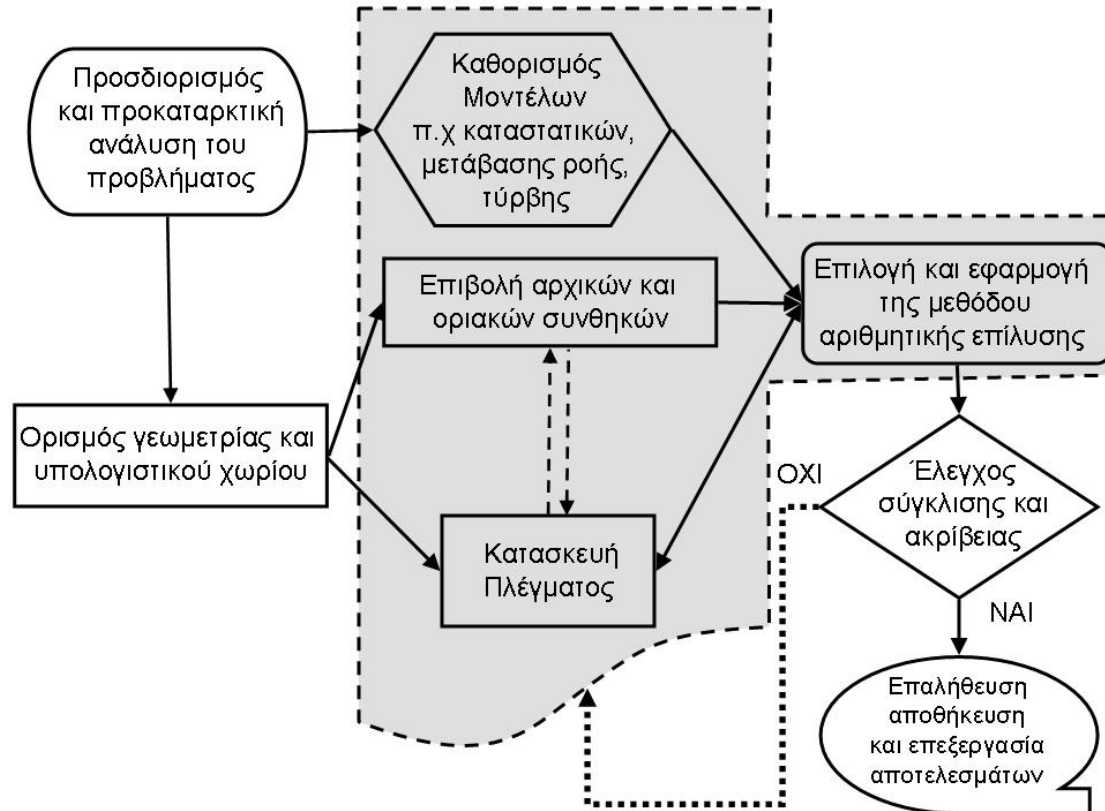


Διαδικασία υπολογιστικής προσομοίωσης

Η διαδικασία της υπολογιστικής προσομοίωσης για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων με εμπορικό λογισμικό περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 1. Τα στάδια αυτά επεξηγούνται αναλυτικά παρακάτω



Σχήμα 1 Στάδια υπολογιστικής προσομοίωσης

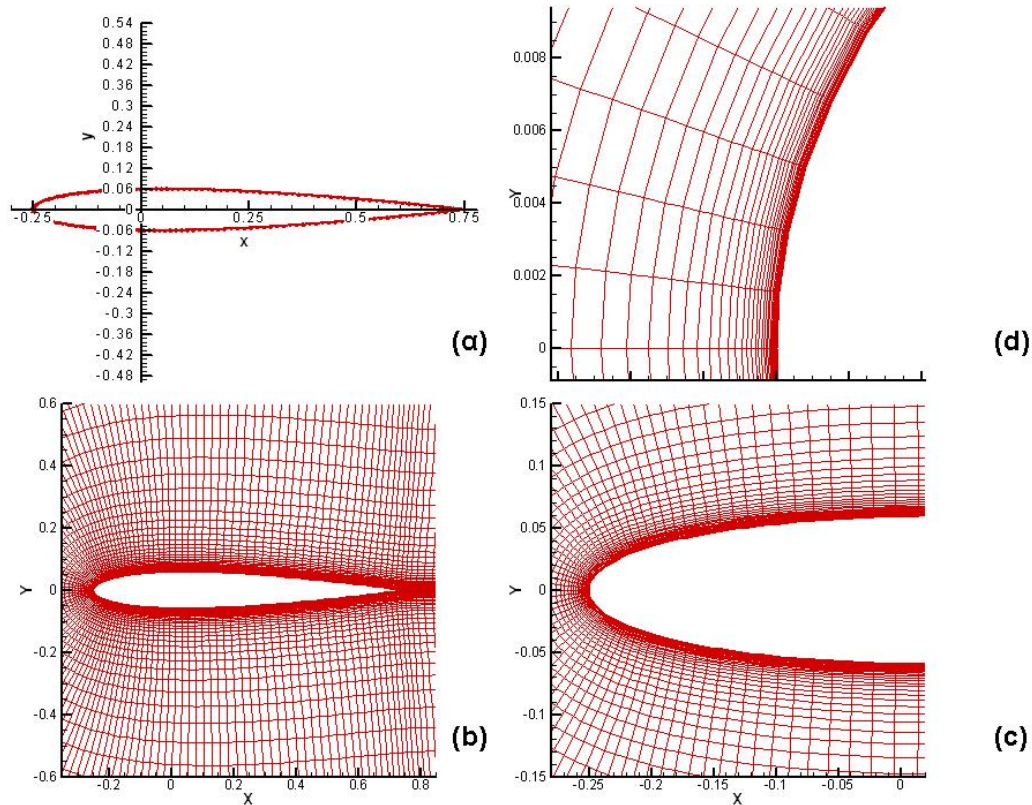
Τα στάδια της υπολογιστικής προσομοίωσης επεξηγούνται αναλυτικά παρακάτω

1. Ορισμός γεωμετρίας και υπολογιστικού χωρίου

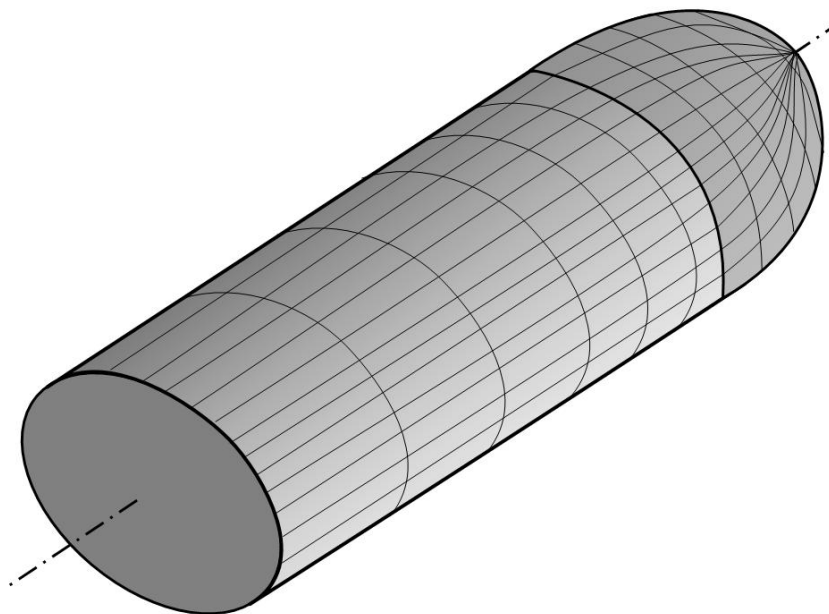
Ο ορισμός της γεωμετρίας είναι ένα σημαντικό αρχικό στάδιο προετοιμασίας της υπολογιστικής διαδικασίας. Υπάρχουν απλές δυσδιάστατες γεωμετρίες που υπολογίζονται από αναλυτικές εκφράσεις όπως π.χ. κύλινδρος, αεροτομή NACA (δες Σχ. 2), η περίμετρος της οποίας ορίζεται από την αναλυτική έκφραση $y(x) = -5t[0.29\sqrt{x} - 0.126x - 0.35x^2 + 0.28x^3 - 0.101x^4]$ και άλλες απλές γεωμετρίες που ορίζονται από ευθύγραμμα τμήματα. Υπάρχουν ακόμη και τρισδιάστατα σώματα όπως π.χ. κύλινδρος με ημισφαιρικό άκρο (δες Σχ. 3) όπου η γεωμετρία μπορεί να κατασκευαστεί αναλυτικά. Οι απλές αυτές γεωμετρίες αντιπροσωπεύουν συχνά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε αεροσήραγγες και δεν απαιτούν ειδικά εργαλεία για την κατασκευή τους.

