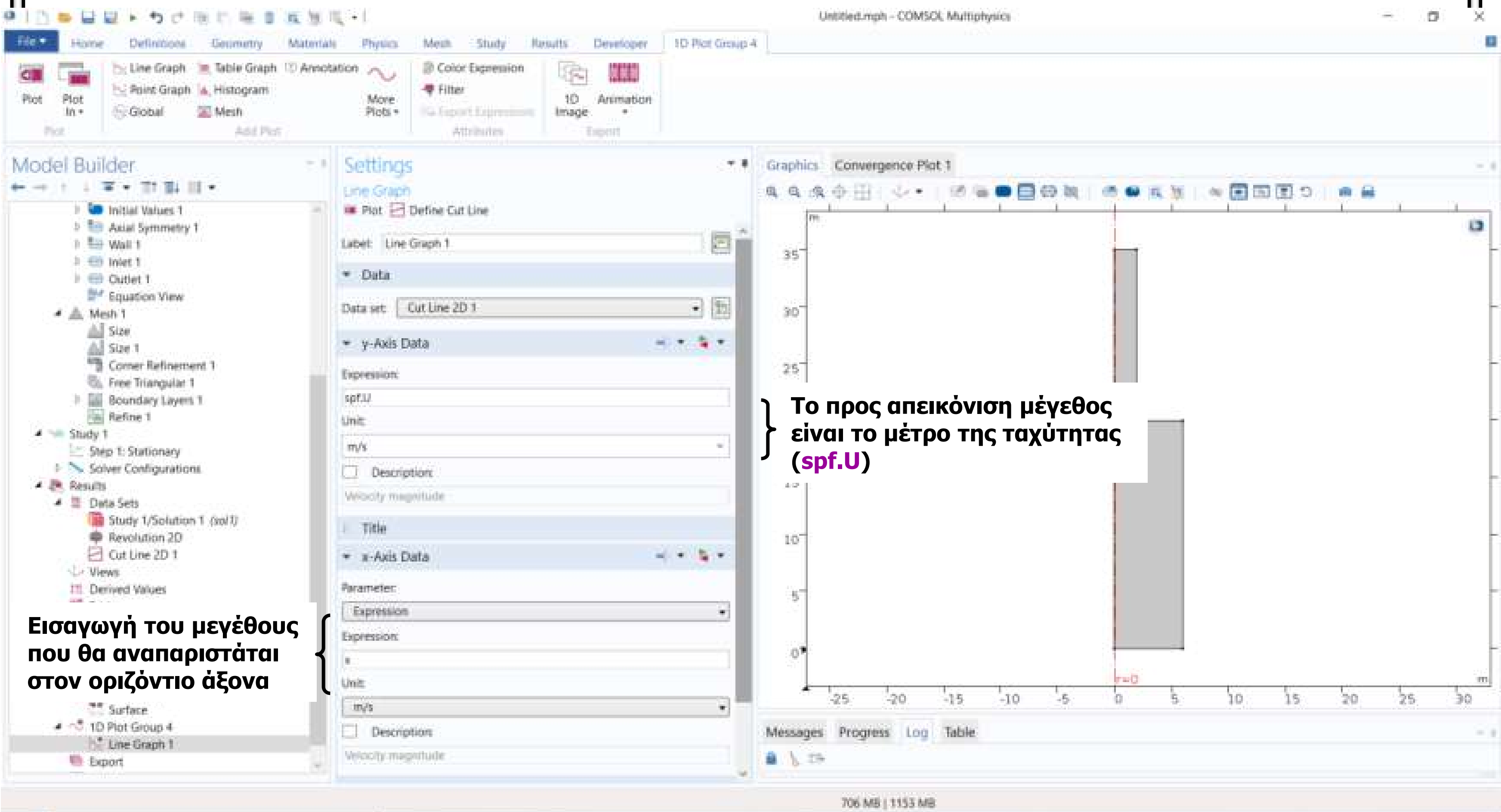
Στο menu Results επιλέγουμε 1D Plot Group (1D διάγραμμα).

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



Στο menu 1D Plot Group 4 (1D διάγραμμα που δημιουργήσαμε) επιλέγουμε Line Graph.

