



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΜΠΑΛΕΣ
ΠΟΔΟΣΦΑΙΡΟΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

ΑΓΓΕΛΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ-ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΟΥΡΛΙΔΑΚΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΙΟΥΛΙΟΣ 2014

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Τουρλιδάκη, για την πρόταση, αλλά και τη συνεχή καθοδήγηση, κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Περίληψη

Το ποδόσφαιρο είναι ένα παγκόσμιο άθλημα που το παρακολουθούν εκατομμύρια θεατές σε όλο τον κόσμο. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι χωρίς αμφιβολία η σφαιρική μπάλα. Η τροχιά που ακολουθεί η μπάλα σε κάθε σουτ εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση, η μελέτη και η αεροδυναμική ανάλυση τριών μπαλών ποδοσφαίρου με ίση ακτίνα αλλά με διαφορετική επιφάνεια η κάθε μια, καθώς και μιας λείας σφαίρας ίσης ακτίνας. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η διαφορά του συντελεστή οπισθέλκουσας συναρτήσει του αριθμού Reynolds μεταξύ των μπαλών και της σφαίρας όπως επίσης και η δύναμη της αντίστασης του αέρα συναρτήσει της ταχύτητας του με την βοήθεια προσομοίωσης της ροής σε υπολογιστικό πρόγραμμα.

Η μοντελοποίηση και η αριθμητική επίλυση της ροής σε αυτήν τη διάταξη έγινε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής, Ansys CFX. Για το σχεδιασμό όπου κρίθηκε απαραίτητο χρησιμοποιήθηκε το solid works αν και οι γεωμετρίες των μπαλών προϋπήρχαν και ήταν διαθέσιμες στο εργαστήριο.

Για λόγους υπολογιστικής ισχύος η ροή επιλύθηκε ως μόνιμη σε ταχύτητες εύρους από 20km/h έως 130km/h καθώς για αυτό το εύρος υπήρχαν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, ενώ το πεδίο ροής επιλύθηκε ως τυρβώδες ή στρωτό ανάλογα με την τιμή του αριθμού Reynolds (για τη σφαίρα) και ως τυρβώδες για τις μπάλες λόγω της επιφανείας τους και των μοτίβων που επιτυγχάνουν μετάβαση σε τυρβώδη ροή αμέσως. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν σημαντικές ομοιότητες με τα διαθέσιμα πειραματικά.

Abstract

Football is a global sport that millions of viewers watching worldwide. The main feature is without doubt the spherical ball. The path followed by the ball on each shot depends heavily on the aerodynamic characteristics.

The purpose of this thesis is to design, study and aerodynamic analysis of three footballs with equal radius but with different surface each, as well as a smooth sphere of radius equal. More specifically, we study the difference of drag coefficient versus Reynolds number between the ball and the sphere as well as the force of air resistance as a function of speed by means of flow simulation on a computer program.

The modeling and numerical simulation of flow in this layout was done using the commercial computational fluid dynamics software, Ansys CFX. For the design where necessary used in solid works although the geometries of balls existed and was available in the laboratory.

For reasons of computational power flow resolved as permanent speeds range from 20km/h to 130km/h as this range were no experimental data while the flow field is resolved as a turbulent or laminar, depending on the value of the number of Reynolds (for sphere) and turbulence on the surface of these balls and motifs that achieve transition to turbulent flow immediately. The results showed significant similarities with the available experimental.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	7
	1.1 Ιστορική αναδρομή.....	7
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	15
	2.1 Ροή γύρω από σφαίρα.....	15
	2.1.1 Γενικά.....	15
	2.1.2 Ροή σφαίρας.....	16
	2.1.3 Πείραμα.....	17
	2.2 Διαφοροποιήσεις στην αεροδυναμική συμπεριφορά των μπαλών ποδοσφαίρου λόγω των διαφορετικών μοτίβων στην επιφάνεια τους.....	19
	2.2.1 Πείραμα alam et al.....	20
	2.2.2 Golf Ball.....	22
	2.3 Παρουσίαση σχετικών εργασιών.....	23
	2.3.1 Περιγραφή μπαλών (Πείραμα Alam et. al.).....	24
	2.3.2 Στήσιμο πειράματος.....	24
	2.3.3 Αποτελέσματα.....	26
	2.3.4 Συμπεράσματα.....	28
3	Υπολογιστική μοντελοποίηση.....	29
	3.1 Επιλογή μπαλών και περιγραφή γεωμετρίας.....	29
	3.2 Ανάπτυξη μοντέλου CFD.....	32
	3.2.1 Δημιουργία της γεωμετρίας.....	33
	3.2.2 Κατασκευή του πλέγματος.....	35
	3.2.3 Αρχικές και Οριακές συνθήκες.....	38
	3.3 Περιγραφή του μοντέλου τύρβης SST.....	44
	3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	46
	3.4.1 Αποτελέσματα σφαίρας.....	46
	3.4.2 Αποτελέσματα μπάλας 32 panels 0,5.....	63

	3.4.3	Αποτελέσματα μπάλας 32 panels.....	75
	3.4.4	Αποτελέσματα μπάλας 18 panels.....	88
4		Συμπεράσματα.....	100
5		Προτάσεις για μελλοντική επέκταση της μελέτης.....	105
6		Βιβλιογραφία.....	106

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ιστορική αναδρομή

Προιστορία

Από την αρχαιότητα η άνθρωποι έβρισκαν ενδιαφέρον να κλωτσούν μια μπάλα. Στην Νότια Αμερική οι ινδιάνοι ήταν γνωστοί για μια ελαφριά ελαστική μπάλα που χρησιμοποιούσαν. Όμως το καουτσούκ κατασκευάστηκε αρκετά χρόνια αργότερα.

Το 1855 ο Charles Goodyear κατασκεύασε την πρώτη μπάλα από βουλκανισμένο καουτσούκ. Το σχήμα της μοιάζει με τις σημερινές μπάλες του μπάσκετ ενώ τα πάνελ της είναι κολλημένα μεταξύ τους.



Εικόνα 1.1 Charles Goodyear η παλαιότερη μπάλα ποδοσφαίρου 1855

Μέχρι τις αρχές του 1900 όλες οι μπάλες κατασκευάζονταν από κύστες καουτσούκ και πάνελ από δέρμα ζώων ραμμένα το ένα με το άλλο. Αυτού του είδους οι μπάλες αποτελούνταν από 8 μεγάλα πάνελ που ενώνονταν στους δυο πόλους της μπάλας με δυο μικρότερα οκτάγωνα πάνελ. Όσο περνούσε ο καιρός οι άνθρωποι κατασκεύαζαν ολοένα και πιο ανθεκτικά καουτσούκ τα οποία αντέχανε μεγαλύτερες πιέσεις αέρα. Αυτού του είδους οι μπάλες είχαν ελαστικότητα και ήταν δυνατόν να τις κλωτσήσει ανθρώπινο πόδι, ήταν όμως οδυνηρό το χτύπημα όταν κατάληγαν πάνω σε ανθρώπους ιδιαίτερα εάν ήταν βρεγμένες.



Εικόνα 1.2 Μπάλα του 1900

Το 1930 στο πρώτο world cup στην Ουρουγουάη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο T-shape. Ονομάστηκε έτσι λόγω των πάνελ που είχαν το σχήμα T. Αποτελούνταν από 12 πάνελ και μία ραφή η οποία έκλεινε αφού φουσκωνόταν.



Εικόνα 1.3 μπάλα του 1930

Στο δεύτερο world cup το 1934 στην Ιταλία χρησιμοποιήθηκε μια μπάλα με 12 πάνελ και αυτή, ωστόσο το σχήμα τους είναι μοναδικό και δυσεύρετο την σήμερον ημέρα. Εδώ επίσης υπάρχει η ίδια ραφή για το φούσκωμα της μπάλας.



Εικόνα 1.4 Μπάλα του 1934

Η εταιρία ALLEN προώθησε την μπάλα του world cup το 1938 και έδωσε και το όνομά της σε αυτήν. Η συγκεκριμένη μπάλα αποτελούνταν από 13 πάνελ σε αντίθεση με τις περισσότερες μπάλες της εποχής που είχαν 12. Η ιδιαιτερότητα αυτή οφείλεται στα 3 μικρότερα πάνελ που είχε για να τοποθετηθεί η ραφή του φουσκώματος ενώ όλα τα υπόλοιπα ήταν δέσμες δυο μεγαλύτερων πάνελ.



Εικόνα 1.5 ALLEN BALL world cup 1938

Το 1950 για πρώτη φορά στην ιστορία η μπάλα του world cup της Βραζιλίας δεν είχε ραφή για να φουσκώνει αλλά βαλβίδα. Αποτελούνταν και αυτή από 12 πάνελ.



Εικόνα 1.6 1950 Πρώτη μπάλα με βαλβίδα

Το 1954 και το 1958 χρησιμοποιήθηκαν δυο παρόμοιες μπάλες με 18 δερμάτινα πάνελ. Η μόνη τους διαφορά ήταν στο χρώμα.



Εικόνα 1.7 μπάλα του 1954



Εικόνα 1.8 μπάλα του 1958

Στην Χιλή το 1962 κατασκευάστηκε από την adidas η πρώτη μπάλα αποτελούμενη από οκτάγωνα πάνελ.



Εικόνα 1.9 1962 Santiago

Η μπάλα για το world cup του 1966 ήταν παρόμοια με αυτήν του 1954 και του 1958 με μόνη διαφορά στο χρώμα που ήταν πορτοκαλί. Επίσης αυτή η μπάλα είναι και η τελευταία που κατασκευάζεται για το world cup από άλλη εταιρία πέραν της adidas. Από τότε μέχρι και σήμερα κρατάει την ηγεμονία στην κορυφαία διοργάνωση του ποδοσφαίρου.



Εικόνα 1.10 World cup 1966

Το 1968 η adidas έβγαλε για πρώτη φορά στην παραγωγή μια νέα μπάλα και την ονόμασε Telstar αποτελούμενη από 32 πάνελ, 12 πεντάγωνα και 20 εξάγωνα. Αυτός το σχέδιο είναι ευρέως διαδεδομένο ακόμα και σήμερα. Επίσης αξιοσημείωτος είναι και ο χρωματισμός της μπάλας σε άσπρο και μαύρο ο οποίος έγινε για να είναι ευδιάκριτη η μπάλα από την ασπρόμαυρη τηλεόραση. Η Telstar έγινε η επίσημη μπάλα για την διοργάνωση του world cup το 1970 και το 1974, αλλά και του Euro 1968, 1972 και 1976.



Εικόνα 1.11 Telstar ball

Για τα επόμενα 10 χρόνια (1978 με 1988) μια νέα μπάλα ήρθε να καλύψει της ανάγκες των κορυφαίων διοργανώσεων. Η μπάλα Tango, όπως ονομάστηκε είχε κ αυτή τον ίδιο σχηματισμό με τα 32 πάνελ ενώ τα 20 εξάγωνα πάνελ είχαν ζωγραφισμένο από ένα τρίγωνο. Όλα τα τρίγωνα μαζί σχημάτιζαν 7 κύκλους. Η μπάλα αυτή στην αρχή ήταν φτιαγμένη από δέρμα όπως και οι υπόλοιπες μπάλες της εποχής όμως από το 1984 και μετά κατασκευάστηκε για πρώτη φορά από ένα νέο υλικό την πολυουρεθάνη, η οποία απορροφούσε τους κραδασμούς. Το 1988 το υλικό αυτό ενισχύθηκε και έκανε την μπάλα ανθεκτικότερη στο νερό.



Εικόνα 1.12 Tango ball

Από το 1988 έως και το 2000 ακολουθούν μπάλες βασιζόμενες στο σχήμα και το σχέδιο της Tango. Η διαφορές τους είναι στα χρώματα και στα υλικά που εξελίσσονται συνεχώς. Αξιοσημείωτη είναι η Etrusco Unico του Euro 1992 η οποία είναι η πρώτη εντελώς αδιάβροχη μπάλα.



Εικόνα 1.13 Etrusco Unico 1990,1992



Εικόνα 1.14 Questra 1994,1996



Εικόνα 1.15 Tricolore 1998



Εικόνα 1.16 Terresta 2000

Η Fevernova, επίσημη μπάλα του world cup 2002 ήρθε για να σπάσει το θεσμό της Tango που επικρατούσε από το 1978. Το σχήμα της παρέμεινε στα ίδια πλαίσια (32 πάνελ) αλλάζει μόνο το σχέδιο και τα υλικά.



Εικόνα 1.17 Fevernova 2002

Η Roteiro μπάλα του Euro 2004 καταργεί τις ραφές στα πάνελ. Χρησιμοποιεί μια νέα τεχνολογία θερμικής κόλλησης με ειδική κόλλα για μεγαλύτερη αντοχή στις πιέσεις και στο νερό. Έχει προστεθεί νέα πολυουρεθάνη με βάση το συντακτικό αφρών στην επιφάνεια, για μέγιστη αντοχή στην τριβή.



Εικόνα 1.18 Roteiro 2004

Το 2006 για το world cup, σχεδιάστηκε μια νέα μπάλα με 14 πάνελ σε αντίθεση με τα 32 που χρησιμοποιούνταν από το 1968. Τα πάνελ της teamgeist είναι εμφανές μεγαλύτερα από της προηγούμενες μπάλες, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στους παίκτες μίας ευρύτερης περιοχής για εύστοχα σουτ. Επίσης οι ραφές των 14 πάνελ είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με τις παλαιότερες μπάλες, κάνοντας έτσι την μπάλα πιο σφαιρική από ποτέ. Η μέθοδος θερμικής κόλλησης των πάνελ αντί για τις κλασικές ραφές που χρησιμοποιείται και εδώ, αυξάνει το βάρος της μπάλας σε συνθήκες βροχής μόλις 0,1% όταν το εγκεκριμένο πρότυπο της FIFA είναι $\leq 10\%$.



Εικόνα 1.19 teamgeist 2006

Η jabulani κατασκευάστηκε το 2010 για το world cup και έλαβε διάφορες κριτικές από τους παίκτες και τους προπονητές της διοργάνωσης. Πολλοί από αυτούς αναφέρουν ότι η πορεία της στον αέρα δεν ήταν καθόλου προβλέψιμη. Η μπάλα αυτή αποτελείται από 8 πάνελ θερμικά συγκολλημένα μεταξύ τους. Τα πάνελ είναι φορμαρισμένα από αιθυλενοβυλικό οξύ και θερμοπλαστική πολυουρεθάνη. Η επιφάνεια της έχει αυλάκια ώστε να αυξάνεται η αεροδυναμική της ενώ το αυξανόμενο βάρος σε συνθήκες βροχής είναι μηδέν.

FIFA Approved standard ^[4]	Jabulani measurements ^[4]	
Circumference	68.5–69.5 cm	69.0 ± 0.2 cm
Diameter	≤ 1.5% difference	≤ 1.0% difference
Water absorption	≤ 10% weight increase	~ 0% weight increase
Weight	420–445 g	440 ± 0.2 g
Rebound test	≤ 10 cm	≤ 6 cm
Loss of pressure	≤ 20%	≤ 10%

Πίνακας 2.1



Εικόνα 1.20 jabulani 2010

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Ροή γύρω από σφαίρα

2.1.1 Γενικά

Αντίσταση ή οπισθέλκουσα (Drag) ονομάζεται η [δύναμη](#) η οποία έχει τον ίδιο φορέα με αυτόν της [ταχύτητας](#), αλλά αντίθετη φορά, και εμφανίζεται κατά την κίνηση αντικειμένων εντός [ρευστού](#). Η αντίσταση είναι η κυρίαρχη δύναμη η οποία αντιτίθεται στην [κίνηση](#) των σωμάτων και οφείλεται ,στη διαφορετική [πίεση](#) η οποία επικρατεί στις δύο πλευρές ενός σώματος.