Στις περισσότερες βιομηχανίες εφαρμογές όμως οι γεωμετρίες είναι εξαιρετικά πολύπλοκες. Παραδείγματα γεωμετρικών με περιπλοκότητα, όπου η περιγραφή είναι αδύνατη με την χρήση αναλυτικών εκφράσεων παρουσιάζονται στα Σχ. 4 – 6. Στο Σχ. 4 δίδεται η γεωμετρία σε μορφή CATIA που αντιστοιχεί στο μοντέλο αεροσήραγγας ελικοπτερου του Σχ. 5. Στο σχήμα 5 φαίνονται οι

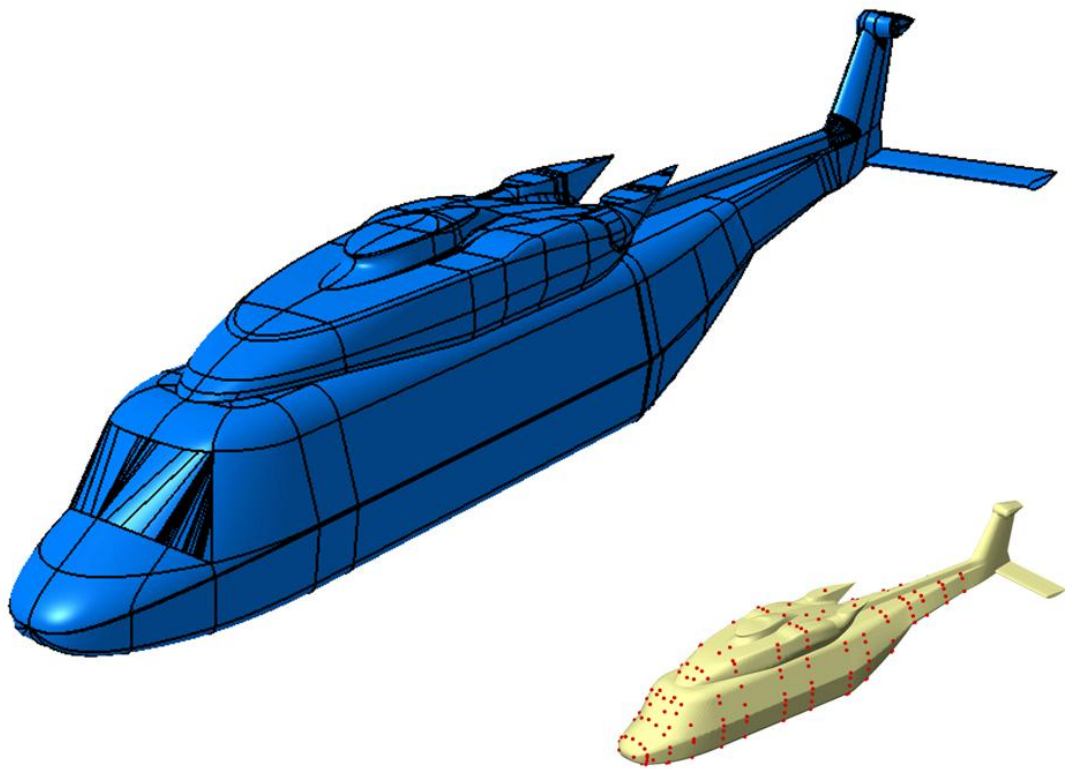
φωτογραφίες του μοντέλου της αεροσήραγγας (άνω) και οι θέσεις όπου τοποθετούνται οπές μέτρησης πίεσης και άλλοι αισθητήρες. Στο Σχ. 6 φαίνεται η γεωμετρία αυτοκινήτου με τη γραφική αναπαράσταση του πεδίου ροής που υπολογίστηκε.



Σχήμα 2 Γεωμετρία και πλέγμα γύρω από αεροτομή NACA-0012 (α) ορισμός περιμέτρου με (x, y) συντεταγμένες (b)–(d) υπολογιστικό πλέγμα.



Σχήμα 3 Ορισμός γεωμετρίας και επιφανειακού πλέγματος κυλίνδρου με σφαιρικό άκρο.

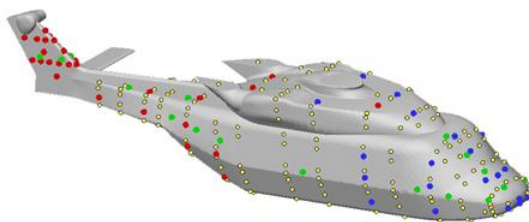


Σχήμα 4 Αναπαράσταση γεωμετρίας ελικοπτέρου σε μορφή CATIA.



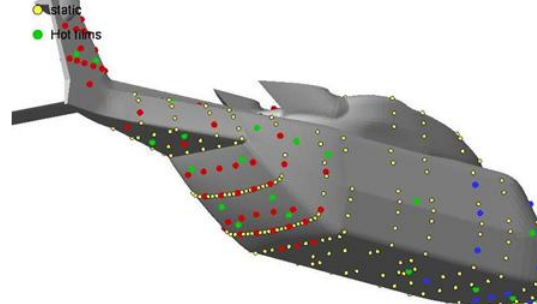
location of pressure sensors and hot films
(14 June 2006)

- Active Sensor
- Kulite
- static
- Hot films

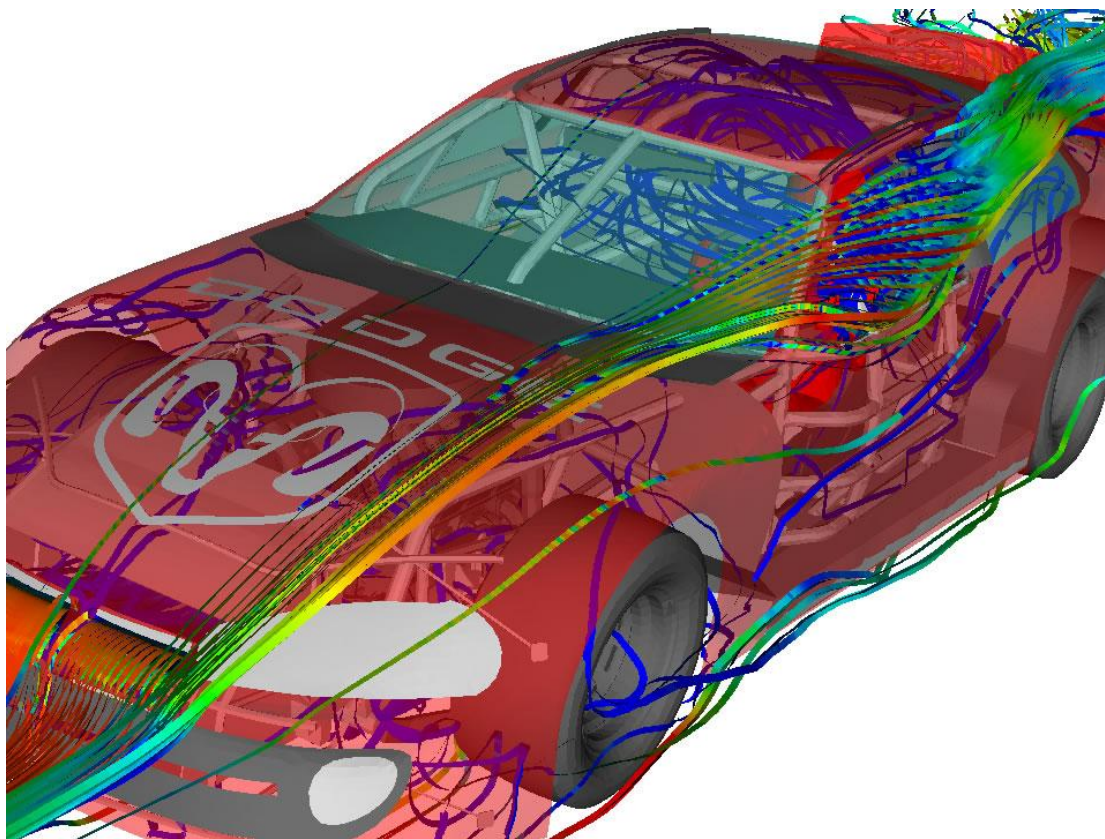


location of pressure sensors and hot films
(14 June 2006)

- Active Sensor
- Kulite
- static
- Hot films

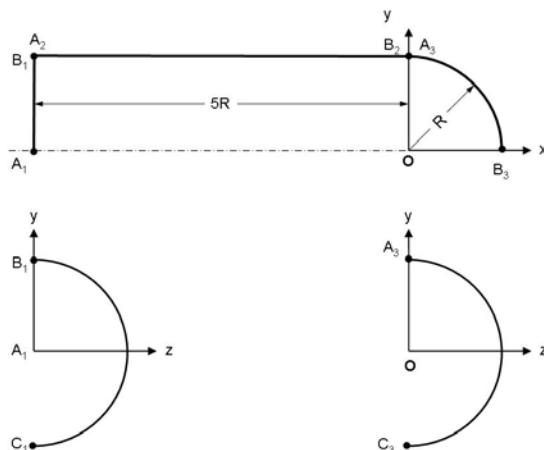


Σχήμα 5 Μοντέλο ελικοπτέρου του για μετρήσεις σε αεροσήραγκα.



Σχήμα 6 Γεωμετρία και πεδίο ροής σε επιβατικό αυτοκίνητο.