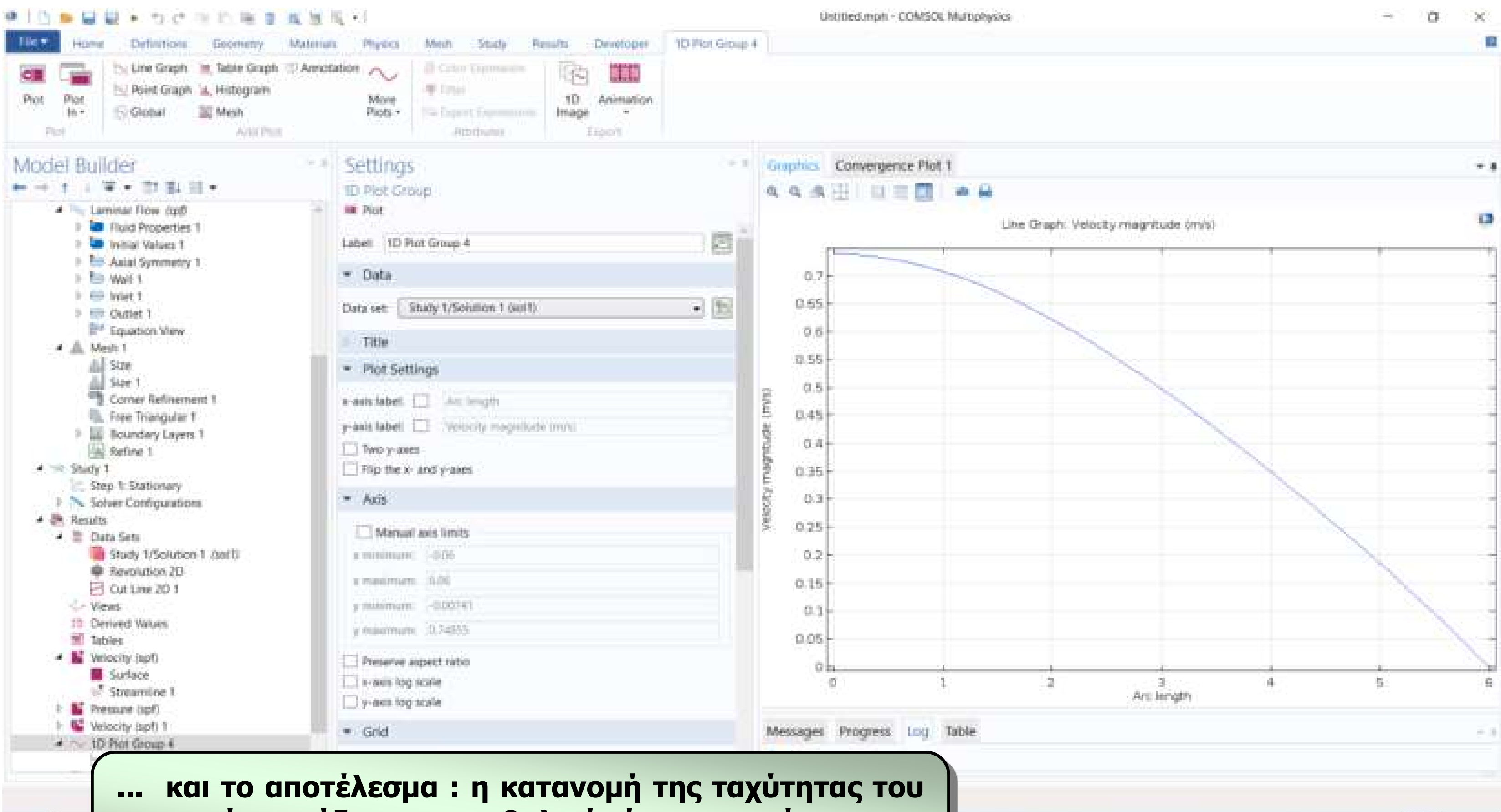
Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



Το προς απεικόνιση μέγεθος είναι το μέτρο της ταχύτητας (spf.U)

Εισαγωγή του μεγέθους που θα αναπαριστάται στον οριζόντιο άξονα

Βήμα 8 : Γραφική επεξεργασία αποτελεσμάτων



... και το αποτέλεσμα : η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού ομοιάζει με παραβολική, όπως αναμένεται για στρωτή ροή σε αγωγό κυκλικής διατομής.

Σχόλια

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επεξεργασία με το πακέτο COMSOL επιβεβαιώνεται :

1. με περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος διακριτοποίησης : παρατηρούμε πως αύξηση του αριθμού των στοιχείων (*elements*) δεν επιφέρει αλλαγή στη λύση, επομένως τα ληφθέντα αποτελέσματα θεωρούνται αποδεκτά.

2. συγκρίνοντας τη λύση που προκύπτει χρησιμοποιώντας το COMSOL, με αναλυτικές (προσεγγιστικές) σχέσεις (Α.Παπαϊωάννου : «Μηχανική των Ρευστών, Τόμος ΙΙ», Κεφ. 4). Εφαρμόζοντας την εξίσωση μηχανικής ενέργειας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του αγωγού (**1**), υπολογίζεται η τιμή της πίεσης εισόδου. Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την αντίστοιχη που προκύπτει από την επεξεργασία με το COMSOL, και παρατηρούμε πως Τα αποτελέσματα βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία (απόκλιση περίπου 7%).

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_l \quad : \quad (\mathbf{1})$$

h_l : το ύψος του συνόλου των απωλειών ενέργειας της ροής που συμβαίνουν στον αγωγό. Σημειώνεται πως οι απώλειες που υπολογίσθηκαν αφορούν στο πρώτο και δεύτερο τμήμα του αγωγού, καθώς επίσης και στη διαστολή της σωλήνωσης.

Προτάσεις

Συμπληρωματικά, θα μπορούσαν να εξετασθούν οι ακόλουθες περιπτώσεις :

1. επίδραση του λόγου των διατομών στην κατανομή της ταχύτητας
2. επίδραση του αριθμού Re στη μορφή της λύσης