Η αντίσταση ενός αντικειμένου εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους όπως το σχήμα, το μέγεθος, την κλίση και τις συνθήκες της ροής. Όλες αυτές οι παράμετροι συνδέονται μέσω της εξίσωσης:

$$D = C_d * 0.5 * \rho * V^2 * A \quad (2.1)$$

Όπου:

D= Δύναμη ολικής αντίστασης N

C_d= Ολικός συντελεστής αντιστάσεως

ρ = Πυκνότητα του ρευστού $\frac{kg}{m^3}$

V= Ταχύτητα του ρευστού $\frac{m}{s}$

A= Η συνολική μετωπική επιφάνεια του αντικειμένου m^2

Ο συντελεστής αντίστασης είναι ένας αδιάστατος αριθμός που χαρακτηρίζει όλους τους πολύπλοκους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση και μεταβάλλεται αναλόγως της τιμής του αριθμού Re, δηλαδή αναλόγως την ταχύτητα του αντικειμένου μέσα στο ρεύμα του ρευστού, αλλά και της ιδιότητες του ρευστού, όπως το ιξώδες και την πυκνότητα του.

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι επίσης ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος δίνει ένα μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων σε σχέση με τις δυνάμεις ιξώδους και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί τη σχετική σημασία αυτών των δύο τύπων δυνάμεων για δεδομένες συνθήκες ροής.

Εξίσωση αριθμού Reynolds:

$$Re = \frac{V * \rho * L}{\mu} \quad (2.2)$$

Όπου:

V= Ταχύτητα αντικειμένου στο ρευστό $\frac{m}{s}$

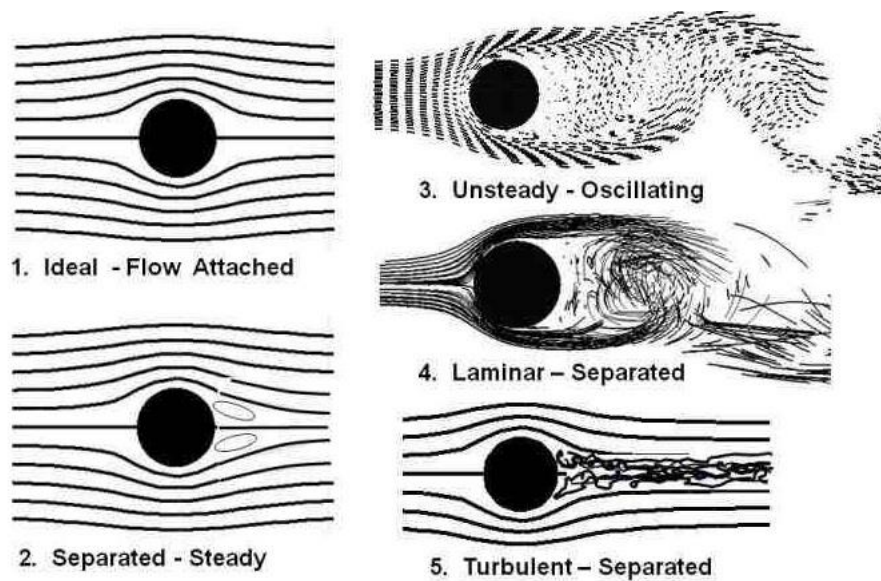
ρ = Πυκνότητα του ρευστού $\frac{kg}{m^3}$

L=Χαρακτηριστικό μήκος (διάμετρος για σφαίρα) m

$\mu = \text{δυναμικό ιξώδες } \frac{kg}{m \cdot s}$

2.1.2 Ροή σφαίρας

Λόγω της απλότητας του σχήματος της σφαίρας, που χαρακτηρίζεται μόνο από μια διάσταση (την διάμετρο), η ροή γύρω από αυτήν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό του Reynolds βασισμένο πάνω στην ταχύτητα της εξωτερικής ροής V , και την διάμετρο D της σφαίρας: $R=VD/v$.



Εικόνα 2.1: Ροή του ρευστού καθώς αυξάνεται η ταχύτητα γύρω από σφαίρα

1) Η περίπτωση αυτή θεωρείται ιδανική και δεν υπάρχει στην πραγματικότητα. Η ταχύτητα της ροής είναι πολύ μικρή και το ιξώδες ανύπαρκτο. Η ροή θεωρείται ιδανική χωρίς οριακό στρώμα κατά μήκος της επιφάνειας. Η ροή είναι συμμετρική από πάνω προς τα κάτω γι'αυτό και η δύναμη ολικής αντίστασης είναι μηδέν.

2) Στη δεύτερη περίπτωση απεικονίζεται αυτό που συμβαίνει στις χαμηλές ταχύτητες. Δυο σταθερές δίνες σχηματίζονται στην πίσω μεριά της σφαίρας. Η ροή διαχωρίζεται αλλά παραμένει σταθερή ενώ η δυο αυτές δίνες παράγουν την δύναμη της αντίστασης πάνω στην σφαίρα.

3) Η τρίτη περίπτωση δείχνει την ροή καθώς η ταχύτητα αυξάνεται. Δίνες σχηματίζονται τώρα εναλλάξ στην πάνω και στην κάτω πλευρά της σφαίρας οι οποίες την εγκαταλείπουν και μετακινούν τον απόρο με ταχύτητα λίγο μικρότερη από αυτή της εξωτερικής ροής. Παρατηρούνται έτσι πίσω από την σφαίρα δυο σειρές δινών που είναι

γνώστες με το όνομα «σειρές του Von Karman». (Karman vortex street). Ο σχηματισμός των δινών είναι περιοδικό φαινόμενο με καλά καθορισμένη συχνότητα. Ο σχηματισμός δινών εναλλάξ στην πάνω και κάτω πλευρά της σφαίρας προκαλεί περιοδική δύναμη στην σφαίρα σε κατεύθυνση κάθετη προς την ροή και με συχνότητα ίση προς την συχνότητα σχηματισμού δινών.

4) Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα έχει αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το περιοδικό φαινόμενο των δινών έχει μετατραπεί σε χαοτική και ακανόνιστη συμπεριφορά του απόρου. Συγκεκριμένα στα άκρα του οριακού στρώματος η ροή είναι στρωτή ενώ όσο πλησιάζουμε προς το κέντρο η ροή τείνει να μετατραπεί σε τυρβώδη. Αυτή η περίπτωση χαρακτηρίζεται σαν μια μεταβατική κατάσταση της ροής η οποία από στρωτή μετατρέπεται σε τυρβώδη.

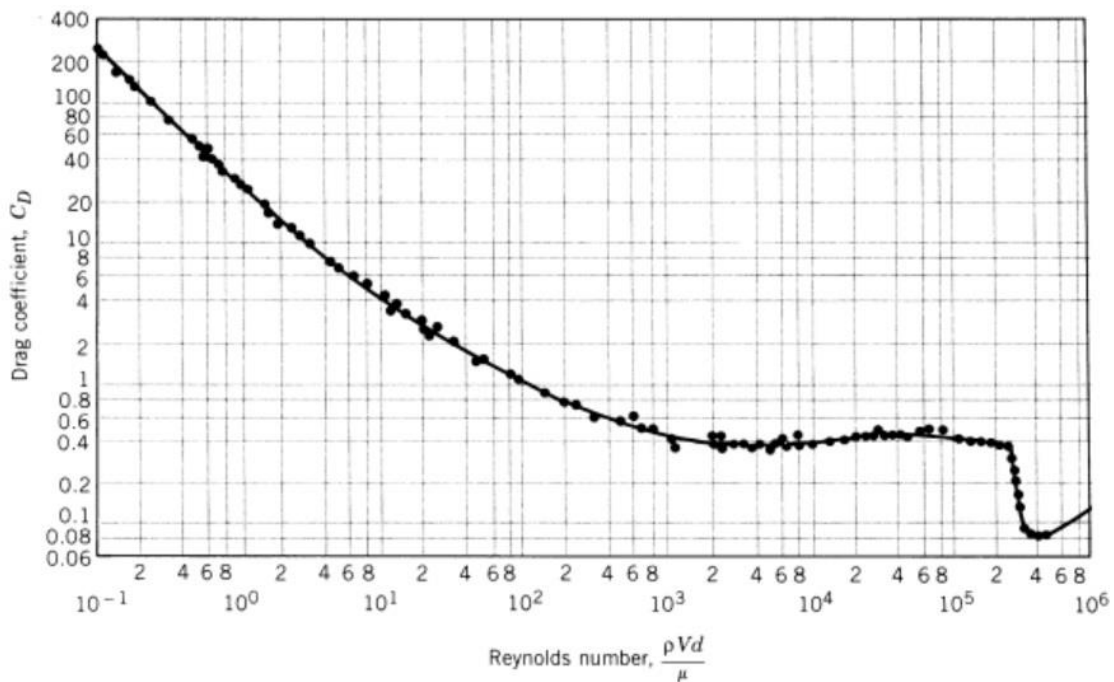
5) Στην 5^η περίπτωση η ταχύτητα έχει αυξηθεί σημαντικά με αποτέλεσμα το οριακό στρώμα της σφαίρας να γίνεται τυρβώδες. Τα σημεία αποκόλλησης της ροής μετακινούνται προς τον κεντρικό άξονα, και το πλάτος του απόρου μειώνεται. Ο συντελεστής αντίστασης της σφαίρας επίσης μειώνεται, και φτάνει στην τιμή 0.1 όταν ο αριθμός του Reynolds φτάσει την τιμή 400000. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής αντίστασης ανεβαίνει, παραμένει όμως χαμηλότερος από την τιμή που έχει όταν το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Η μεταβολή του συντελεστή αντίστασης σφαίρας συναρτήσει του αριθμού Reynolds φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα.

2.1.3 Πείραμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή αντίστασης

Ο συντελεστής αντίστασης συνήθως προσδιορίζεται πειραματικά χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο σε μια αεροδυναμική σήραγγα.

Σε μια αεροδυναμική σήραγγα όπου είναι γνωστά η ταχύτητα, η πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού, τοποθετείται μια σφαίρα γνωστής ακτίνας και μετρείται η δύναμη ολικής αντίστασης. Πλέον με την βοήθεια της εξίσωσης (2.1) υπολογίζεται ο ολικός συντελεστής αντίστασης C_d .

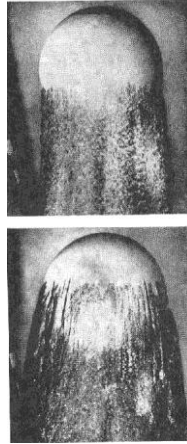
Επαναλαμβάνοντας το πείραμα αρκετές φορές, αλλάζοντας σταδιακά την ταχύτητα του ρευστού και υπολογίζοντας εκτός από τον ολικό συντελεστή αντίστασης και τον αριθμό Reynolds, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα συντελεστή οπισθέλκουσας

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι για το πεδίο τιμών του αριθμού Reynolds από 10^3 έως $2 \cdot 10^5$ ο συντελεστής αντίστασης είναι σταθερός. Για αυτό το πεδίο τιμών ο C_D θεωρείται ανεξάρτητος της τιμής του αριθμού Reynolds. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής αντίστασης μειώνεται απότομα από την τιμή του 0.4 σε μια τιμή λίγο παρακάτω από το 0.1, καθώς ο αριθμός Reynolds έχει φτάσει στο $4 \cdot 10^5$. Αυτή η απότομη πτώση του C_D ονομάζεται drag crisis και συσχετίζεται με την αποκόλληση του οριακού στρώματος από την επιφάνεια της σφαίρας. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds ο συντελεστής αντίστασης ανεβαίνει, παραμένει όμως χαμηλότερος από την τιμή που έχει όταν το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Η μείωση του συντελεστή αντίστασης όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες χαρακτηρίζει όλα τα σώματα με καμπυλωμένο περίβλημα. Η εξήγηση για την μετατόπιση των σημείων αποκόλλησης είναι η εξής: Όταν το οριακό στρώμα γίνει τυρβώδες, τα σωματίδια του ρευστού μέσα στο οριακό στρώμα έχουν αυξημένη ορμή (επειδή έχουν αυξημένη ταχύτητα). Κατά συνέπεια, χρειάζονται μεγαλύτερες δυνάμεις πίεσης για να προκαλέσουν αποκόλληση. Τέτοιες δυνάμεις πίεσης αναπτύσσονται σε σημεία κατάντη από το σημείο αποκόλλησης του στρωτού οριακού στρώματος.

Η μετατόπιση των σημείων αποκόλλησης λόγω της μετατροπής του οριακού στρώματος σε τυρβώδες φαίνεται στην εικόνα 2.3 για ροή γύρω από σφαίρα. Η μείωση του πάχους του απόρου της σφαίρας είναι επίσης εμφανής.



Εικόνα 2.3: Ροή γύρω από σφαίρα με (α) στρωτό οριακό στρώμα (κάτω εικόνα), και (β) Τυρβώδες οριακό στρώμα (άνω εικόνα).

2.2 Διαφοροποιήσεις στην αεροδυναμική συμπεριφορά των μπαλών ποδοσφαίρου λόγω των διαφορετικών μοτίβων στην επιφάνειά τους

Η τροχιά που ακολουθεί η μπάλα σε κάθε χτύπημα εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από τα αεροδυναμικά της χαρακτηριστικά. Το κάθε σουτ μπορεί να παρεκκλίνει από την αναμενόμενη πορεία σε μια μη προβλεπόμενη πλευρική μετατόπιση. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται knuckle effect και το συναντάμε σε πολλά αθλήματα όπως το basket, το golf, το tennis, το volleyball κ.α. Στα περισσότερα από αυτά τα αθλήματα η πλευρική μετατόπιση δημιουργείται από την περιστροφή της μπάλας κατά άξονα κάθετο προς τη πορεία της μπάλας. Ως εκ τούτου, οι αεροδυναμικές ιδιότητες μιας μπάλας ποδοσφαίρου μπορούν να θεωρηθούν θεμελιώδεις για την κατανόηση της τροχιάς πτήσης που ακολουθεί μια μπάλα ποδοσφαίρου

Παρά το γεγονός ότι, η μπάλα ποδοσφαίρου μεταξύ των υπολοίπων σφαιρικών μπαλών άλλων αθλημάτων έχει την καλύτερη ισορροπία, με το πέρασμα των χρόνων ο σχεδιασμός τους, έχει υποβληθεί σε μια σειρά τεχνολογικών αλλαγών με σκοπό το σχήμα τους να γίνει όσο το δυνατόν πιο σφαιρικό αξιοποιώντας τις νέες διεργασίες σχεδιασμού και κατασκευής.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει για την μελέτη της αεροδυναμικής των συμβατικών μπαλών με τα 32 πάνελ. Υπάρχουν όμως και μερικές μελέτες για μπάλες με 14 αλλά και με 8 πάνελ. Οι μελέτες αυτές αποδεικνύουν ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ανεξέλεγκτη πορεία τους.