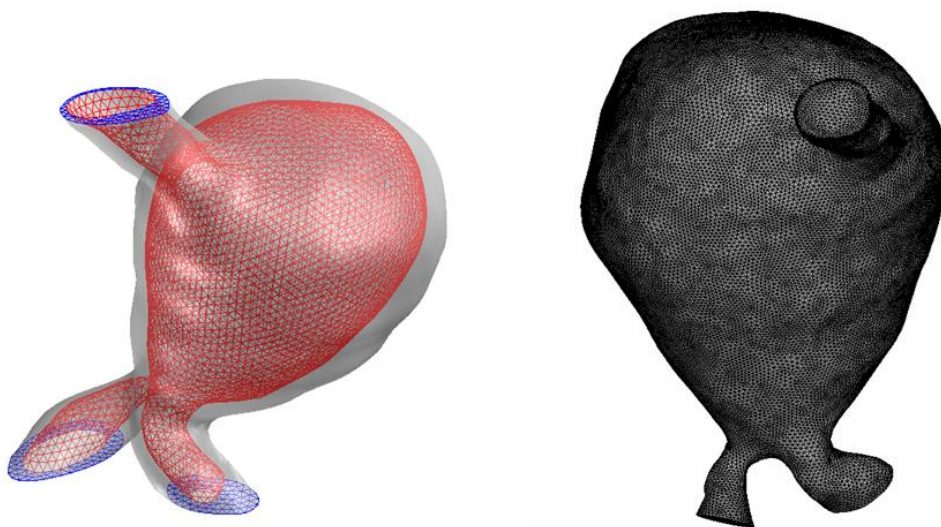
Γεωμετρίες παρόμοιες των Σχ. 4 και 6 που είναι σε μορφή CATIA ή οποιασδήποτε άλλης μορφής δεν είναι συνήθως κατάλληλες για την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος. Τα δεδομένα υπό μορφή CATIA ή σε αναλυτική μορφή εισάγονται αρχικά στο λογισμικό κατασκευής πλέγματος (grid generator) για περαιτέρω επεξεργασία. Οι μεν γεωμετρίες που περιγράφονται με αναλυτικές εκφράσεις όπως η αεροτομή του Σχ. 1 αρχικά παραμετροποιούνται έτσι ώστε μετά από οποιαδήποτε ανακατανομή των κόμβων η γεωμετρία να παραμένει αναλλοίωτη. Η κατασκευή επίπεδων σχημάτων (κύκλων, ελλείψεων) ή τρισδιάστατων γεωμετριών όπως ο κύλινδρος με ημισφαιρικό άκρο του Σχ. 2 είναι δυνατή με τις γεωμετρικές καμπύλες που περιέχουν τα λογισμικά κατασκευής πλέγματος. Η κατασκευή του κυλίνδρου με ημισφαιρικό άκρο απεικονίζεται στο Σχ.7.



Σχήμα 7 Κατασκευή επίπεδης και τρισδιάστατης γεωμετρίας.

Αρχικά κατασκευάζεται η γενέτειρα καμπύλη (A_1, B_1) (A_2, B_2) (A_3, B_3) αποτελούμενη από δυο ευθύγραμμα τμήματα και ένα ημικύκλιο. Στην συνέχεια περιστροφή της γενέτειρας καμπύλης π.χ. κατά 180° δίδει την μισή επιφάνεια του κυλίνδρου με ημισφαιρικό άκρο. Όταν η παραπάνω κατασκευή πραγματοποιείται στο λογισμικό κατασκευής πλέγματος τότε όλες οι καμπύλες είναι ορισμένες στην γεωμετρία του σχήματος και οποιαδήποτε κατανομή στοιχείων πάνω στις καμπύλες είναι στην γεωμετρία.

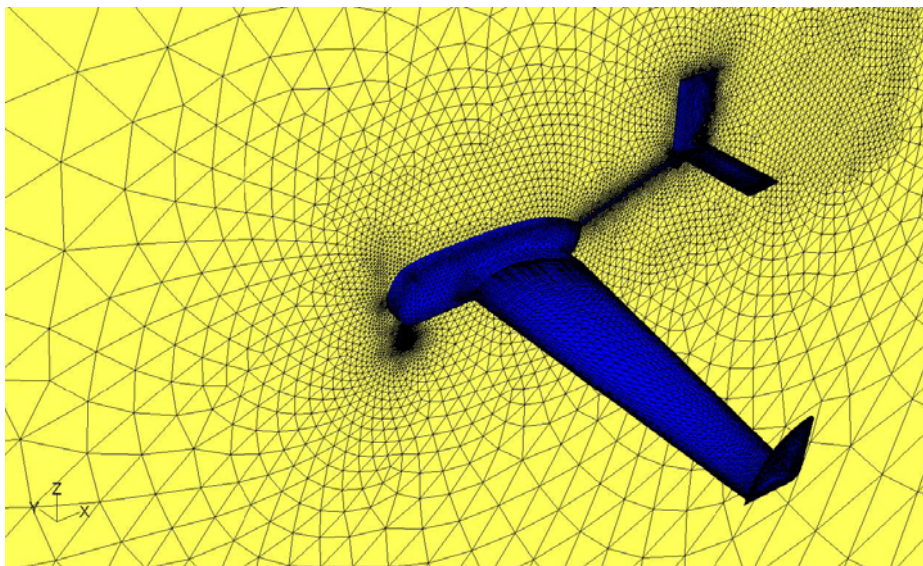
Η κατασκευή της γεωμετρίας που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του επιφανειακού πλέγματος για το μοντέλο ελικοπτερου του Σχ. 3 είναι σημαντικά πιο περίπλοκη. Αρχικά η γεωμετρία που περιγράφεται από τα δεδομένα CATIA ελέγχεται για τυχόν οπές ή ασυμβατότητα στα σημεία ενώσεων. Οι ατέλειες της γεωμετρίας CATIA επιδιορθώνονται με εργαλεία τα οποία διαθέτει το λογισμικό κατασκευής πλέγματος. Καθορίζεται ο προσανατολισμός των επιφανειών και ορίζεται κατ'αυτόν το τρόπο το χωρίο μέσα στο οποίο θα κατασκευαστεί πλέγμα. Κατόπιν στις ακμές των πολυγωνικών επιφανειών κατανέμονται κόμβοι και κατασκευάζεται το επιφανειακό πλέγμα. Η πιστοποίηση και ο έλεγχος της ποιότητας του επιφανειακού πλέγματος είναι επίπονη αλλά ουσιαστική διαδικασία διότι αποτελεί την βάση της κατασκευής του πλέγματος στον χώρο το οποίο υπόκειται σε ακόμη μεγαλύτερους περιορισμούς.



Σχήμα 8 Γεωμετρία και υπολογιστικό πλέγμα σε ανεύρυσμα.

Ο καθαρισμός κατάλληλης γεωμετρίας είναι το πρώτο σημαντικό στάδιο για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Εξαιρουμένης της περίπτωσης εσωτερικών ροών, όπως η ροή σε αγωγούς όπως το παράδειγμα του Σχ. 8 όπου φαίνεται το επιφανειακό πλέγμα για τον υπολογισμό της ροής σε ένα ανεύρυσμα αρτηρίας, οι εξωτερικές ροές όπως η ροή γύρω από το ελικόπτερο ή μια πτέρυγα απαιτούν τον προσδιορισμό του χωρίου ροής. Στην περίπτωση που η γεωμετρία

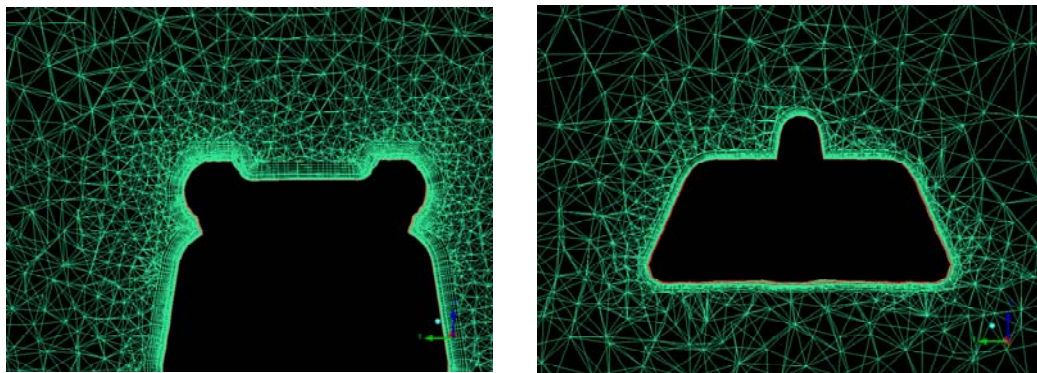
βρίσκεται στην αεροσύραγγα τα τοιχώματά της καθορίζουν το υπολογιστικό χωρίο. Στην περίπτωση όμως που επιθυμούμε να προσομοιώσουμε την πτήση αεροσκάφους όπως το παράδειγμα του Σχ. 9 ο προσδιορισμός των ορίων του υπολογιστικού χωρίου πραγματοποιείται έτσι ώστε στα όρια του υπολογιστικού χωρίου να είναι εφικτός ο προσδιορισμός οριακών συνθηκών που να επιτρέπουν τον ακριβή υπολογισμό της ροής κοντά στο αεροσκάφος.



Σχήμα 9 Πλέγμα γύρω από αεροσκάφος για τον υπολογισμό μη συνεκτικής ροής .

Κατασκευή πλέγματος

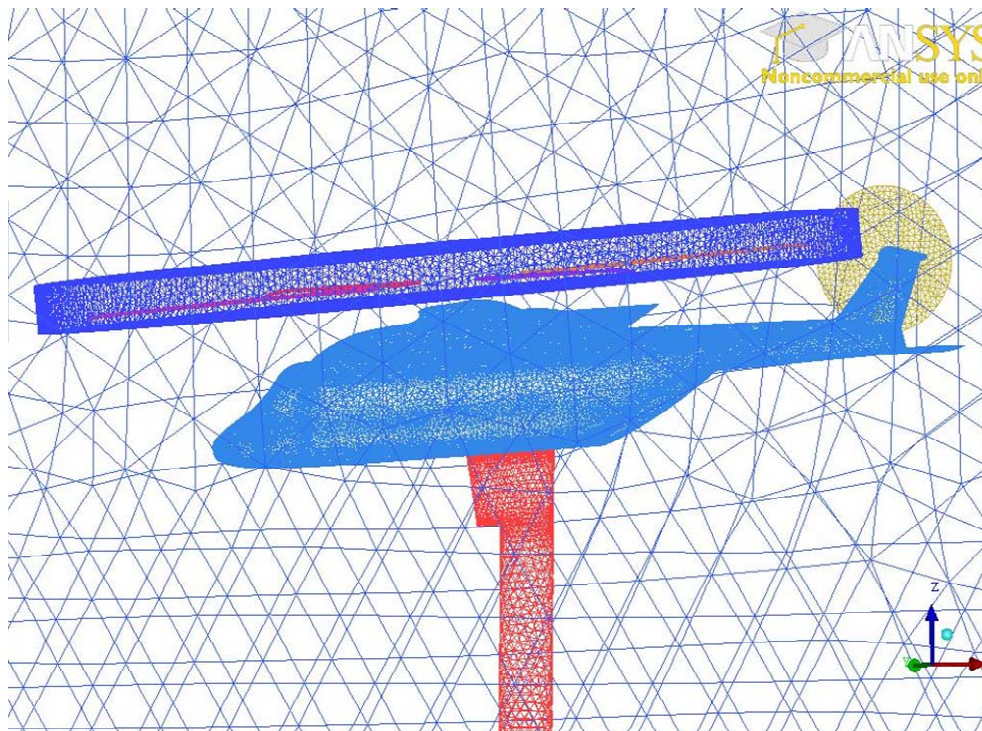
Η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος πραγματοποιείται είτε με λογισμικό το οποίο έχουμε προγραμματίσει ή συνήθως με την χρήση εμπορικών λογισμικών τα οποία δίνουν την δυνατότητα κατασκευής πλεγμάτων για βιομηχανικές εφαρμογές με ιδιαίτερη περιπλοκότητα. Τα υπολογιστικά πλέγματα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις της ομαλότητας ομοιογένειας και να παρέχουν την απαραίτητη ακρίβεια για τον υπολογισμό της ροής. Είναι προφανές ότι πριν την κατασκευή του πλέγματος απαιτείται προεργασία και εντοπισμός των περιοχών όπου απαιτείται πυκνωση του υπολογιστικού πλέγματος. Πολλές φορές δεν είναι αναγκαίο να γίνει μια προκαταρκτική προσομοίωση σε ένα σχετικά αραιό υπολογιστικό πλέγμα ώστε να εντοπισθούν καλύτερα οι περιοχές όπου απαιτείται επιπλέον ακρίβεια στον υπολογισμό. Τέτοιες περιοχές είναι οι γωνίες αποκολλημένης ροής, τα οστικά κύματα, οι στροβιλισμοί κ. λ. π. Παραδείγματα πλεγμάτων δίνονται στα Σχ. 10-20.



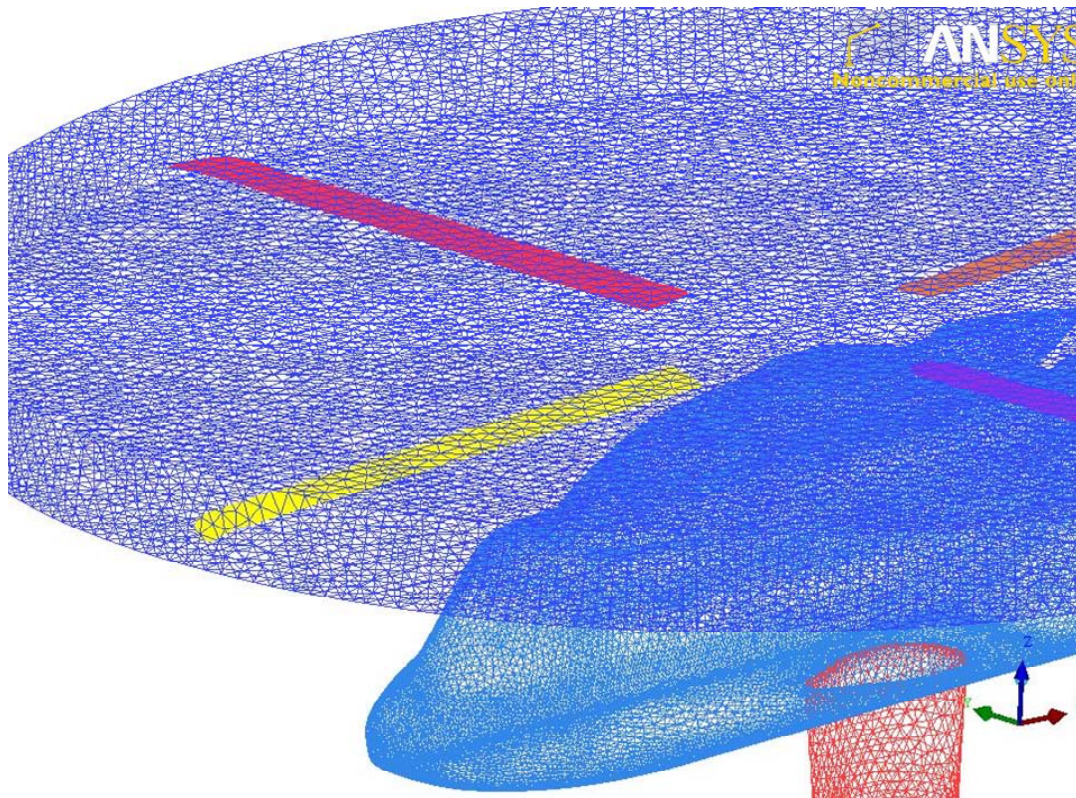
Σχήμα 10 Τομή στο πλέγμα γύρω από ελικόπτερο.



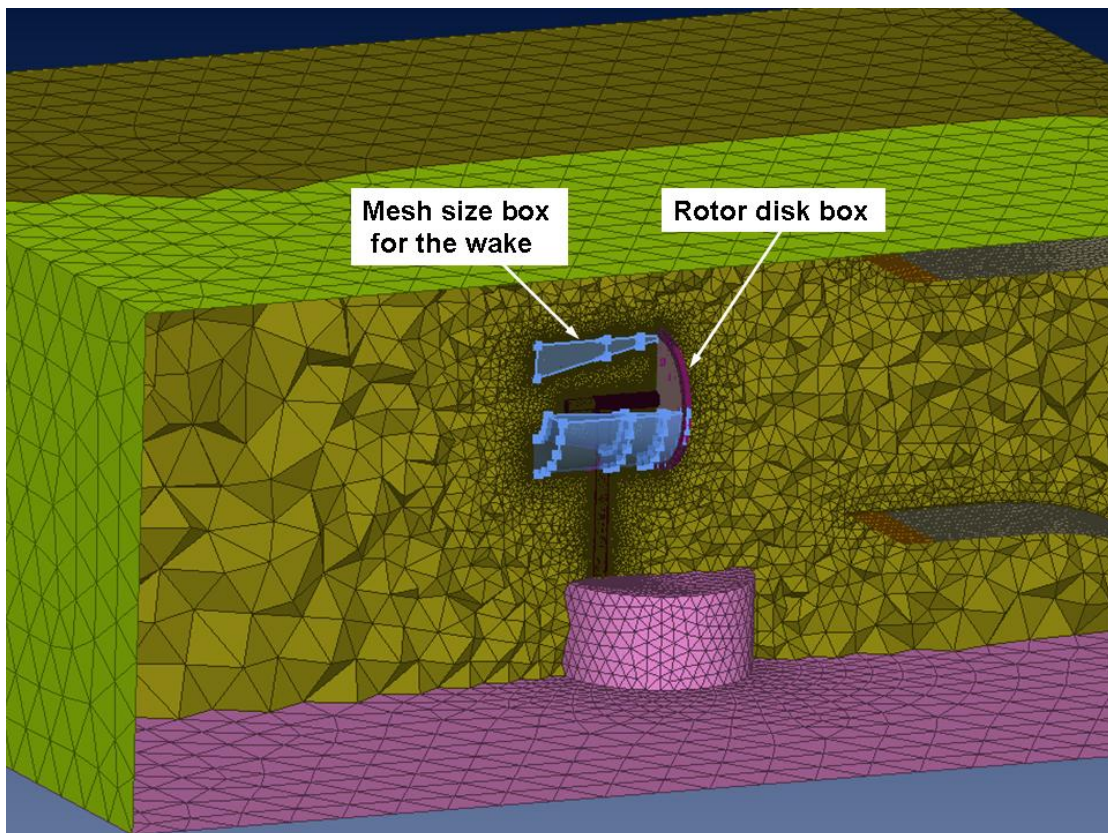
Σχήμα 11 Κατά μήκος τομή στο πλέγμα γύρω από ελικόπτερο για τον υπολογισμό συνεκτικής τυρβώδους ροής.