2.2.1 Πείραμα alam et al.

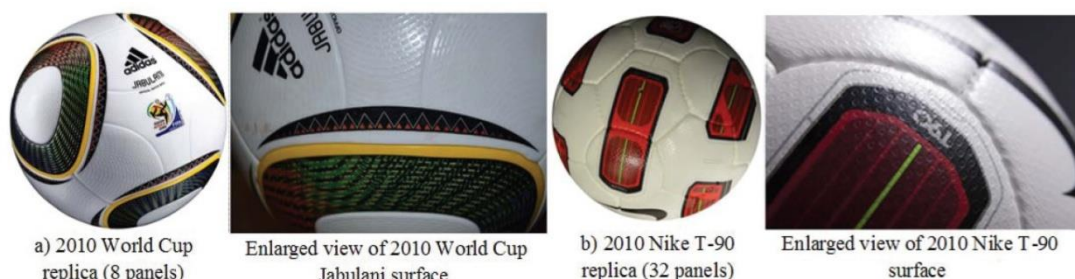
Το 2012 οι alam et al. διεξήγαγαν το παρακάτω πείραμα ανάμεσα σε 6 διαφορετικές μπάλες ποδοσφαίρου για να μελετήσει τις διαφορές τις αεροδυναμικής τους αντίστασης βάση των επιφανειών τους. Οι μπάλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής: α) 18 πάνελ vintage 1966 world cup, β) Feronova 32 πάνελ 2002 world cup, γ) teamgeist2 14 πάνελ 2006 world cup, δ) teamgeist3 14 πάνελ confederation cup 2009 ε) jabulani 8 πάνελ 2010 world cup στ) nike t-90 2010.



Εικόνα 2.4 a) Vintage και b) Feronova



Εικόνα 2.5 a) Teamgeist II και b) Teamgeist III

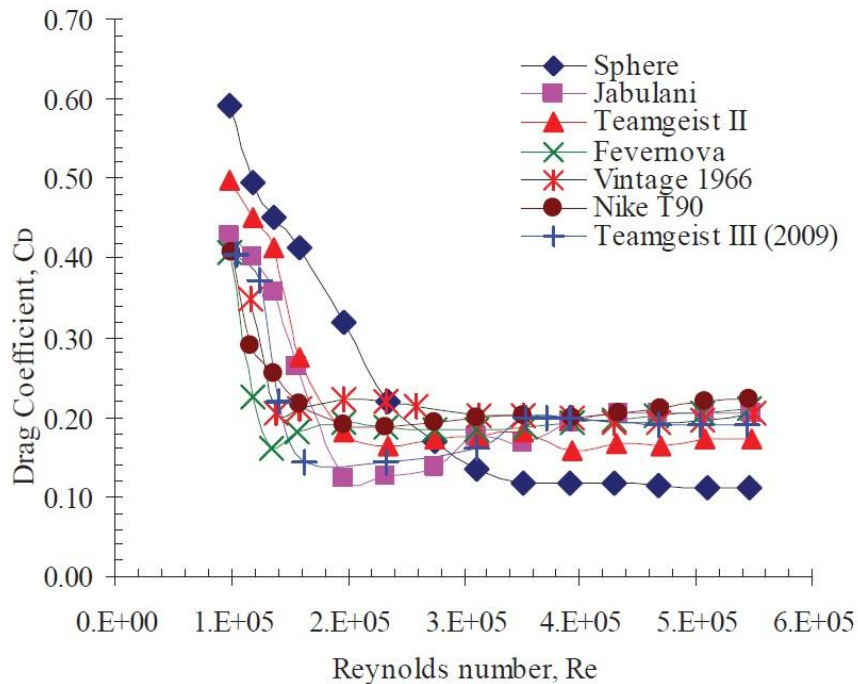


Εικόνα 2.6 a) Jabulani και b) Nike T-90

Το πείραμα έγινε στο RMIT Industrial Wind Tunnel. Το τούνελ αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα επιστροφής αέρα με μέγιστη ταχύτητα τα 150km/h. Δύο πείροι στερέωσης (τσιμπήματα) κρατούν τις μπάλες με έξι αισθητήρες δύναμης (τύπου JR - 3

) στην αεροδυναμική σήραγγα που έχουν κατασκευαστεί ώστε το λογισμικό του υπολογιστή λαμβάνει τα δεδομένα για την ψηφιοποίηση και καταγραφή όλων των δυνάμεων ταυτόχρονα.

Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 2.7 Διάγραμμα Cd-Reynolds

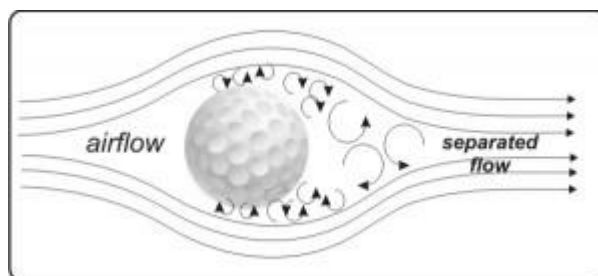
Τα μειωμένα μήκη ραφής και η αύξηση ομαλότητας της επιφάνειας μειώνει τον συντελεστή οπισθέλκουσας σε υψηλούς αριθμούς Reynolds (υψηλές ταχύτητες). Στις υψηλότερες ταχύτητες, η Teamgeist II διατηρεί ένα χαμηλότερο συντελεστή οπισθέλκουσας από την Jabulani, καθώς διαθέτει λιγότερες διαταραχές επιφάνειας. Αν και η μεταβατική ροή εμφανίστηκε στην ίδια ταχύτητα για την Fevernova και τη Vintage, η Fevernova παρουσίασε ένα πολύ χαμηλότερο συντελεστή οπισθέλκουσας στη μεταβατική και σε όλα τα πρώτα στάδια της τυρβώδους ροής. Η αεροδυναμική συμπεριφορά της μπάλας Teamgeist III είναι ανάμεσα στη μπάλα Fevernova και τη μπάλα Jabulani. Η προσθήκη της επιφανειακής τραχύτητας στη Nike T90 έχει προκαλέσει τη νωρίτερη εμφάνιση της μετάβασης με τυρβώδη συντελεστή οπισθέλκουσας - η οποία είναι ανάλογη με την ταχύτητα και την τροχιά της μπάλας, και δεν διαφέρει από τις άλλες μπάλες. Η Vintage μπάλα εκτελεί αρκετά καλά λαμβάνοντας υπόψη το ποσό της επιφάνειας διαταραχής και τις διακυμάνσεις υψής της επιφάνειας

Ωστόσο, η παρουσία κορδονιών θα συμβάλει σε πιθανές πλευρικές δυνάμεις. Σε μία μακρινή πάσα, η Teamgeist II εμφανίζει μικρότερη οπισθέλκουσα δύναμη σε σύγκριση με άλλες μπάλες που δοκιμάστηκαν. Ωστόσο, η Fenerghona και η t90 θα παρέχουν αεροδυναμικά πλεονέκτημα στις κοντινές πάσες.

2.2.2 Golf Ball

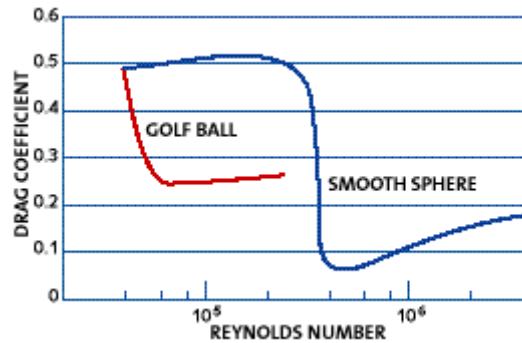
Η σύγχρονη εκδοχή του γκολφ προέρχεται από τη Σκωτία κατά τη διάρκεια του 15ου αιώνα. Οι πρώτες μπάλες του γκολφ ήταν φτιαγμένες από ξύλο, ενώ οι επόμενες κατασκευάζονταν από σφικτά συσκευασμένα φτερά. Το 1848 ο Rev Adam Paterson παρουσίασε μια νέα μπάλα φτιαγμένη από καουτσούκ. Τα πειράματα συνεχίστηκαν και το 1905 κατασκευάστηκε η πρώτη μπάλα με λακκάκια.

Η μπάλα του γκολφ αποτελείται από δεκάδες μικρά λακκάκια στην επιφάνειά της. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγαλύτερης επιφανειακής τριβής όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 2.8 Ροή μπάλας του γκολφ

Παρόλαυτα στο πίσω μέρος της μπάλας συμβαίνει κάτι πολύ ενδιαφέρον. Αρχικά τα λακκάκια στην επιφάνεια της μπάλας μετατρέπουν το οριακό στρώμα στην αναντή πλευρά της μπάλας από στρωτό σε τυρβώδες. Το τυρβώδες οριακό στρώμα είναι ικανό να παραμείνει προσκολλημένο στην επιφάνεια της μπάλας για μεγαλύτερη διάρκεια από ένα στρωτό οριακό. Έτσι δημιουργείται στο πίσω μέρος της μπάλας ένα στενότερο και με χαμηλότερη πίεση κύμα που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της δύναμης της αντίστασης.



Εικόνα 2.9 Διάγραμμα Cd-Reynolds

2.3 Παρουσίαση σχετικών εργασιών

Η αεροδυναμική διαδραματίζει εξέχοντα ρόλο στον καθορισμό της τροχιάς πτήσης όλων των αθλητικών σφαιρών με μεγάλη ταχύτητα. Ανάλογα με την αεροδυναμική συμπεριφορά, η μπάλα μπορεί να παρεκκλίνει από την αναμενόμενη πορεία πτήσης της με σημαντική επιρροή σε μια καμπύλη και απρόβλεπτη τροχιά πτήσης. Η πλευρική παραμόρφωση κατά την πτήση αναγνωρίζονται στο κρίκετ, μπίτζμπολ, γκολφ, τένις, βόλεϊ και ποδόσφαιρο. Στα περισσότερα από αυτά τα σπορ, η πλευρική εκτροπή παράγεται με την μπάλα να γυρίζει γύρω από έναν άξονα κάθετο προς τη γραμμή πτήσης. Ως εκ τούτου, οι αεροδυναμικές ιδιότητες της μπάλας είναι θεμελιώδους σημασίας για τους παίκτες, προπονητές (εκπαιδευτές) κατασκευαστές και ακόμη και τους θεατές. Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι το παιχνίδι του ποδοσφαίρου είναι το πιο δημοφιλές στον κόσμο .

Παρά το γεγονός ότι, το ποδόσφαιρο ανάμεσα σε όλες τις αθλητικές μπάλες έχει παραδοσιακά καλύτερες αεροδυναμικές ιδιότητες και ισορροπία, όμως, όλα αυτά τα χρόνια, ο σχεδιασμός του ποδοσφαίρου έχει υποβληθεί σε μια σειρά από τεχνολογικές αλλαγές, με τις οποίες η μπάλα γίνεται πιο ακριβής και αποδοτική αεροδυναμικά μέσω της αξιοποίησης νέων σχεδιασμών και διαδικασιών παραγωγής. Η Adidas έχει εφαρμοστεί η θερμική συγκόλληση για να αντικαταστήσει τις συμβατικές ραφές και έχει δημιουργήσει μία μπάλα με 14 κυρτά πάνελ αντί για 32 πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν στην μπάλα από το 1970. Προβάλλεται ο

ισχυρισμός ότι η μπάλα είναι πιο σφαιρική και εκτελεί την πτήση πιο ομοιόμορφα. Ωστόσο, καμία ανεξάρτητη μελέτη δεν έχει αναφερθεί στην υποστήριξη της δήλωσης αυτής. Αν και οι αεροδυναμικές συμπεριφορές των σφαιρών άλλων αθλημάτων έχουν μελετηθεί όπως αναφέρθηκε παραπάνω λιγοστές πληροφορίες είναι διαθέσιμες στο κοινό για την αεροδυναμική συμπεριφορά των νέων σφαιρών ποδοσφαίρου, εκτός από τις εμπειρικές μελέτες από τους Asai Barber et al. Ως εκ τούτου, ο πρωταρχικός στόχος του πειράματος των Alam et al. (2010) είναι να μελετηθούν οι αεροδυναμικές ιδιότητες της νέας μπάλας 14 πάνελ σε σχέση με την κλασσική μπάλα των 32 πάνελ.

2.3.1 Περιγραφή μπαλών (Πείραμα Alam et. al.)

Δυο καινούριες μπάλες επιλέχθηκαν για να υλοποιηθεί το συγκεκριμένο πείραμα. Η μια είναι κατασκευασμένη από την Nike και αποτελείται από 32 δερμάτινα πάνελ, ενώ η δεύτερη έχει κατασκευαστεί από την adidas με την διαδικασία της θερμικής συγκόλλησης 14 συνθετικών πάνελ. Η διάμετρος και των δυο φτάνει τα 220mm ενώ η περιφέρειά τους είναι ανάμεσα στις 27 με 28 ίντσες. Η μέθοδος της θερμικής συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για την μπάλα με τα 14 πάνελ δεν αφήνει ραφές ή αυλάκια ανάμεσα στις κολλήσεις και το αποτέλεσμα είναι μια πιο σφαιρική μπάλα. Για να μείνουν σταθερές οι μπάλες κατά την διάρκεια του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένα κοντάρι το οποίο κρατά την μπάλα σε απόσταση 420mm από το έδαφος. Η αεροδυναμική επίπτωση αυτού μετρήθηκε και αποδείχθηκε αμελητέα για το πείραμα..

2.3.2 Στήσιμο πειράματος

Για τις μετρήσεις των αεροδυναμικών ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκε το RMIT Industrial Wind Tunnel. Το τούνελ αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα επιστροφής αέρα με μέγιστη ταχύτητα τα 150km/h. Δύο πείροι στερέωσης (τσιμπήματα) κρατούν τις μπάλες με έξι αισθητήρες δύναμης (τύπου JR - 3) στην αεροδυναμική σήραγγα που έχουν κατασκευαστεί ώστε το λογισμικό του υπολογιστή λαμβάνει τα δεδομένα για την ψηφιοποίηση και καταγραφή όλων των δυνάμεων ταυτόχρονα. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο μπάλες στην αεροδυναμική σήραγγα.



(a) 32-panel football



(b) 14-panel football

Εικόνα 2.10 RMIT Industrial Wind Tunnel

Οι τρεις δυνάμεις μετρήθηκαν ταυτόχρονα σε ένα εύρος ταχυτήτων (20 km / h έως 130 km / h σε μια αύξηση 20 km / ώρα). Οι αεροδυναμικές δυνάμεις ορίζονται ως οπισθέλκουσα (D) που ενεργεί προς την αντίθετη κατεύθυνση προς τον άνεμο , ανύψωση (L) που ενεργεί κάθετα προς την κατεύθυνση του ανέμου , και η πλευρική δύναμη που ενεργεί (S) που ενεργεί πλαγίως σε μια μετωπική όψη. Οι μετρηθείς αεροδυναμικές δυνάμεις μετατράπηκαν σε αδιάστατους συντελεστές (CD), (CL) και (CS), χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο τύπο όπως ορίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$C_S = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

2.3.3 Αποτελέσματα

Οπτικοποίηση της ροής

Για να γίνει κατανοητή η ροή γύρω από τις μπάλες, χρησιμοποιήθηκε καπνός.