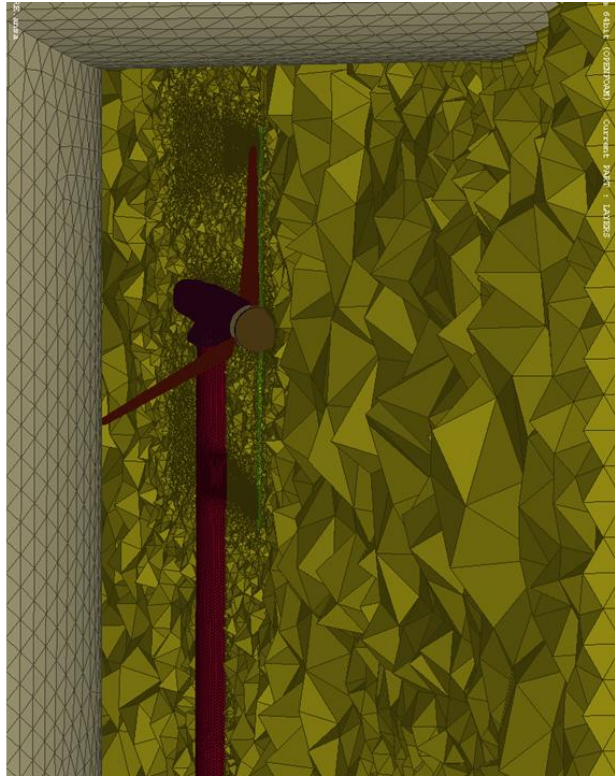
Σχήμα 12 Πλέγμα γύρω από ελικόπτερο για τον υπολογισμό ροής με περιστρεφόμενο στροφέιο.



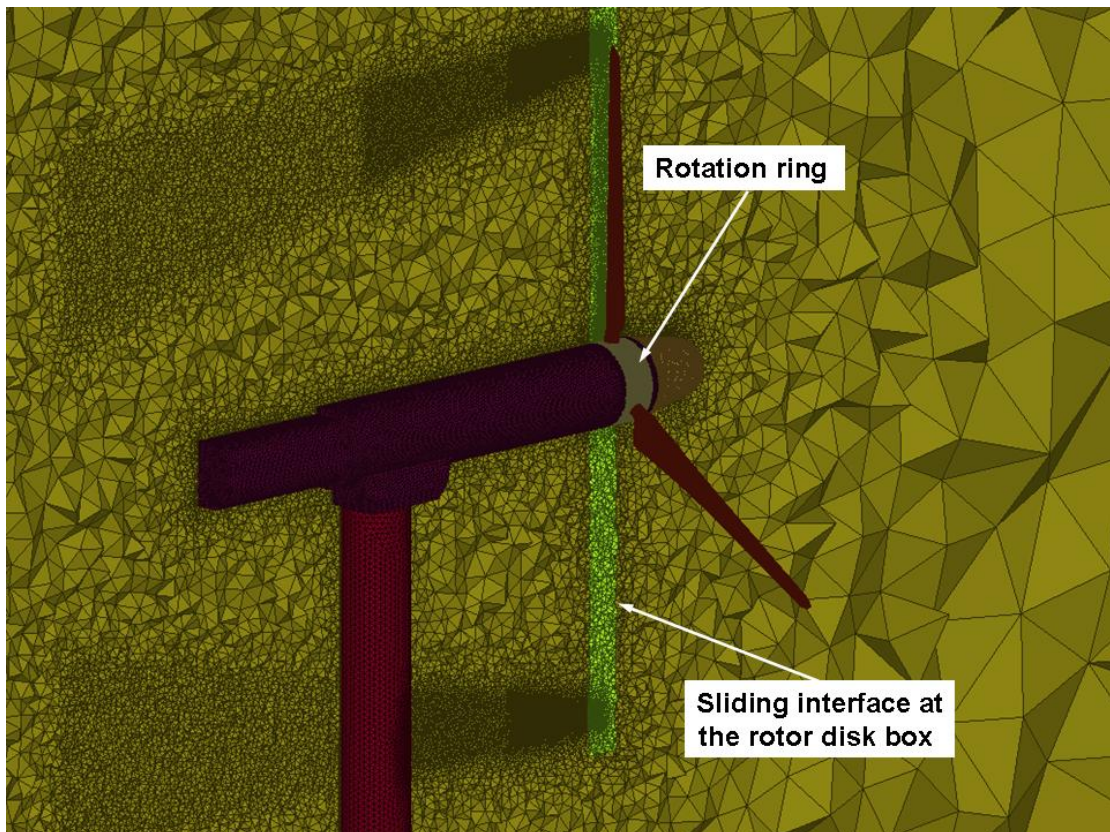
Σχήμα 13 Πλέγμα γύρω από ελικόπτερο για τον υπολογισμό ροής με περιστρεφόμενο τροφέιο..



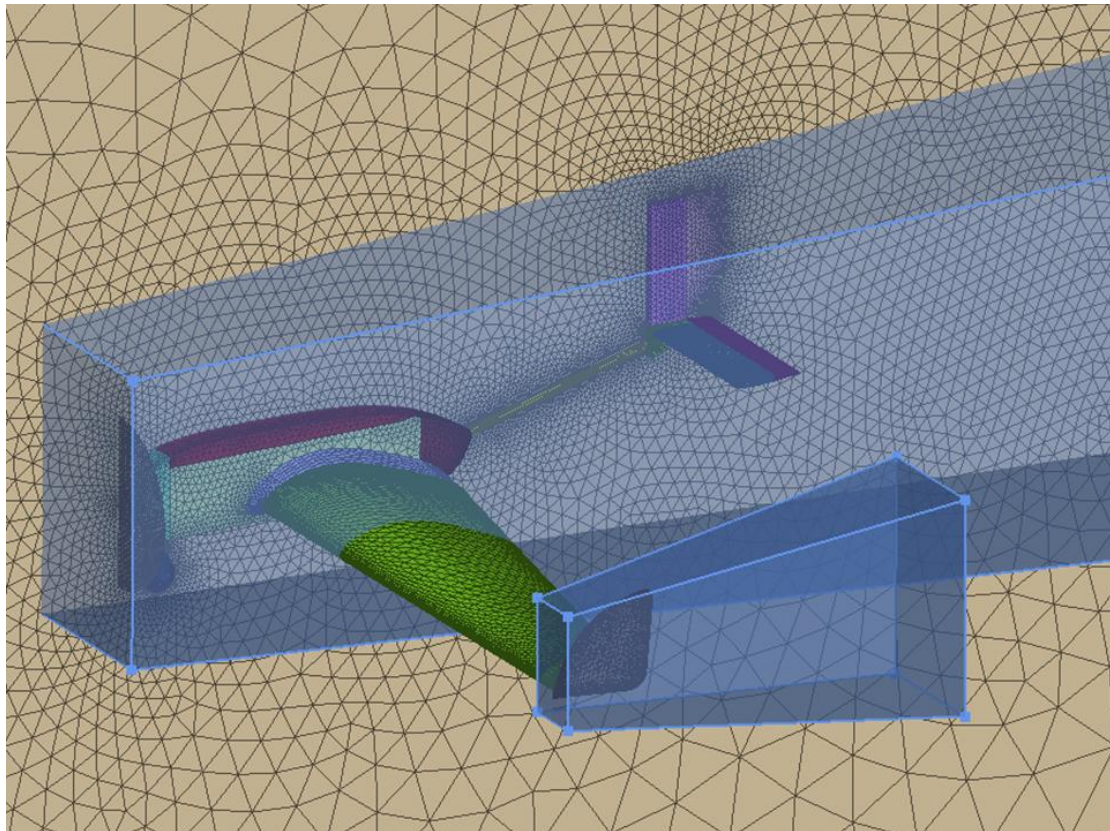
Σχήμα 14 Πλέγμα για τον υπολογισμό ροής ανεμογεννήτριας που μετρήθηκε σε ανοικτή αεροσύραγα με ακροφύσιο εκροής