(a) Airflow around the 32-panels football



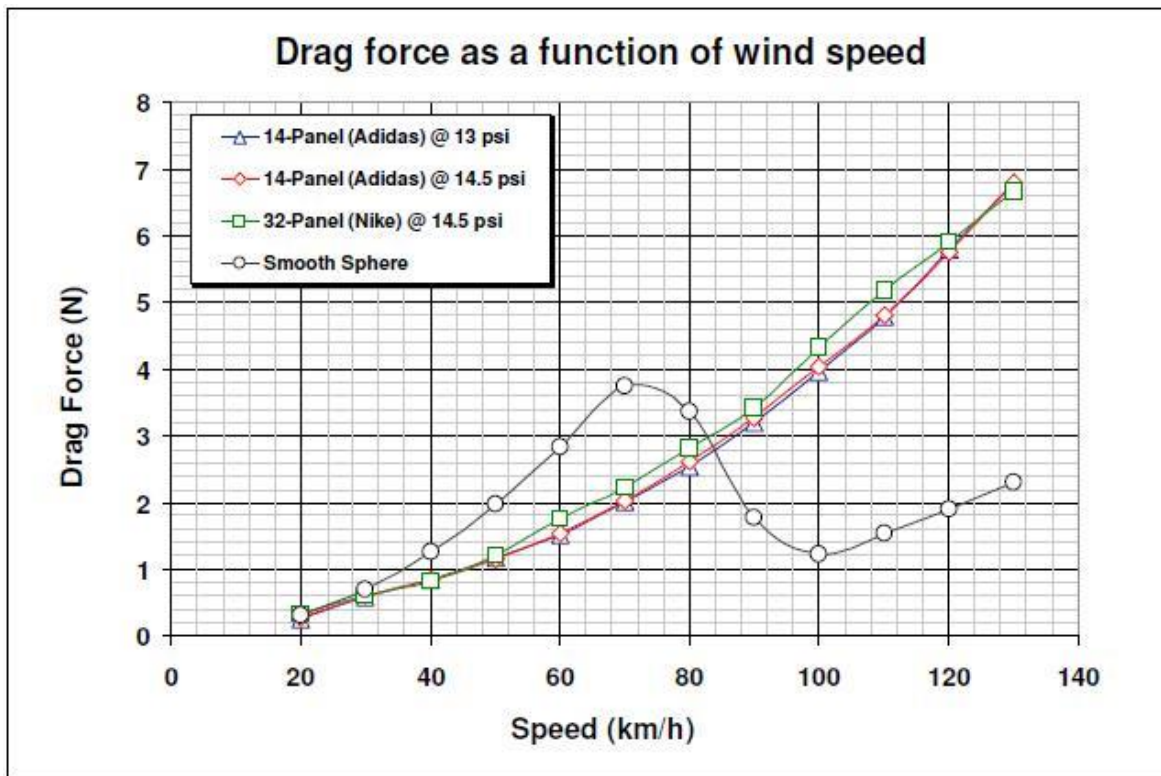
(b) Airflow around the 14-panels football

Εικόνα 2.11 Οπτικοποίηση της ροής με καπνό

Εξαιτίας της τραχύτητας που έχει η πρώτη μπάλα λόγω των ραφών, η ροή του αέρα γύρω από την μπάλα μετατρέπεται σε τυρβώδη και μεταγενέστερα δημιουργεί αργοπορημένη αποκόλληση. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η ροή αποκολλάται στις 100 μοίρες από τον οριζόντιο άξονα ενώ γενικά ο αέρας αποκολλάται στις 90 μοίρες για μια λεία σφαίρα. Η δεύτερη μπάλα είναι πιο κοντά σε σχήμα με μία λεία σφαίρα για αυτό όπως φαίνεται και στην εικόνα η αποκόλληση της ροής γίνεται στις 90 περίπου μοίρες.

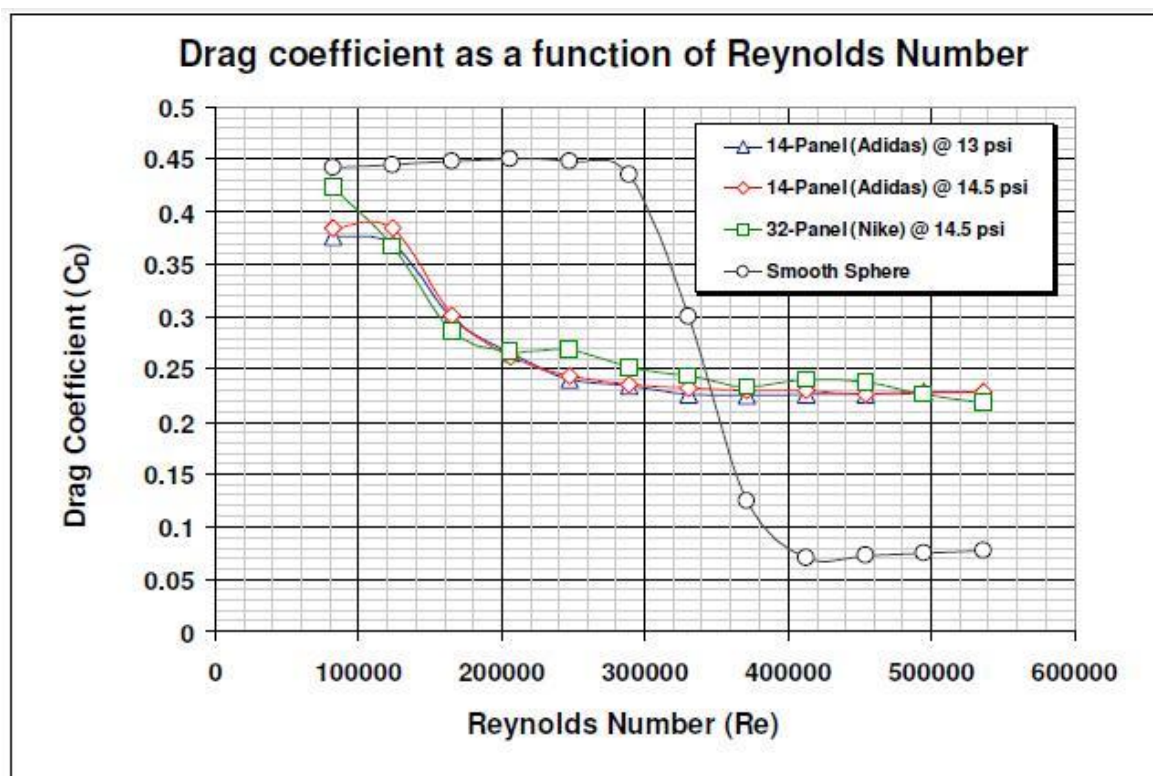
Αεροδυναμική αντίσταση

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται η αεροδυναμική αντίσταση της πρώτης μπάλας (32 panel Nike ball) κάτω από πίεση 14.5 psi, της δεύτερης μπάλας (14 panel adidas ball) κάτω από δύο διαφορετικές πιέσεις 13 psi και 14.5 psi καθώς και μιας σφαίρας ίδιων διαστάσεων σε ένα πεδίο αριθμών Reynolds που αλλάζει ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Οι δυο διαφορετικές πιέσεις επιλέχθηκαν για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν διαφορές στις αεροδυναμικές ιδιότητες λόγω της πίεσης ελαστικότητας. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα δεν υπάρχουν αξιολογήσιμες διαφορές ανάμεσα στις δυο πιέσεις της adidas. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι η μεγαλύτερη αεροδυναμική αντίσταση που έχει η μπάλα της nike μεταξύ 60 km μέχρι 120 km. Η αεροδυναμική αντίσταση της σφαίρας είναι εμφανές ότι διαφέρει από τις υπόλοιπες, όπως επίσης και ότι έχει υποστεί μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Οι μπάλες αντίθετα δεν έχουν υποστεί καμία μετάβαση καθώς από την αρχή η ροή στις μπάλες είναι απευθείας τυρβώδης λόγω του επιφανειακού μοτίβου της.



Εικόνα 2.12 Διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας

Στο διάγραμμα 34 απεικονίζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας των μπαλών και της σφαίρας συναρτήσει του αριθμού Reynolds. Ο μέσος όρος και για τις δυο μπάλες μετά τα 60 km/h είναι κοντά στο 0,23. Η μετάβασή τους από στρωτή σε τυρβώδη ροή είναι μεταξύ $1,1 \times 10^5$ και 3×10^5 του αριθμού Reynolds. Αντιθέτως το πεδίο τιμών που γίνεται η μετάβαση της ροής της σφαίρας από στρωτή σε τυρβώδη είναι $2,9 \times 10^5$ με $4,6 \times 10^5$ του αριθμού Reynolds.



Εικόνα 2.13 Διάγραμμα C_D -Reynolds

2.3.4 Συμπεράσματα

Η τιμή του συντελεστή οπισθέλκουσας C_D εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τραχύτητα της εξωτερικής επιφάνειας και των ραφών της μπάλας. Οι συνθήκες αυτές μπορούν να προκαλέσουν πρόσθετη αντίσταση λόγω του διαχωρισμού οριακού στρώματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τιμή του C_D για τη μπάλα ποδοσφαίρου είναι ανάμεσα στις αντίστοιχες τιμές μιας σφαίρας και μιας μπάλας του γκολφ. Δεδομένου ότι οι ταχύτητες του ποδοσφαίρου είναι γενικά στην περιοχή από 90 km / h έως 130 χλμ/ώρα κατά ένα ελεύθερο χτύπημα ή ένα μακρινό σουτ, η τιμή C_D για μπάλες 32 ή 14 πάνελ αναμένεται να είναι η ίδια. Ωστόσο, η τιμή C_D μπορεί να είναι στην μεταβατική ζώνη για μία αδύναμη πάσα.

Επομένως:

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας μιας μη περιστρεφόμενης μπάλας είναι περίπου 0.4 στις χαμηλές ταχύτητες (κάτω από 30km/h) και 0.23 για ταχύτητες πάνω από 60km/h

Η μπάλα με τα 32 πάνελ δέχεται ελάχιστα μεγαλύτερη την δύναμη της αντίστασης από την μπάλα με τα 14 πάνελ.

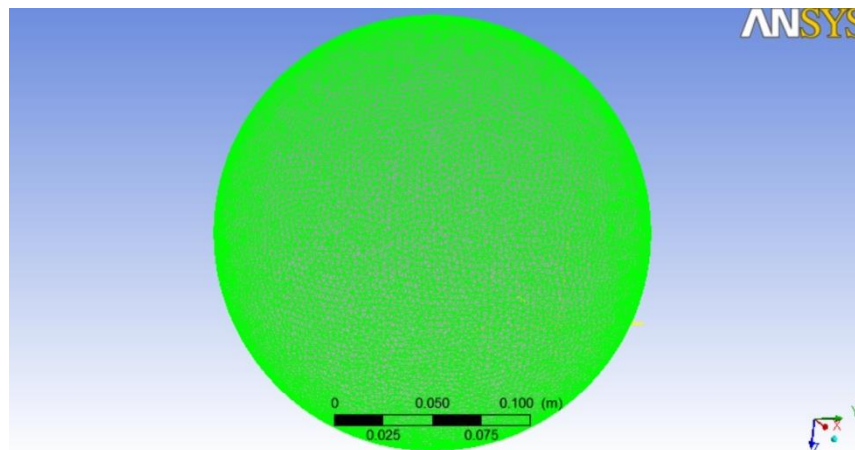
Η διαφορά του συντελεστή οπισθέλκουσας της μπάλας με τα 32 πάνελ σε σχέση με αυτήν με τα 14, οφείλεται στο λιγότερο σφαιρικό της σχήμα εξ αιτίας των περισσότερων ραφών που έχει.

Μια μικρή διαφορά της συνιστώμενης πίεσης στην μπάλα έχει ανεπαίσθητη διαφορά στις αεροδυναμικές ιδιότητες της μπάλας.

Κεφάλαιο 3: Υπολογιστική μοντελοποίηση

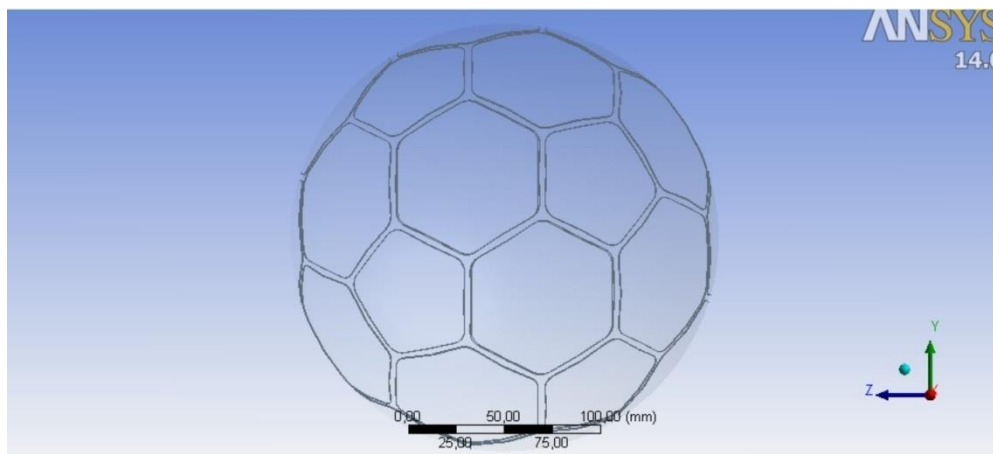
3.1 Επιλογή μπαλών και σχεδίαση

Οι μπάλες που χρησιμοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο πείραμα είναι εγκεκριμένες από την FIFA (Διεθνής Ποδοσφαιρική Ομοσπονδία). Κατασκευαστές τους είναι δυο από τις μεγαλύτερες εμπορικές εταιρίες αθλητικής ένδυσης στον κόσμο η nike και η adidas. Το σφαιρικό μοντέλο που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στις διαστάσεις των υπόλοιπων μπαλών. Η μπάλα της nike χρησιμοποιήθηκε δυο φορές με διαφορετικό βάθος ραφής για εμβάθυνση του πειράματος.



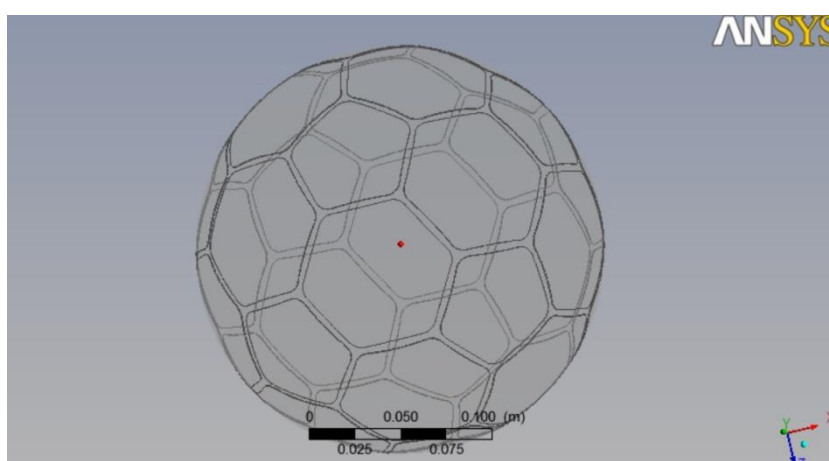
Εικόνα 3.1 Σφαιρικό μοντέλο

Το σφαιρικό μοντέλο αποτελείται από λεία επιφάνεια και έχει ακτίνα $r=0.1112\text{m}$ που είναι ίση με τις ακτίνες των υπόλοιπων μοντέλων.



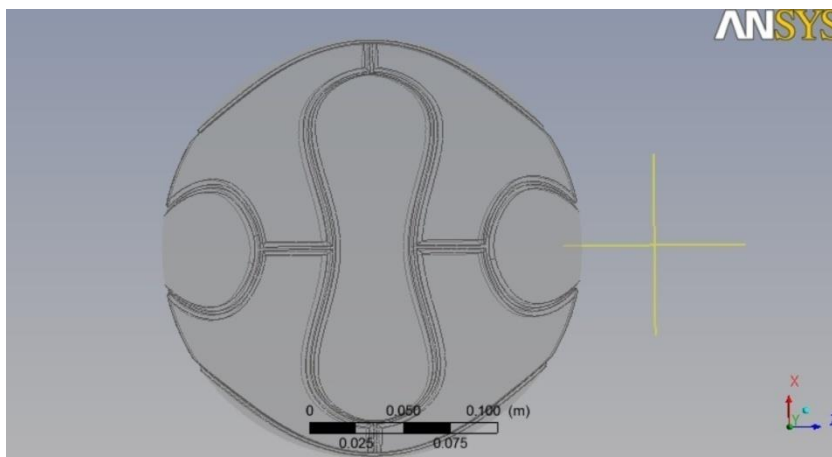
Εικόνα 3.2 Μοντέλο nike με βάθος ραφής 0,0025m

Το συγκεκριμένο μοντέλο, αποτελείται από 32 πολύγωνα των οποίων όλες οι πλευρές είναι ίσες και αντίστοιχες με 0.04m. Τα πολύγωνα είναι χωρισμένα σε 20 εξάγωνα και 12 πεντάγωνα και ενώνονται μεταξύ τους με ραφές. Οι ραφές έχουν σχεδιαστεί με την μορφή αυλακιού βάθους 0.0025m και πλάτους 0.,,004m. Ακτίνα του μοντέλου είναι και εδώ $r=0.1112m$ ενώ τα σημεία που ενώνουν τρία διαφορετικά πάνελ φτάνουν τα 60.



Εικόνα 3.3 Μοντέλο nike με βάθος ραφής 0,0025m

Το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιο με το προηγούμενο με μόνη διαφορά το βάθος της ραφής που είναι 0.0005



Εικόνα 3.4 Μοντέλο adidas

	FIFA Approved standard^[2]	Teamgeist measurements^[2]
Circumference	68.5 – 69.5 cm	69.0 – 69.25 cm
Diameter	≤ 1.5% difference	≤ 1.0% difference
Water absorption	≤ 10% weight increase	≤ 0.1% weight increase
Weight	420 - 445 g	441 - 444 g
Shape and size retention	2000 cycles at 50 km·h ⁻¹	3500 cycles at 50 km·h ⁻¹
Rebound test	≤ 10 cm	≤ 2 cm
Loss of pressure	≤ 20%	≤ 11%

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά μπάλας adidas

Η teamgeist ήταν η πρώτη μπάλα που φτιάχτηκε με 14 panels έναντι των 32 που ήταν μέχρι τότε. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθούν τα σημεία που ενώνουν τρία διαφορετικά panels κατά 60% από (60 σε 24) όπως επίσης και το μήκος των ραφών από 400.5cm σε 339.3cm. Τα σχήματα των πάνελ είναι δύο ειδών 6 και 8 και είναι σαφώς μεγαλύτερα σε σχέση με τις προηγούμενες μπάλες. Το βάθος της ραφής είναι και εδώ 0.0025m ενώ το πλάτος 0.04m.

3.2 Ανάπτυξη μοντέλου CFD

Για την ανάπτυξη του μοντέλου CFD ακολουθήθηκαν τρία βήματα. Τα βήματα ήταν τα εξής:

- 1) Δημιουργία της γεωμετρίας
- 2) Κατασκευή του πλέγματος(mesh)
- 3) Ορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών

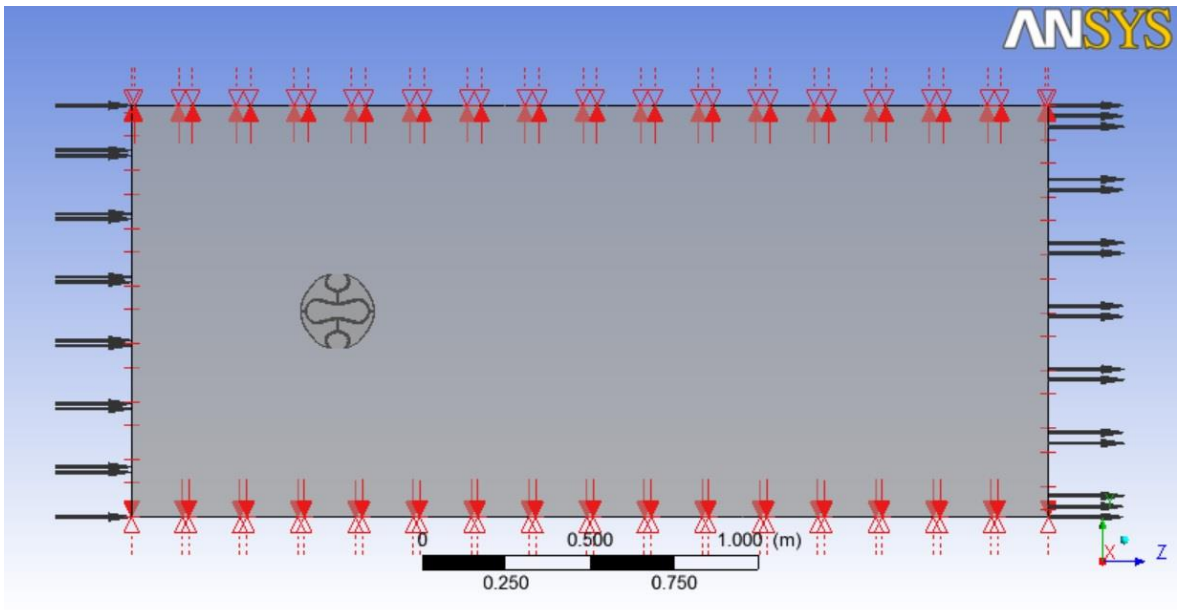
3.2.1 Δημιουργία της γεωμετρίας

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία (keypoints), γραμμές (lines), επιφάνειες (areas) και τέλος όγκοι (volumes). Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πολύ εύχρηστο σε περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α.

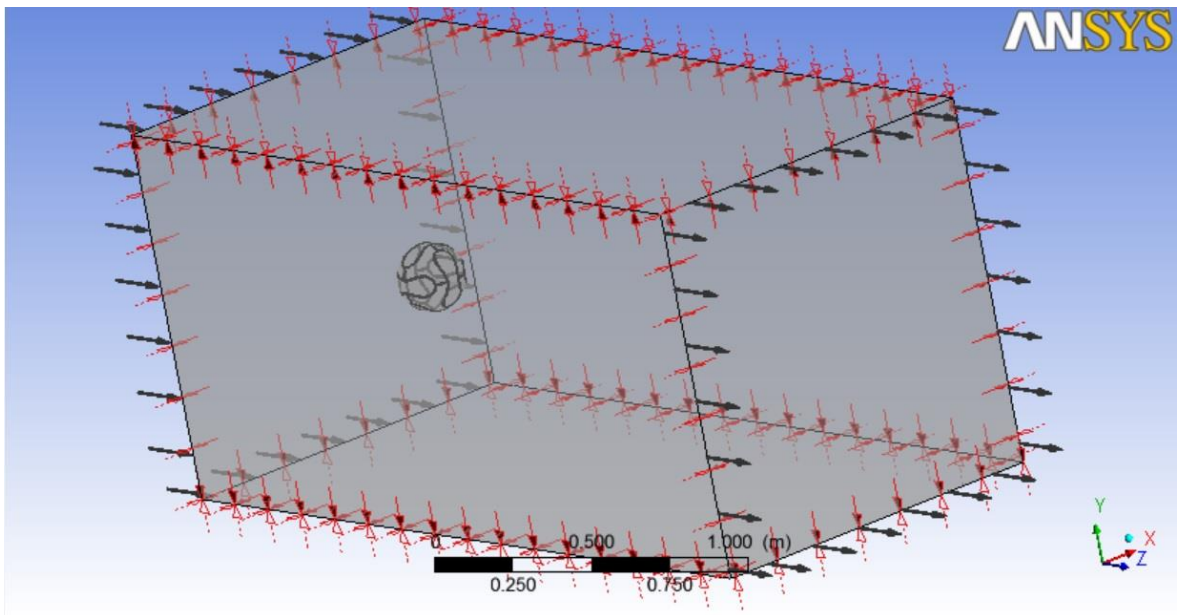
Στην περίπτωση που η γεωμετρία δημιουργηθεί σε άλλο σχεδιαστικό περιβάλλον η εισαγωγή της ANSYS γίνεται με τη μορφή αρχείου *.igs. Τέλος η κατασκευή της γεωμετρίας μπορεί να γίνει στον προεπεξεργαστή κάποιου άλλου προγράμματος που δίνει αρχείο εισόδου για περιβάλλον Ansys. Το αρχείο αυτό ονομάζεται ουδέτερο αρχείο. Η επιλογή της κατασκευής της γεωμετρίας σε άλλο περιβάλλον μπορεί να είναι πολύ ελκυστική, αλλά πρέπει να υπάρχει ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή της παραμέτρου της ανοχής (tolerance), όταν πρόκειται για *.igs, , διαφορετικά πρέπει να γίνεται επιδιόρθωση της γεωμετρίας. Ένα συνηθισμένο πρόβλημα από την εισαγωγή γεωμετρίας στο ANSYS από εξωτερικό πρόγραμμα είναι ότι το μοντέλο μπορεί να εμφανίζει το φαινόμενο ύπαρξης διπλών γραμμών ή σημείων. Τότε πρέπει να γίνει συγχώνευση αυτών με την εντολή merge. Τέλος μπορεί παρότι στο ουδέτερο αρχείο η γεωμετρία είναι με τη μορφή όγκου, όταν γίνει εισαγωγή να μην είναι σωστή ή να λείπουν επιφάνειες, τότε πρέπει να γίνει επιδιόρθωση.

Στην παρούσα εργασία οι γεωμετρίες των αντικειμένων προυπήρχαν, και ήταν διαθέσιμες στο εργαστήριο.

Εκτός της γεωμετρίας της κάθε μπάλας απαραίτητο ήταν και η δημιουργία μιας αεροσύραγγας μέσα στην οποία τοποθετείται το εξεταζόμενο αντικείμενο. Για την δημιουργία της γεωμετρίας αυτής χρησιμοποιήθηκε το Design Modeler του πακέτου Ansys. Το Design Modeler παρέχει δυνατότητα εισαγωγής γεωμετριών από άλλα προγράμματα CAD, όπως το Solidworks. Αφού έγινε η εισαγωγή της γεωμετρίας της κάθε μπάλας, έπειτα σχεδιάστηκε η αεροσύραγγα. Οι διαστάσεις της αεροσύραγγας ήταν συγκεκριμένες. Το μήκος της είναι 2,72116m ενώ το ύψος και το πλάτος 1,2195m.



Εικόνα 3.5 Αεροσύραγμα



Εικόνα 3.6 Αεροσύραγμα

3.2.2 Κατασκευή του πλέγματος

Δημιουργία του πλέγματος, είναι ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε μικρότερα μη επικαλυπτόμενα τμήματα που λέγονται κελιά ή όγκοι ελέγχου. Τα κελιά ενός πλέγματος, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους, όταν μιλάμε για τρισδιάστατη γεωμετρία μπορεί να είναι πολυεδρικά, εξαεδρικά, τετραεδρικά ή και ένας συνδυασμός αυτών. Είναι δυνατόν να γίνει τοπική πύκνωση ή αραιώση του πλέγματος προκειμένου να υπολογιστούν αναλυτικότερα κάποιες περιοχές (όπως το οριακό στρώμα και οι συναρτήσεις τοιχώματος σε τυρβώδεις ροές). Επίσης μπορούν να εισαχθούν και να συνδυαστούν διαφορετικές γεωμετρίες με διαφορετική πύκνωση πλέγματος για να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα με μικρότερη χρήση υπολογιστικής ισχύος, κάτι που εφαρμόστηκε και στην παρούσα εργασία.

Η εισαγωγή της γεωμετρίας από το Design Modeler στο Ansys Meshing γίνεται αυτόματα μέσω του Ansys Workbench. Αρχικά ορίζεται ως μέθοδος δημιουργίας πλέγματος (Mesh Method) η επιλογή CFX-Mesh Method. Η μέθοδος αυτή παράγει πλέγματα υψηλής ποιότητας τα οποία χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD). Παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των φαινομένων που λαμβάνουν μέρος στο ρευστό. Δημιουργεί στοιχεία τετραεδρικού, εξαεδρικού αλλά και σφηνοειδούς σχήματος. Επιπλέον τεχνικές της μεθόδου CFX είναι οι patch conforming και patch independent.

Για την κατασκευή του πλέγματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Patch conforming. Είναι μια τεχνική η οποία είναι ανεκτική σε επιφάνειες με λεπτά χαρακτηριστικά. Έχει τη δυνατότητα να ξεπερνά δυσκολίες στις επιφάνειες αυτές καθώς και σε επιφάνειες χαμηλής ποιότητας (dirty geometries). Η δημιουργία του πλέγματος γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα, ενώ παράλληλα επιτρέπει επιπλέον τοπικές επεμβάσεις στο πλέγμα, όπως Mapped face Meshing, Refinement και Inflation, επιλογές οι οποίες προσφέρουν τοπική πύκνωση, βελτίωση αλλά και δημιουργία στρωμάτων στα τοιχώματα για την καλύτερη απόδοση του οριακού στρώματος και της τύρβης.