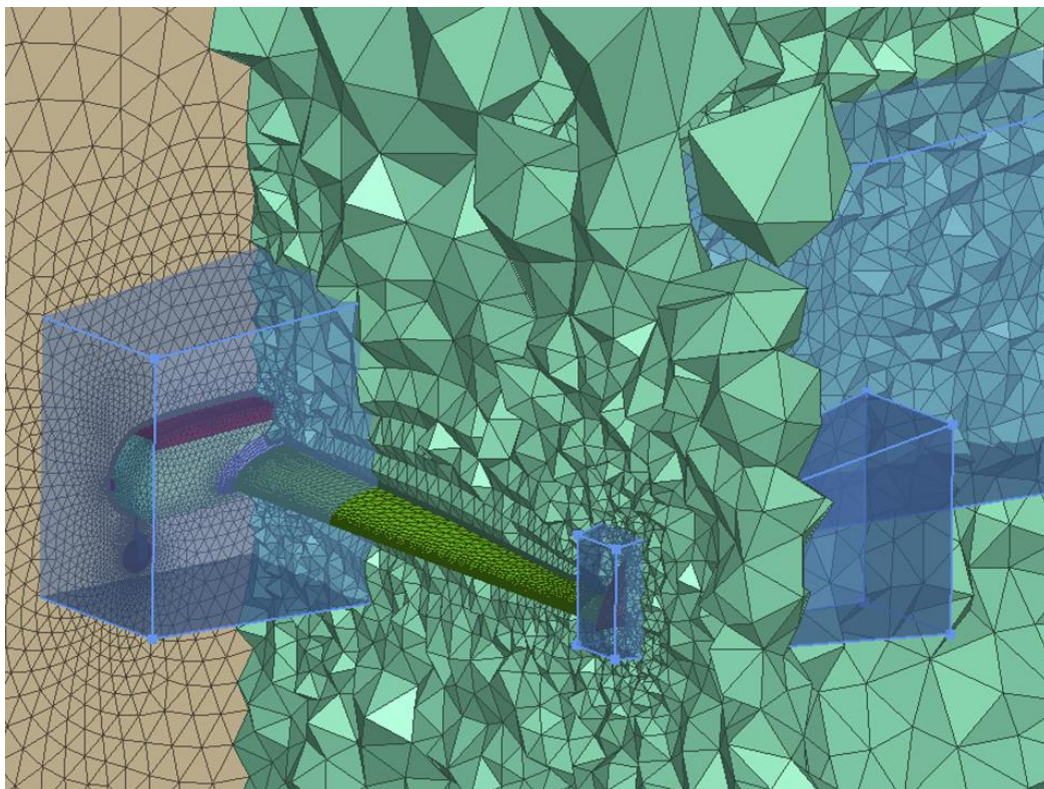
Σχήμα 15 Πλέγμα ανεμογεννήτριας



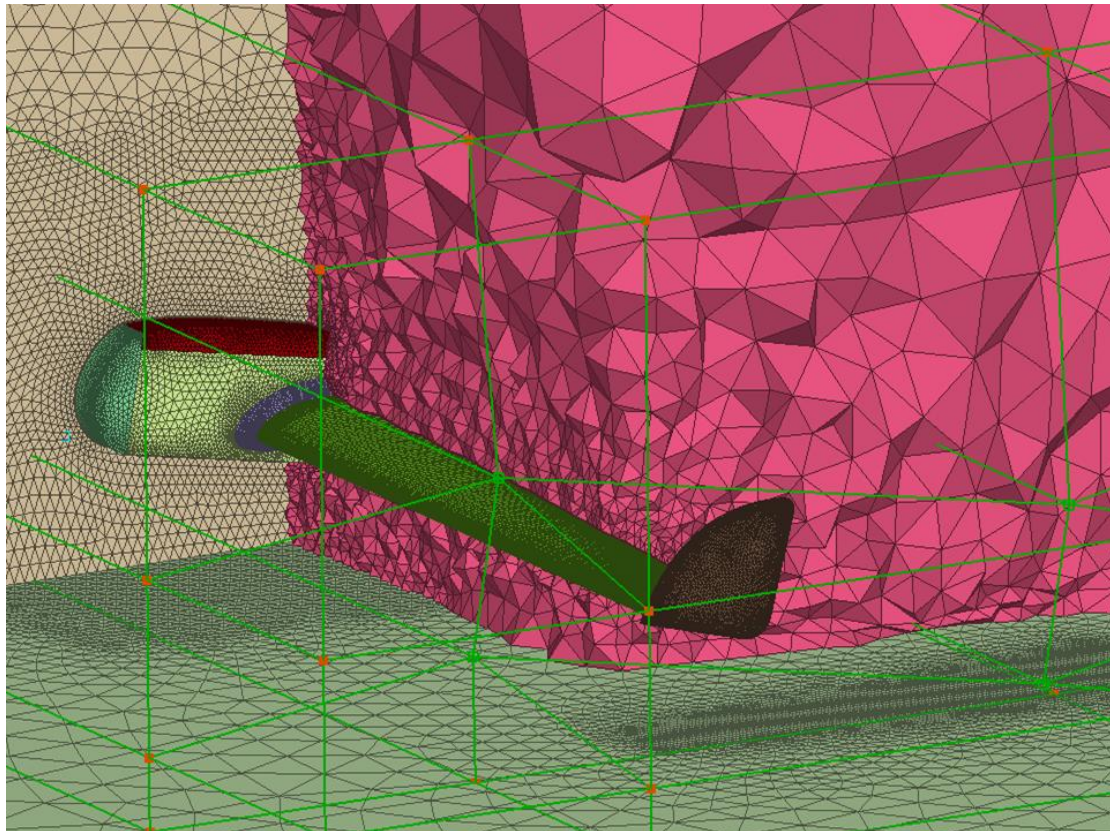
Σχήμα 16 Πλέγμα ανεμογεννήτριας. Ο περιστρεφόμενος δίσκος γύρω από το στροφέιο και τον δακτύλιο περιστροφής προσομοιάζει την σχετική κίνηση. Η πύκνωση του πλέγματος στην περιοχή πίσω από τα ακροπτερύγια επιτρέπει τον ακριβέστερο υπολογισμό του απορεύματος.



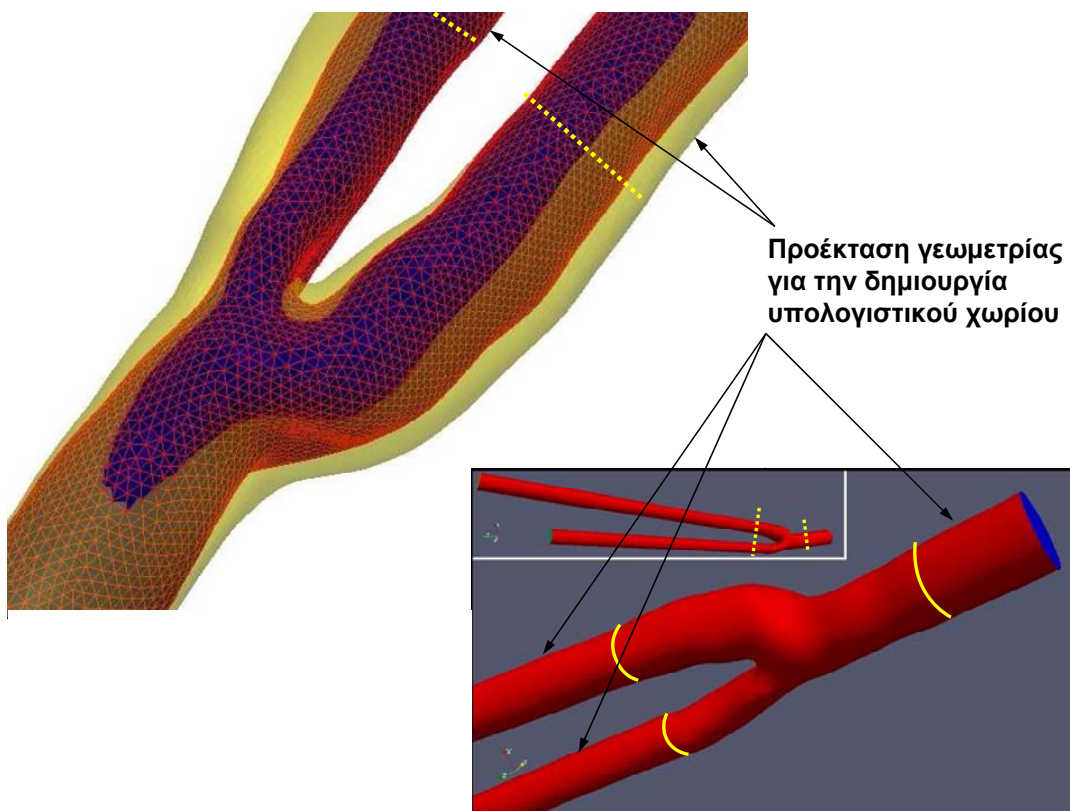
Σχήμα 17 Επιφανειακό πλέγμα και χωρία καθορισμού μήκους πλέγματος που επιτρέπουν τον ακριβέστερο υπολογισμό των απορευμάτων.



Σχήμα 18 Υπολογιστικό πλέγμα για τον ATLAS.



Σχήμα 19 Υπολογιστικό πλέγμα για τον ATLAS σε συνθήκες ground effect



Σχήμα 20 Πλέγμα και επέκταση πεδίου ροής για τον υπολογισμό ροής σε διχασμό καρωτίδας..

Επιβολή αρχικών και οριακών συνθηκών

Στην υπολογιστική ρευστομηχανική χρησιμοποιούμε σχεδόν πάντοτε την χρονομεταβλητή μορφή των εξισώσεων ροής που εκφράζουν τους νόμους διατήρησης $q_t + \nabla \cdot F(q) = 0$. Οι αρχικές συνθήκες για την περίπτωση που αναζητούμε την σταθερά λύση ($\lim_{t \rightarrow 0} \partial q / \partial t = 0$) είναι σχετικά απλές και συνήθως είναι η ομοιόμορφη ροή. Στην περίπτωση ασταθών ροών ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών είναι πιο περίπλοκος.