Όσον αναφορά τη διαστασιολόγηση των στοιχείων του πλέγματος, αυτή έγινε αυτόματα από το πρόγραμμα. Ωστόσο επιλέχθηκε η λειτουργία της διαστασιολόγησης να είναι εγγύτητας και καμπυλοειδής (Advanced Size Function: Proximity and Curvature), ενώ η συνάφεια να είναι μέτρια (Relevance Center: Medium). Αυτό οδηγεί σε πλέγμα όχι ιδιαίτερα λείο στην επιφάνεια διατηρώντας όμως την καμπυλότητα της μπάλας. Η εξομάλυνση του πλέγματος ορίστηκε να είναι υψηλή (Smoothing: high). Χαμηλή εξομάλυνση δημιουργεί χαμηλής ποιότητας πλέγμα, ενώ η υψηλή εξομάλυνση ένα πλέγμα πολύ καλό ποιοτικά, αυξάνοντας όμως τον συνολικό αριθμό των στοιχείων, απαιτώντας υψηλή υπολογιστική ισχύ.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	5,0 °
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	3,e-004 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	3,e-004 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	0,10 m
<input type="checkbox"/> Max Size	0,70 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,60
Minimum Edge Length	4,9301e-004 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	ball
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-005 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	3
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,7
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled

Εικόνα 3.7 Διαστασιολόγηση πλέγματος σφαίρας

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	2,0 °
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (8,0371e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	0,250 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,20
Minimum Edge Length	1,22240 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Selection
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-005 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	40
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	

Εικόνα 3.8 7 Διαστασιολόγηση πλέγματος μπάλας nike

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity and Curva...
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	5,0 °
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	0,10 m
<input type="checkbox"/> Max Size	0,20 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,40
Minimum Edge Length	2,8526e-003 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Nam...
Named Selection	Selection
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-005 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	8
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,6
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled

Εικόνα 3.9 Διαστασιολόγηση πλέγματος μπάλας nike

Sizing	
Use Advanced Size Fun...	On: Proximity and Curva...
Relevance Center	Medium
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal A...	5,0 °
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (8,0264e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	0,250 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,40
Minimum Edge Length	2,3243e-003 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Nam...
Named Selection	Selection
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	1,e-005 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	15
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,5
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled

Εικόνα 3.10 Διαστασιολόγηση πλέγματος μπάλας adidas

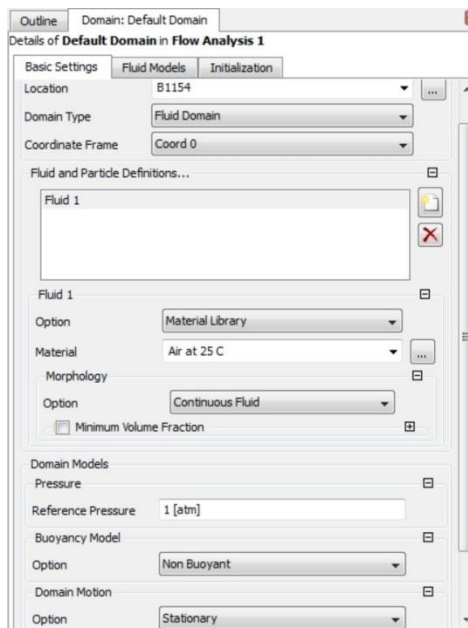
3.2.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες του μοντέλου CFD. Οι συνθήκες αυτές καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη λύση του προβλήματος, καθώς αυτό εξαρτάται άμεσα από αυτές. Πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος, σχετική πίεση, ταχύτητα ανέμου, και αριθμητικό μοντέλο τύρβης είναι κάποιες από τις πολύ βασικές συνθήκες που καθορίζουν ένα μοντέλο CFD.

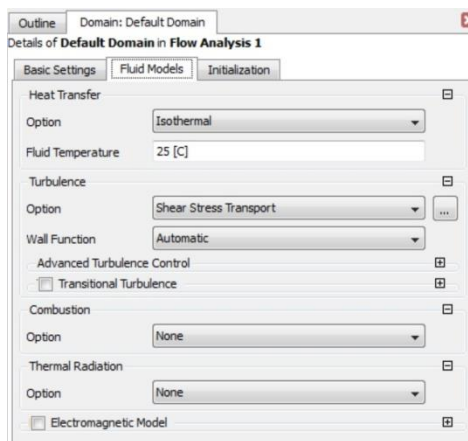
Για το βήμα αυτό χρησιμοποιείται το Pre-Processing πρόγραμμα του πακέτου Ansys, CFX-PRE. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει τη δυνατότητα ορισμού εισαγωγής πολλαπλών πλεγμάτων, καθορισμού φυσικών, χημικών, αρχικών συνθηκών. Επίσης επιλογές ρύθμισης των συνθηκών των “συνόρων” (boundaries), όπως επιφάνειες εισαγωγής-εξαγωγής του ρευστού, “ελεύθερες” επιφάνειες (openings), μεταφορά θερμότητας όπως επίσης δυνατότητα προσομοίωσης μηχανών εσωτερικής καύσης.

Στην παρούσα εργασία, όλα τα μοντέλα (μπάλες και σφαίρα) θεωρείται ότι συνθήκες ροής είναι μόνιμες (steady state).

Πρώτο βήμα στο “στήσιμο” του μοντέλου αποτελεί ο ορισμός των τομέων (domains). Αρχικά ορίστηκε το domain «default domain» και στις τεσσερις περιπτώσεις, το οποίο είναι το σταθερό domain και περιέχει την μπάλα ή την σφαίρα αντίστοιχα. Ο τύπος του τομέα δηλώθηκε ως ρευστό (fluid domain). Το ρευστό στο μοντέλο είναι αέρας στους 25°C, η πίεση αναφοράς 1 [atm] και η μορφολογία του συνεχόμενο ρευστό. Το υπολογιστικό μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το SST για τις τρεις μπάλες καθώς και για τις περιπτώσεις τις σφαίρας που αντιστοιχούν σε μεταβατική ροή. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις της σφαίρας επιλέχθηκε στρωτή ροή.

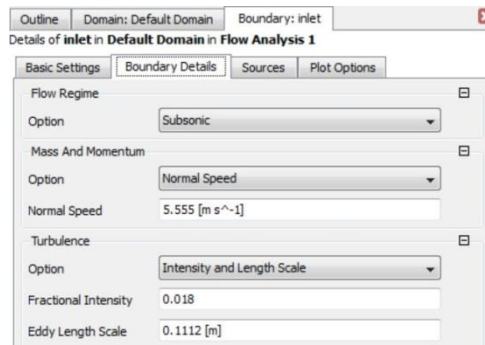


Εικόνα 3.11 domain «default domain»

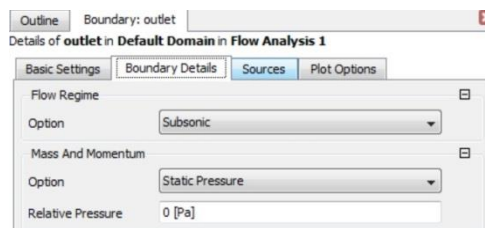


Εικόνα 3.12 11 domain «default domain»

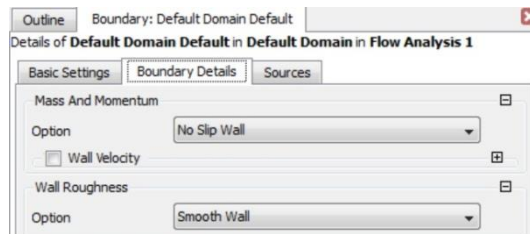
Ακολούθησαν τα σύνορα (boundaries) του domain. Τα boundaries είναι το “inlet” και “outlet”, όπου εισέρχεται και εξέρχεται ο αέρας από την αεροσύραγγα αντίστοιχα, το “default domain default” όπου είναι η μπάλα ή η σφαίρα και το “symmetry”. Ως “Mass and momentum” στο “inlet” επιλέχθηκε η αντίστοιχη ταχύτητα ανέμου για κάθε περίπτωση (20km/h έως 130km/h) και κλασματική ένταση τύρβης 0.018 με κλίμακα μήκους 0.1112m για τις περιπτώσεις με υπολογιστικό μοντέλο τύρβης. Στο “Outlet” επιλέχθηκε στατική πίεση ίση με 0 [Pa]. Το boundary “default domain default” ορίστηκε στο no slip wall, ενώ για τις περιπτώσεις με υπολογιστικό μοντέλο τύρβης ως wall roughness επιλέχθηκε smooth wall.



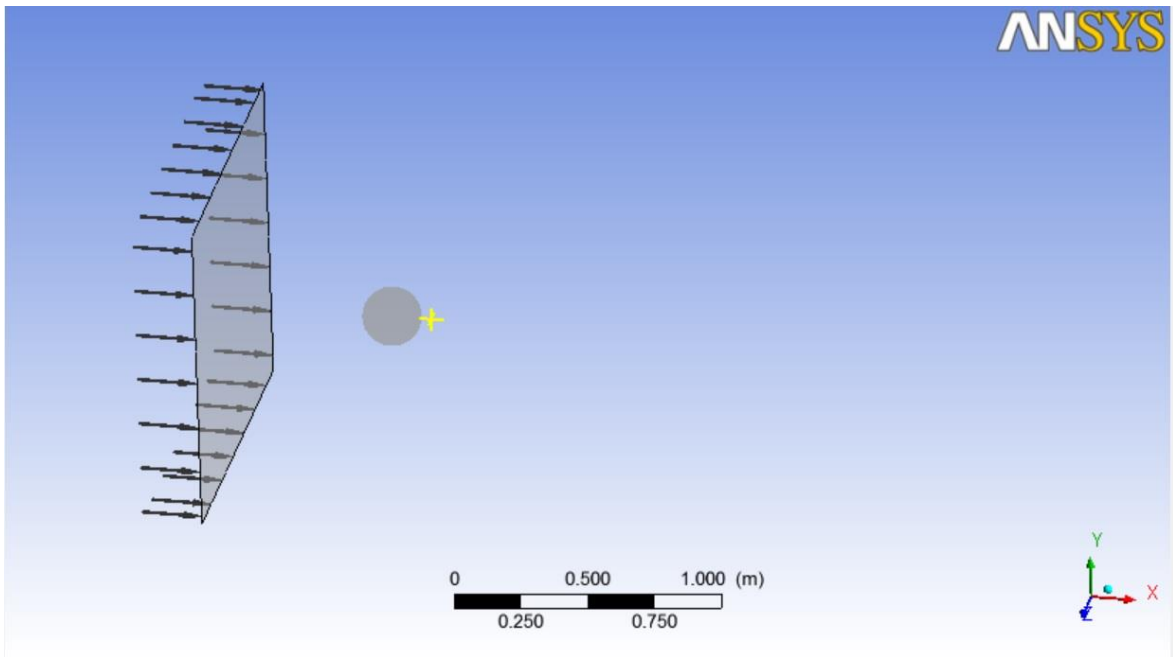
Εικόνα 3.13 Boundary inlet



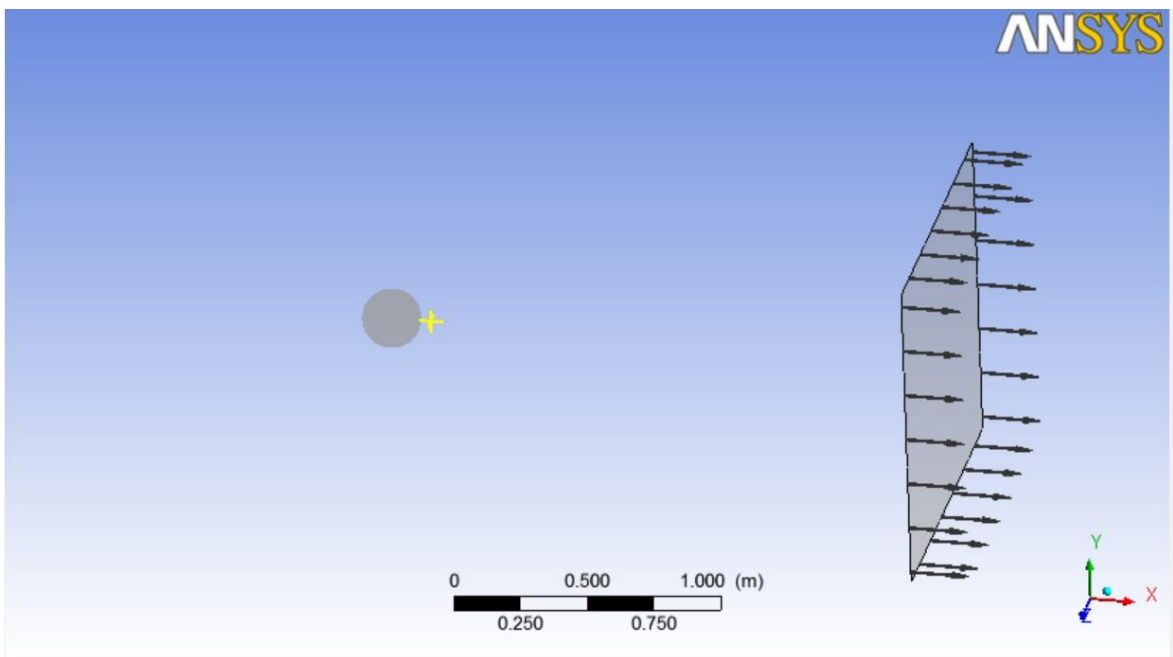
Εικόνα 3.14 Boundary outlet



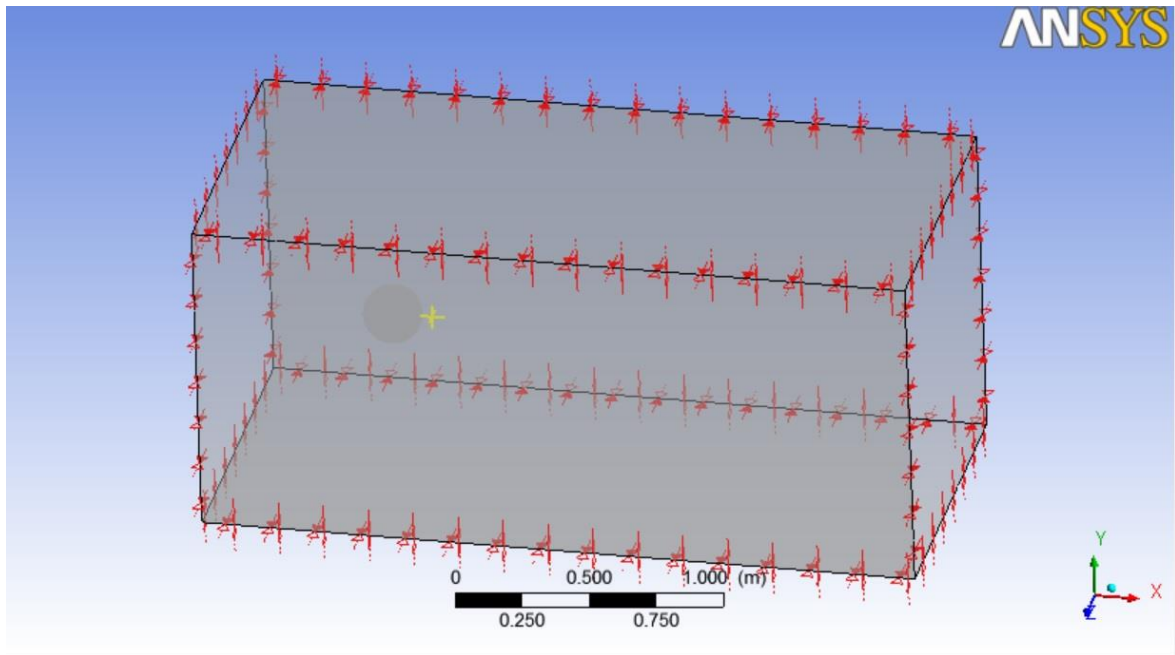
Εικόνα 3.15 Boundary default domain default



Εικόνα 3.16 Είσοδος αεροσύραγγας



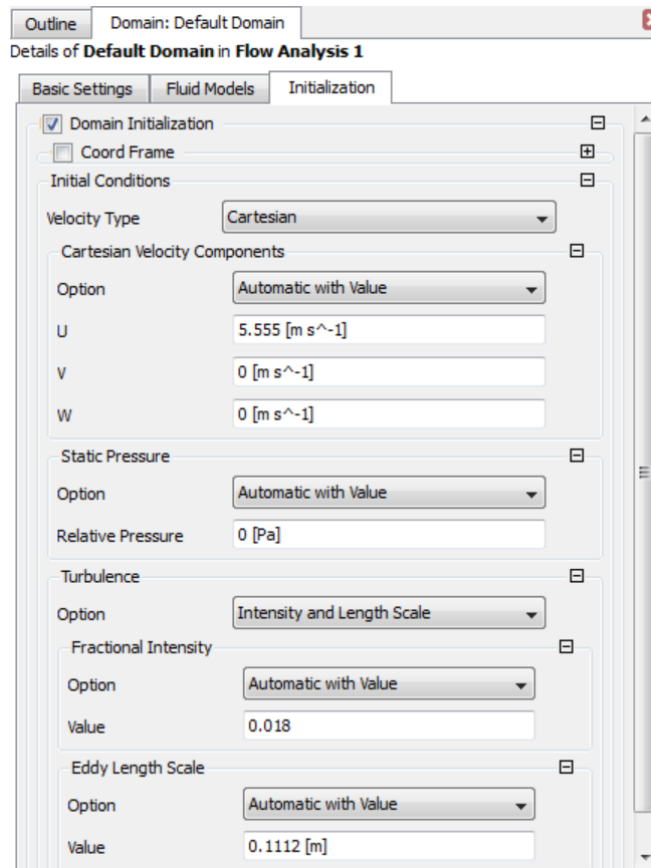
Εικόνα 3.17 Έξοδος αεροσύραγγας



Εικόνα 3.18 Αεροσύραγμα

Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες που οριστήκαν Domain initialization είναι η αντίστοιχη ταχύτητα για κάθε περίπτωση (από 20km/h έως 130km/h) στον άξονα Y, η στατική πίεση ίση με 0 [Pa] και η κλασματική ένταση τύρβης 0.018 με κλίμακα μήκους 0.1112m για τις περιπτώσεις με υπολογιστικό μοντέλο τύρβης.



Εικόνα 3.19 Αρχικές συνθήκες

Τέλος έγιναν οι βασικές ρυθμίσεις στο solver control. Το advection scheme καθώς και το turbulent numeric (στις περιπτώσεις με υπολογιστικό μοντέλο τύρβης) ορίστηκαν σε υψηλή ποιότητα "high resolution".

3.3 Περιγραφή του μοντέλου τύρβης SST

Στην τυρβώδη περιοχή, μία χαοτική και τυχαία κινητική κατάσταση δημιουργείται στην οποία η ταχύτητα και η πίεση αλλάζουν συνεχώς με τον χρόνο σε συγκεκριμένες περιοχές της ροής. Η μελέτη της τύρβης είναι πολύ σημαντική σε αρκετές περιπτώσεις και έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης της στην υπολογιστική ρευστομηχανική. Ακόμα και σε περιπτώσεις ροής όπου οι κύριες ταχύτητες έχουν μόνο μία ή δύο διαστάσεις στο χώρο, οι τυρβώδεις διακυμάνσεις εξελίσσονται πάντα στις τρεις διαστάσεις. Η οπτικοποίηση της τύρβης δείχνει περιστρεφόμενες δομές διαφόρων μεγεθών στη ροή που λέγονται δίνες. Περιοχές του ρευστού που αρχικά έχουν απόσταση μεταξύ τους μπορεί να έρθουν κοντά λόγω των δινών σε τυρβώδεις ροές. Αυτό έχει σαν συνέπεια ανταλλαγή μάζας, θερμότητας και ορμής μεταξύ αυτών των περιοχών. Αυτή η ανάμειξη οδηγεί σε υψηλούς συντελεστές διάχυσης της μάζας, της ορμής και της θερμότητας που έχει ως αποτέλεσμα τις αυξημένες ενεργειακές απώλειες στις τυρβώδεις ροές.

Προκειμένου να μπορέσουν να προσομοιωθούν, σε ένα βαθμό, τα φαινόμενα της τύρβης αναπτύχθηκαν κάποια υπολογιστικά μοντέλα με γνώμονα το μεγάλο εύρος του πεδίου εφαρμογών τους, την απλότητα και την εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης δίνονται στον Πίνακα

Classical models	Based on (time-averaged) Reynolds equations
	1. zero equation model - mixing length model
	2. two-equation model - $k-\epsilon$ model
	3. Reynolds stress equation model
	4. algebraic stress model
Large eddy simulation	Based on space-filtered equations

Πίνακας 3.2

Μοντέλο $k-\omega$ SST

Το μοντέλο $k-\omega$ SST είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα τύρβης. Είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, δηλαδή στις μεταβλητές της ροής προστίθενται άλλες δυο μεταβλητές μέσω των οποίων υπολογίζεται το πεδίο της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t . Το πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι μεταχείριση της τυρβώδους ροής για υπολογισμούς με χαμηλούς αριθμούς Reynolds και ροές κοντά σε τείχη. Η μεταβλητή k υποδηλώνει την τυρβώδη κινητική ενέργεια (turbulent kinetic energy), ενώ το ω τον ρυθμό καταστροφής της τύρβης (turbulence specific dissipation).

Η διαμόρφωση SST (Shear Stress Transport) μέσα στο οριακό στρώμα, καθιστά το μοντέλο κατάλληλο για τις ροές χαμηλών αριθμών Reynolds χωρίς την προσθήκη

συναρτήσεων τοίχου (Wall Functions). Επίσης το μοντέλο αυτό συμπεριφέρεται όπως το μοντέλο k-ε μακριά από τοιχώματα, αποφεύγοντας την μεγάλη ευαισθησία που παρουσιάζουν τα μοντέλα k-ω στις τιμές εισόδου των τυρβωδών μεταβλητών, Παράλληλα διατηρεί την ικανότητα υπολογισμού της αποκόλλησης της ροής κοντά στα τοιχώματα. Η εξίσωση υπολογισμού της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k είναι η εξής:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb}$$

Ενώ η εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού καταστροφής της τυρβώδους ροής ω:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}$$

όπου:

$$\beta' = 0,09$$

$$\alpha = 5/9$$

$$\beta = 0,075$$

$$\sigma_k = 2$$

$$\sigma_\omega = 2$$

και

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

στην οποία για ασυμπίεστο ρευστό, το $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ παίρνει πολύ μικρές τιμές, επομένως το δεύτερο σκέλος της δεξιά μεριάς της εξίσωσης αγνοείται.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα τελικά υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

Όπου:

$$v_t = \frac{\mu_1}{\rho}$$

και F_2 μια εξίσωση ανάμιξης η οποία περιορίζει το οριακό στρώμα στο τοίχωμα, και S μία αμετάβλητη παράμετρος της τάσης και ορίζονται ως εξής

$$F_2 = \tan h(\text{arg}_2^2)$$

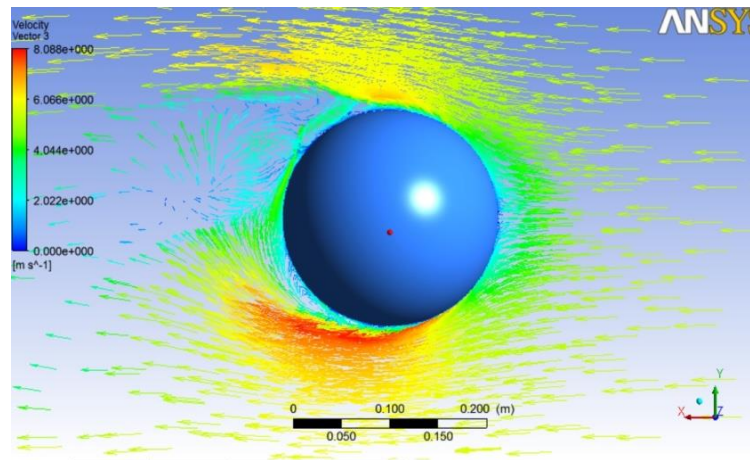
$$\text{με } \text{arg}_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}\right)$$

3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

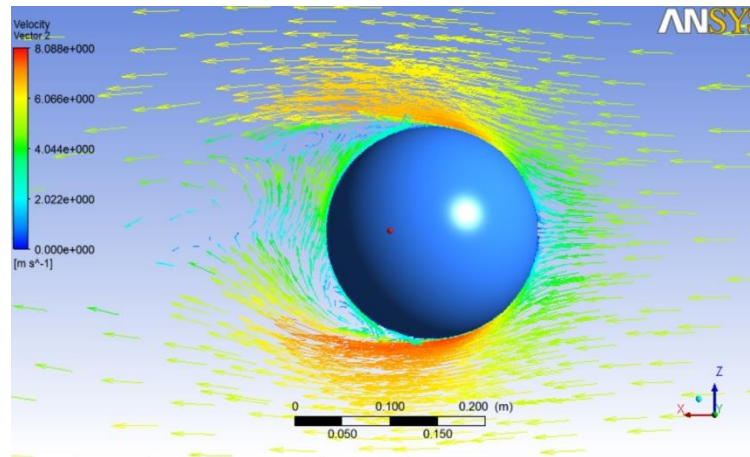
Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα του μοντέλου CFD αναλύθηκε παραπάνω. Η επίλυση έγινε με το πρόγραμμα CFX-Solver του πακέτου Ansys. Τα αποτελέσματα στη συνέχεια εισάγονται στο CFX-Post. Η επίλυση του μοντέλου CFD έγινε για δώδεκα διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, για τρεις μπάλες, καθώς και για απλή σφαίρα. Οι ταχύτητες ορίστηκαν από 20km/h ως 130 km/h. Για κάθε περίπτωση, έγινε επίλυση για όλες τις παραπάνω ταχύτητες.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφέρουν από αυτά του πειράματος που περιγράφηκε παραπάνω ωστόσο οι διαφορές οφείλονται στις παραμετροποιήσεις.

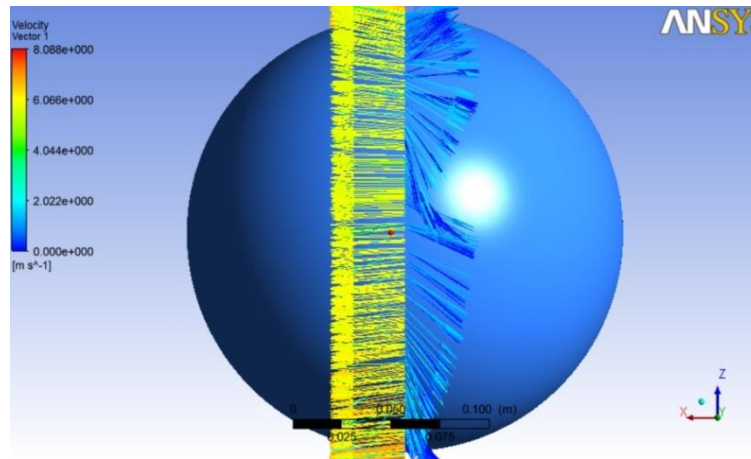
3.4.1 Αποτελέσματα σφαίρας



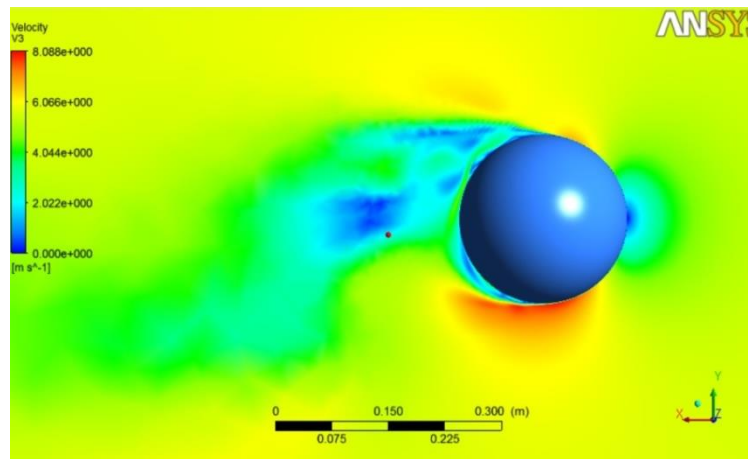
Εικόνα 3.20 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 20km/h



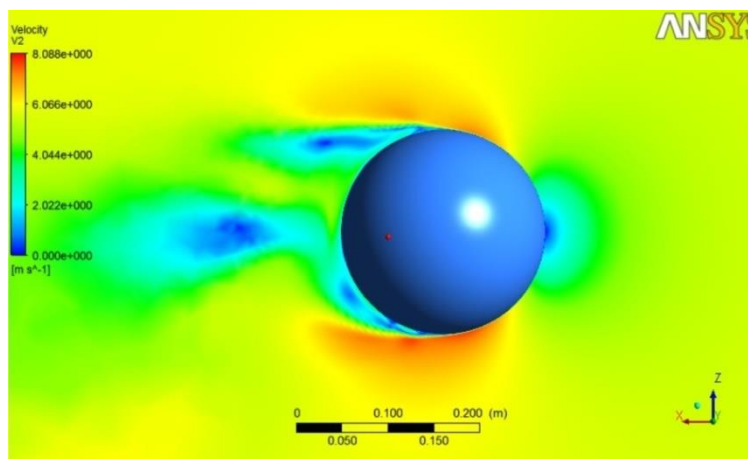
Εικόνα 3.21 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 20km/h



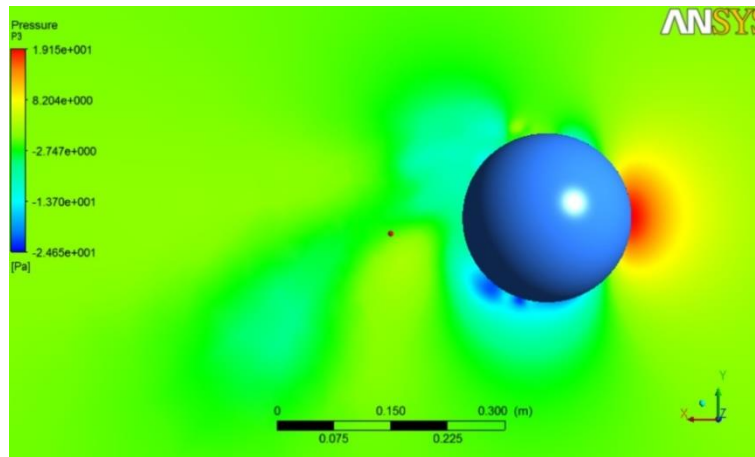
Εικόνα 3.22 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο σφαίρας στα 20km/h



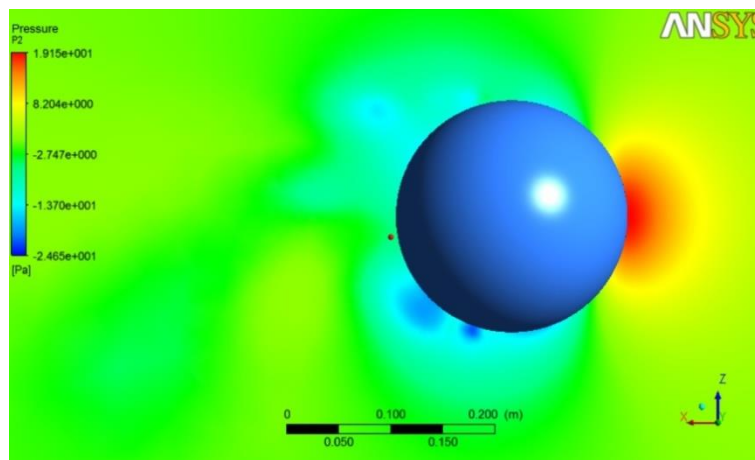
Εικόνα 3.23 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 20km/h