Οι οριακές συνθήκες ουσιαστικά προσδιορίζουν την λύση του προβλήματος και ο προσδιορισμός που πρέπει, να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Τα περισσότερα εμπορικά και ερευνητικά λογισμικά VMP παρέχουν μεγάλο αριθμό οριακών συνθηκών όπως στερεό τοίχωμα, συμμετρίας, καθορισμένη πίεση εισόδου, έξοδος με μηδενική κλίση κ. λ. π. Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλουμε πρέπει να είναι εφικτές και συμβατές με την ροή. Σε ένα αγωγό π. χ. δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε ταυτόχρονα της πίεσης εισόδου και εξόδου και την παροχή. Παρόμοια ο αριθμός των μεταβλητών που προσδιορίζουμε στα όρια εισόδου και εξόδου για συμπιεστή ροή δεν είναι αυθαίρετος και εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής (υποηχητική ή υπερηχητική) όπως επιβάλλει η θεωρία των χαρακτηριστικών για την συμπιεστή ροή.

Καθορισμός μοντέλων

Οι εξισώσεις ροής, ασυμπίεστης ή συμπιεστής, περιγράφουν με ακρίβεια όλα τα περίπλοκα φαινόμενα ροής όπως την μετάβαση ροής, τύρβη, ωστικά κύματα κ. λ. π. Ο ακριβής υπολογισμός της και της μετάβασης ροής απαιτεί μεγάλη ακρίβεια για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των μικρών κλιμάκων που τις χαρακτηρίζουν. Οι διαθέσιμες προσεγγίσεις είναι η χρήση πυκνού υπολογιστικού πλέγματος, μεγάλη τάξη ακρίβειας ή συνδυασμός των δυο. Η προσομοίωση τυρβωδών ροών βιομηχανικού ενδιαφέροντος απαιτεί πολύ μεγάλο αριθμό υπολογιστικών κελιών και είναι αδύνατη με την διαθέσιμη υπολογιστική δύναμη ακόμη και για σχετικά περιορισμένου μεγέθους υπολογισμούς όπως μεμονωμένες πτέρυγες αεροσκάφους ή στροβιλοκινητήρα. Οι υπολογισμοί τυρβωδών ροών πραγματοποιούνται σήμερα με την χρήση μοντέλων τύρβης που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια και επιτρέπουν την προσομοίωση τύρβης με ικανοποιητική ακρίβεια και εφικτό υπολογιστικό κόστος ακόμα και για πλήρες αεροσκάφος ή στοβιλοκινητήρα.

Στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές πλην της τύρβης υπάρχουν και άλλα φαινόμενα όπως ο βρασμός (διφασική ροή), η καύση, η επήρεια ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ιονισμένα υγρά και αέρια κ. λ. π. η ακριβής προσομοίωση των οποίων επίσης απαιτεί υπολογιστική ισχύ πέραν της διαθέσιμης. Τα φαινόμενα αυτά προσομοιώνονται επίσης με την χρήση μοντέλων τα οποία υπάρχουν στα περισσότερα εμπορικά αλλά και σε πολλά λογισμικά ερευνητικού χαρακτήρα. Η αριθμητική επίλυση εξαρτάται από την ορθή επιλογή του μοντέλου και σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαίο να γίνουν προσομοιώσεις με διαφορετικά μοντέλα για να διαπιστωθεί πιο από αυτά προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το υπό μελέτη φαινόμενο

Επιλογή και εφαρμογή της μεθόδου

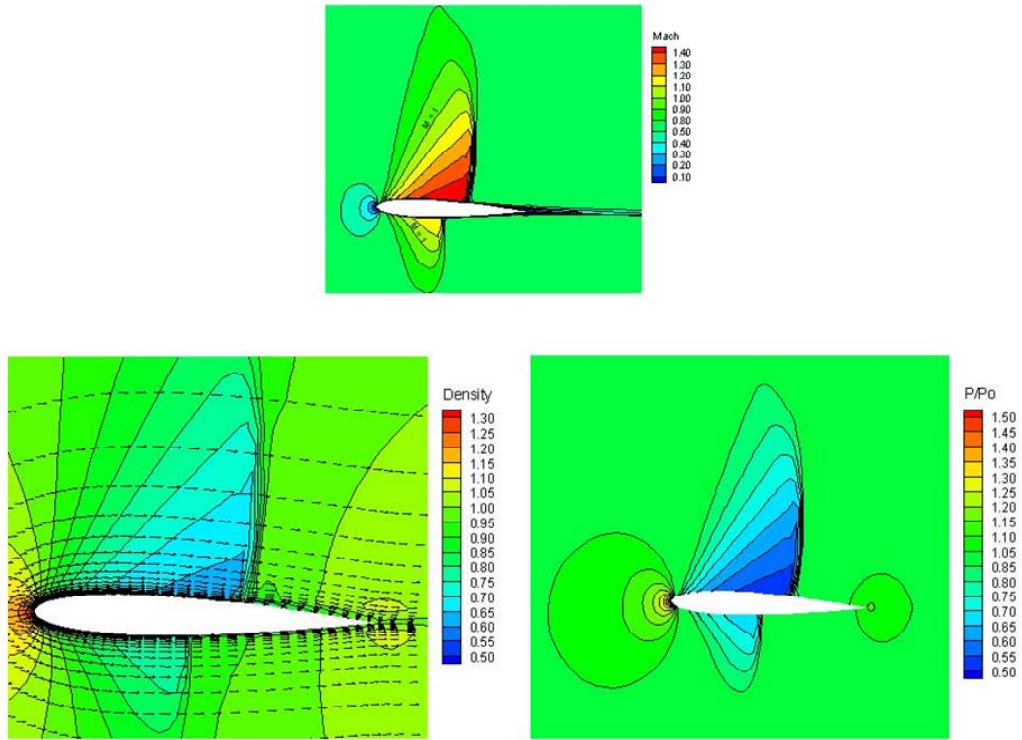
Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης είναι το πιο σημαντικό στάδιο της προσομοίωσης για το πρόβλημα που μας ενδιαφέρει. Η αριθμητική μέθοδος

καθορίζει το σφάλμα αποκοπής και κατά συνέπεια την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα όρια ευστάθειας και κατά συνέπεια το μέγεθος του χρονικού βήματος το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση. Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου ακόμη εξαρτάται και από τον τρόπο κατασκευής του πλέγματος, π. χ. πεπερασμένες διαφορές έχουν εφαρμογή μόνο σε δομημένα πλέγματα ενώ η εφαρμογή μεθόδων πεπερασμένων όγκων ή πεπερασμένων στοιχείων για αδόμητα πλέγματα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις.

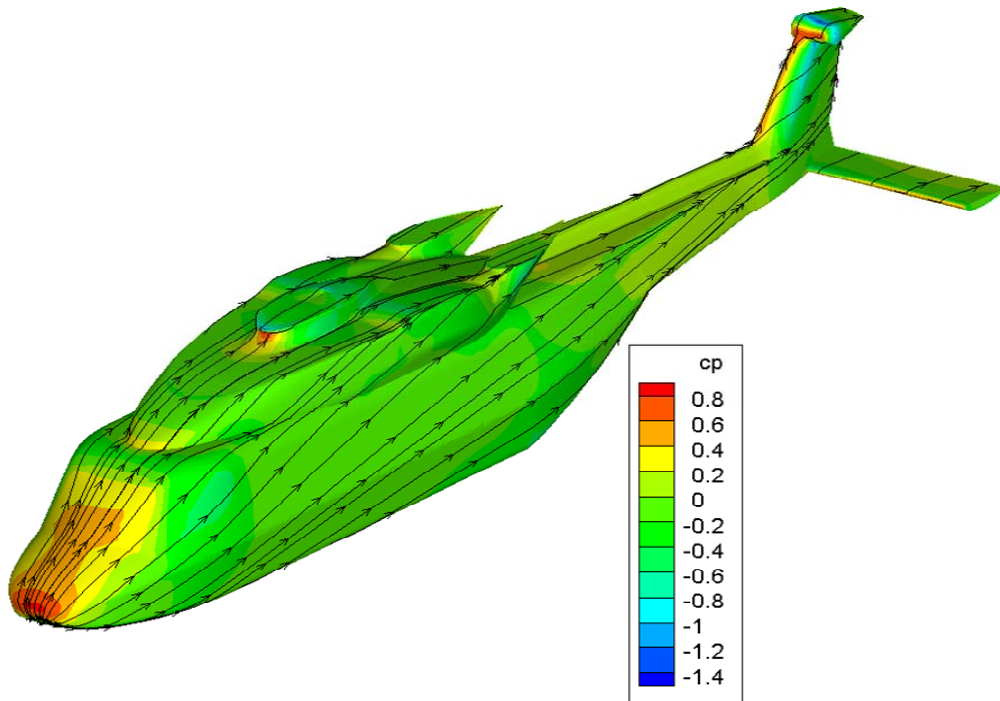
Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το συγκεκριμένο πλέγμα που κατασκευάστηκε το μοντέλο και την μέθοδο αριθμητικής επίλυσης που επιλέχθηκαν. Αρχικά πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης και εάν διαπιστωθεί ότι η σύγκλιση δεν είναι δυνατή για τις επιλογές που έγιναν και το συγκεκριμένο υπολογιστικό πλέγμα τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και γίνονται κατάλληλες διορθώσεις. Η επίτευξη σύγκλισης είναι το πρώτο στάδιο περάτωσης της διαδικασίας προσομοίωσης. Το επόμενο σημαντικό στάδιο είναι η επαλήθευση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Ο πλέον αποτελεσματικός και αποδεκτός τρόπος πιστοποίησης της αριθμητικών προσομοίωσης είναι η σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αριθμητικές μετρήσεις είναι αναγκαίο να γίνουν τουλάχιστον μια ή και δυο προσομοιώσεις με πυκνότερο πλέγμα.

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

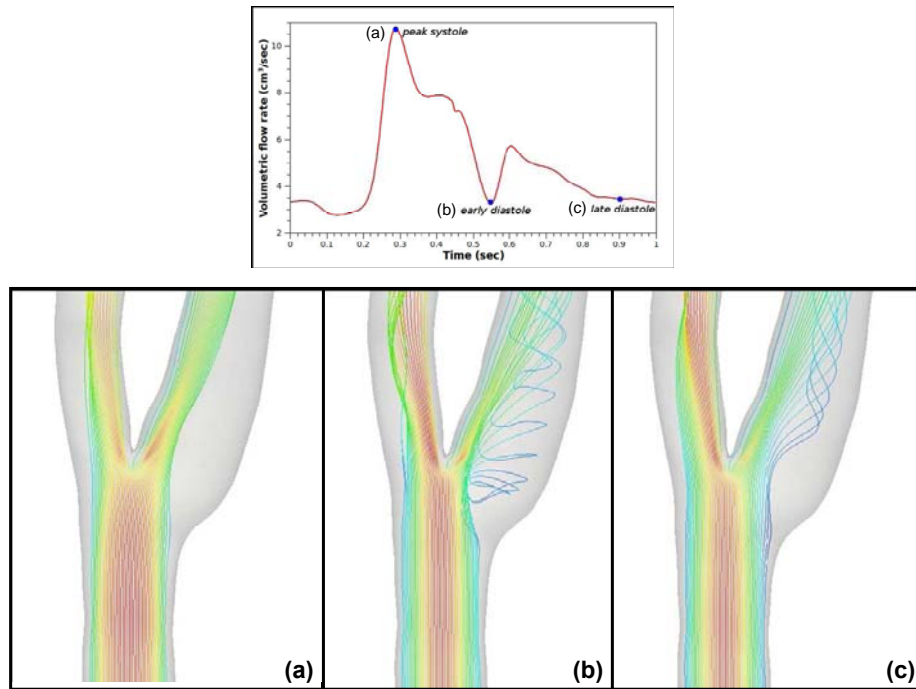
Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν μόνο τις εξαρτημένες μεταβλητές οι οποίες για μεν την ασυμπίεστη ροή είναι το διάνυσμα της ταχύτητας και η πίεση σε κάθε σημείο υπολογισμού. Τα σημεία υπολογισμού μπορεί να είναι οι κόμβοι του πλέγματος για πεπερασμένες διαφορές, το κέντρο βάρους των στοιχείων ή κόμβοι του πλέγματος για cell centered και vertex based μεθόδους πεπερασμένων όγκων αντίστοιχα, ενώ σημεία υπολογισμού για μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων είναι τα κομβικά σημεία (quadrature points) τα οποία δεν συμπίπτουν κατ' ανάγκη με τους κόμβους του πλέγματος. Για συμπιεστή ροή οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η πυκνότητα το διάνυσμα της ορμής και η ολική ενέργεια. Οι ποσότητες που ενδιαφέρουν τον περαιτέρω σχεδιασμό όπως ολική άντωση και οπισθέλκουσα μπορούν να εξαχθούν από τις τιμές των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Άλλες ποσότητες όπως ο τοπικός αριθμός Mach της ροής πρέπει να βρεθούν μετά από επεξεργασία των δεδομένων η οποία γίνεται συνήθως σε ξεχωριστό λογισμικό (π.χ. techplot) το οποίο παρέχει την δυνατότητα οπτικοποίησης του πεδίου ροής (δες Σχ. 15) και τον υπολογισμό ποσοτήτων όπως ο τοπικός αριθμός Mach και η κατανομή της πίεσης. Παρόμοια στο Σχ. 16 φαίνεται η κατανομή του συντελεστή πίεσης στην επιφάνεια του ελικοπτερό που προκύπτει από την επεξεργασία του υπολογισμένου πεδίου ροής. Επιπροσθέτως έχουν σχεδιασθεί και οι γραμμές ροής κοντά στην επιφάνεια οι οποίες καταδεικνύουν τις γραμμές αποκόλλησης και δίνουν μία εικόνα της κατεύθυνσης και της ροής του τρισδιάστατου οριακού στρώματος. Στο Σχ. 17 παρουσιάζεται μία απεικόνιση του χρονομεταβλητού πεδίου ροής (δες, Σχ. 14) σε διακλάδωση αρτηρίας όπου η απεικόνιση πραγματοποιείται με στιγμιαίες γραμμές ροής χρωματισμένες με το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας.



Σχήμα 15 Απεικόνιση πεδίου διηχητικής ροής ($M = 0.8$) γύρω από αεροτομή..

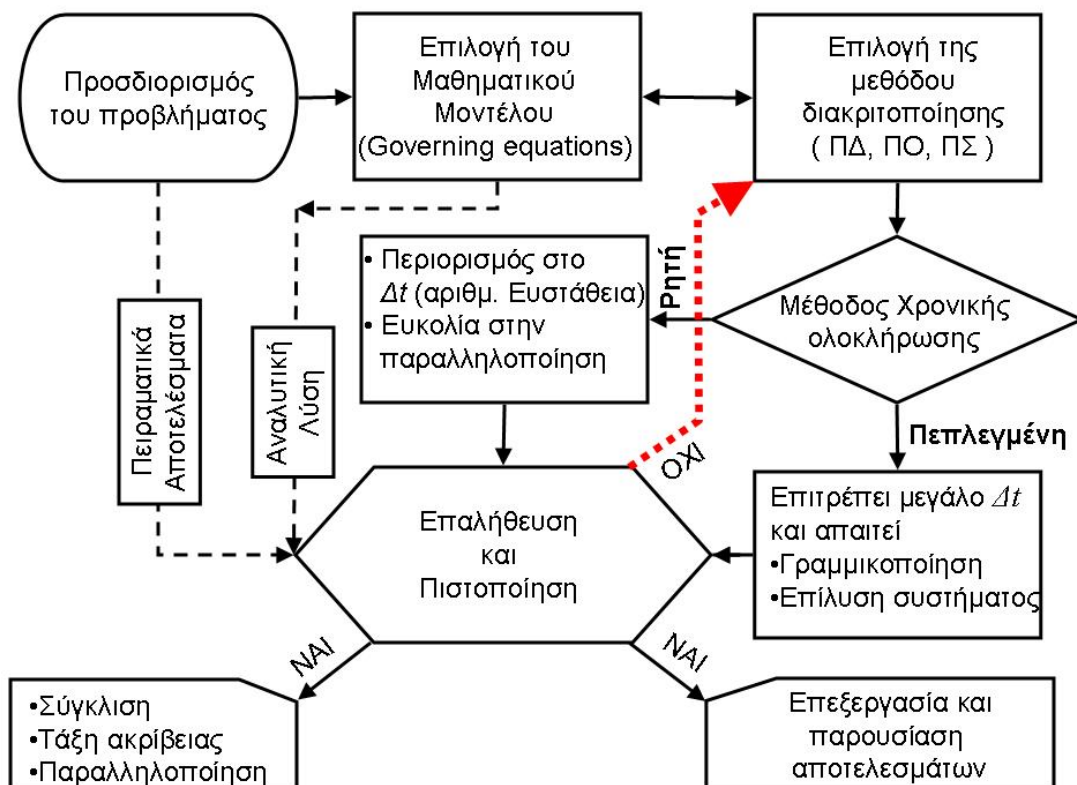


Σχήμα 16 Κατανομή του συντελεστή πίεσης στο σώμα ελικόπτερου.



Σχήμα 17 Αναπαράσταση του χρονομετβλητού πεδίου ροής σε διχασμό αρτηρίας.

2. Σχεδιασμός λογισμικού



Σχήμα 18 Γεωμετρία και πεδίο ροής σε επιβατικό αυτοκίνητο.

Ο σχεδιασμός λογισμικού για υπολογιστική μηχανική ρευστών είναι σημαντικά περίπλοκος και περιλαμβάνει τα στάδια που απεικονίζονται στο Σχ. 18. Τα βασικά στάδια είναι η επιλογή της μεθόδου χωρικής διακριτοποίησης και η εκλογή της μεθόδου ολοκλήρωσης στον χρόνο. Το τελικό στάδιο πιστοποίησης είναι επίσης πολύ σημαντικό και η απουσία πιστοποίησης και επιθυμητού επίπεδου ακρίβειας συχνά μπορεί να οδηγήσει στην αναθεώρηση της μεθόδου. Η προσθήκη μοντέλων οριακών συνθηκών και άλλων αναγκαίων εργαλείων τα οποία καθιστούν το λογισμικό κατάλληλο για πρακτικά προβλήματα γίνεται σε επόμενα στάδια τα οποία είναι επίσης χρονοβόρα.