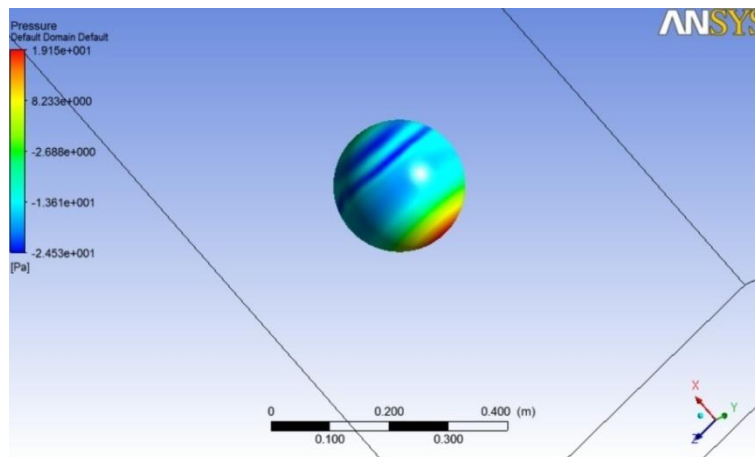
Εικόνα 3.24 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 20km/h



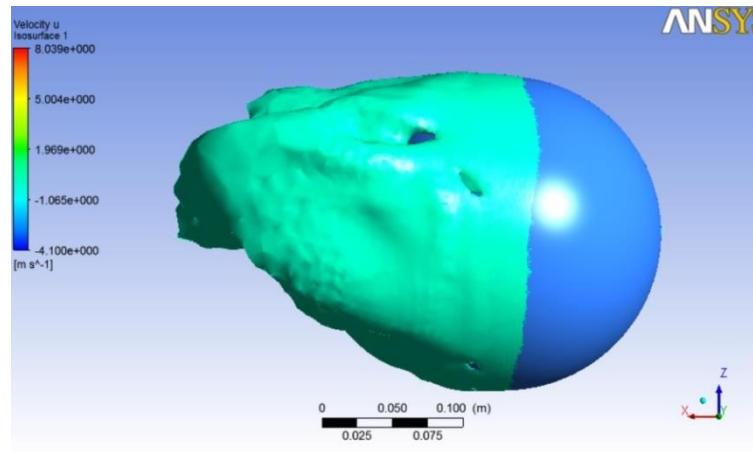
Εικόνα 3.25: Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 20km/h



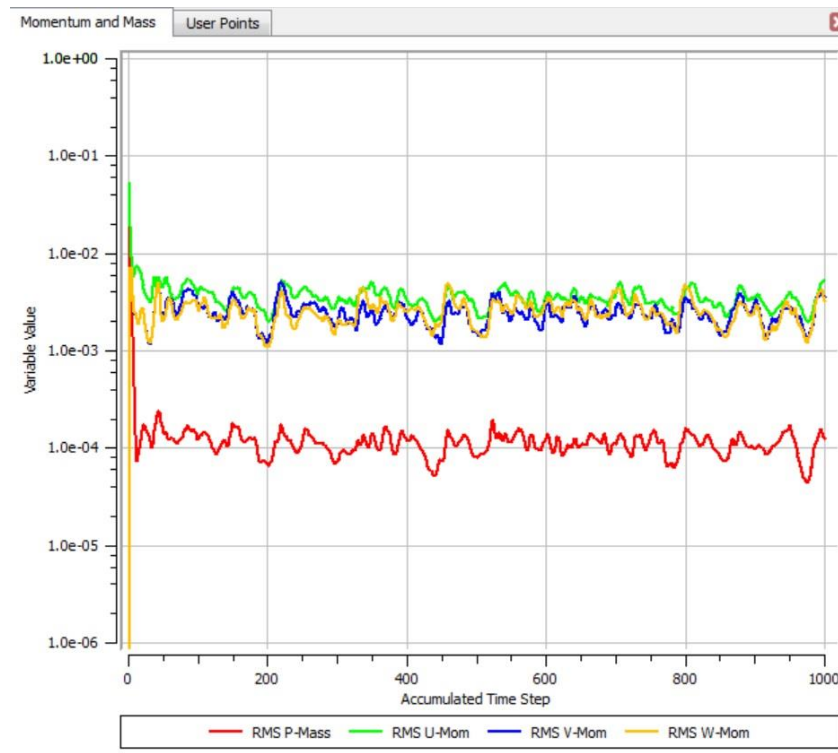
Εικόνα 3.26 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 20km/h



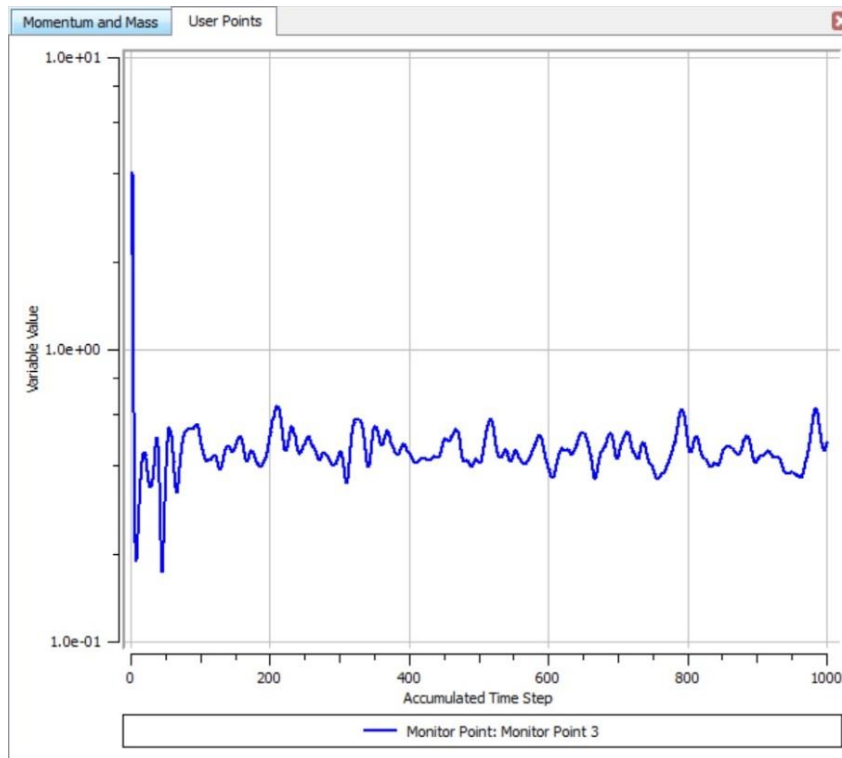
Εικόνα 3.27 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην σφαίρα στα 20km/h



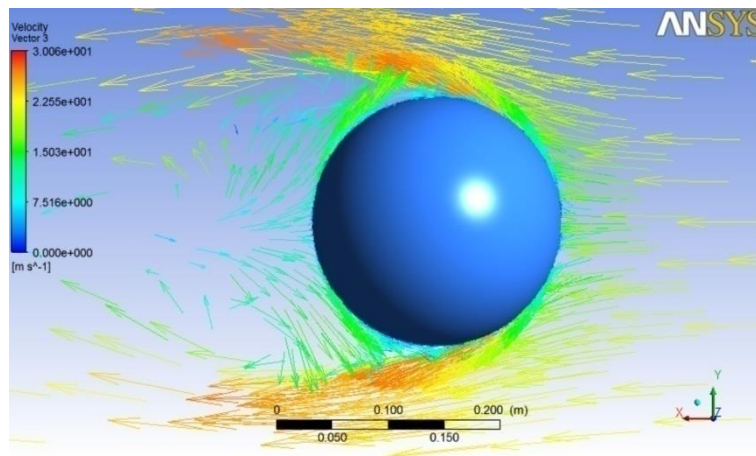
Εικόνα 3.28 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων σφαίρας στα 20km/h



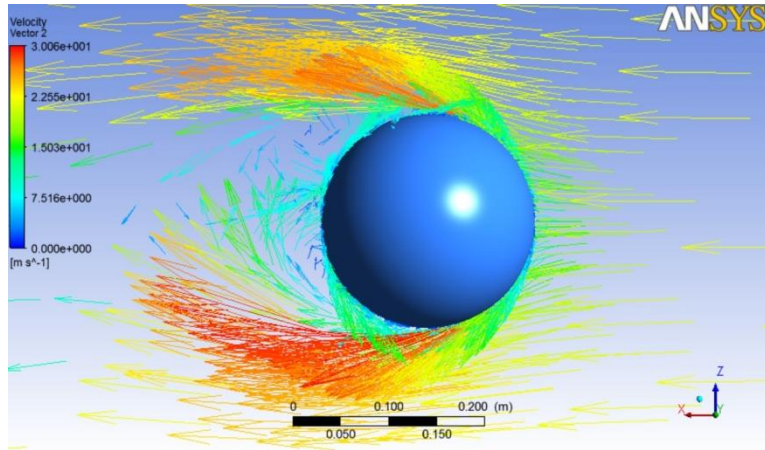
Εικόνα 3.29 : Διάγραμμα residuals σφαίρας στα 20km/h



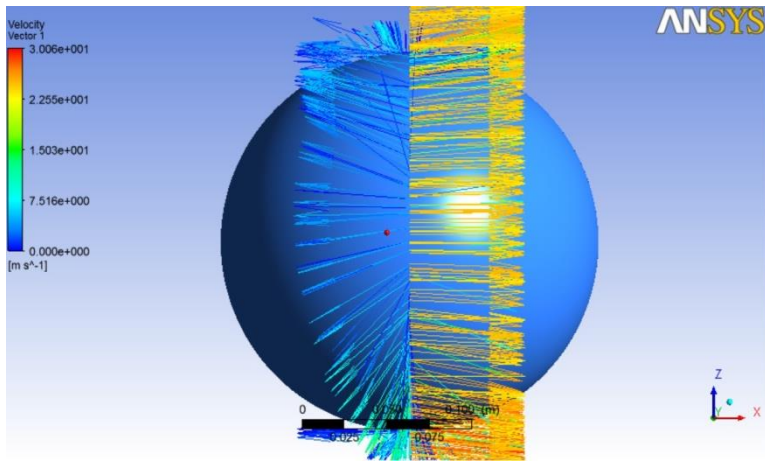
Εικόνα 3.30 : Διάγραμμα δύναμης F σφαίρας στα 20km/h



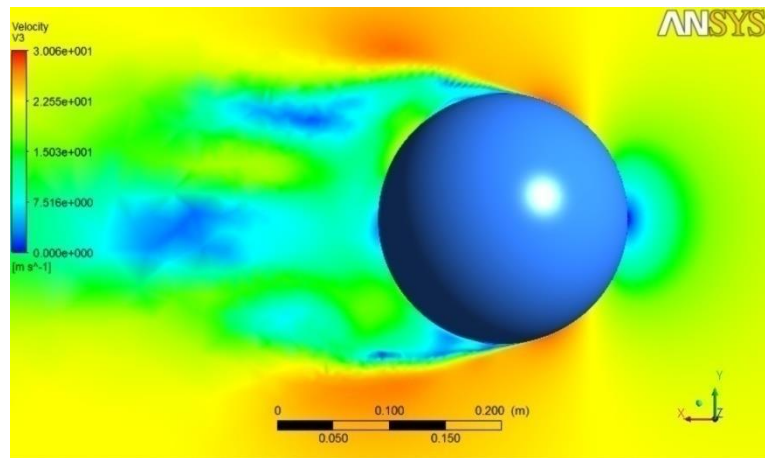
Εικόνα 3.31 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h



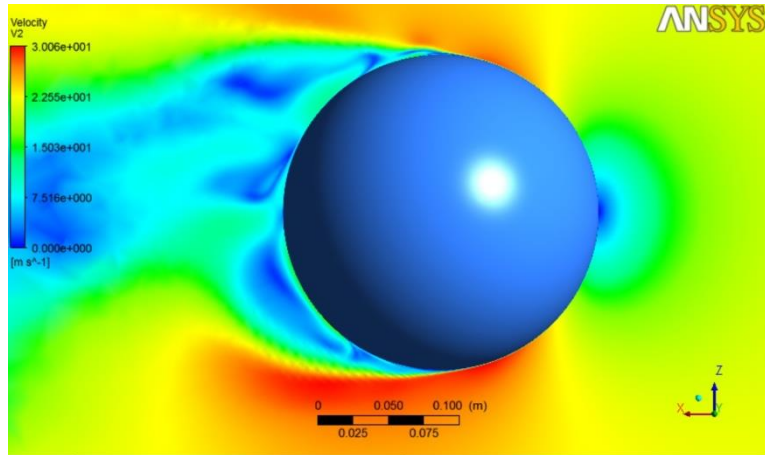
Εικόνα 3.32 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h



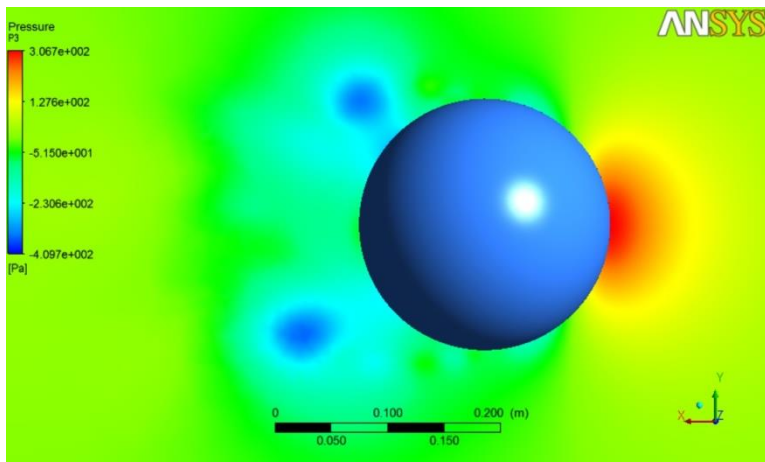
Εικόνα 3.33 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο σφαίρας στα 20km/h



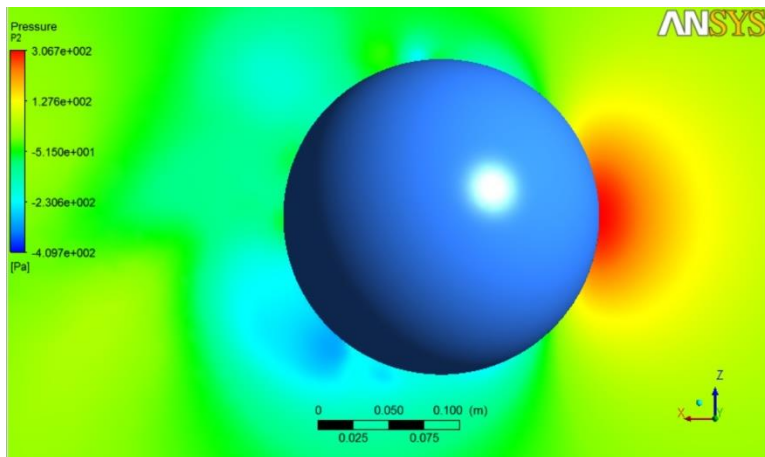
Εικόνα 3.34 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h



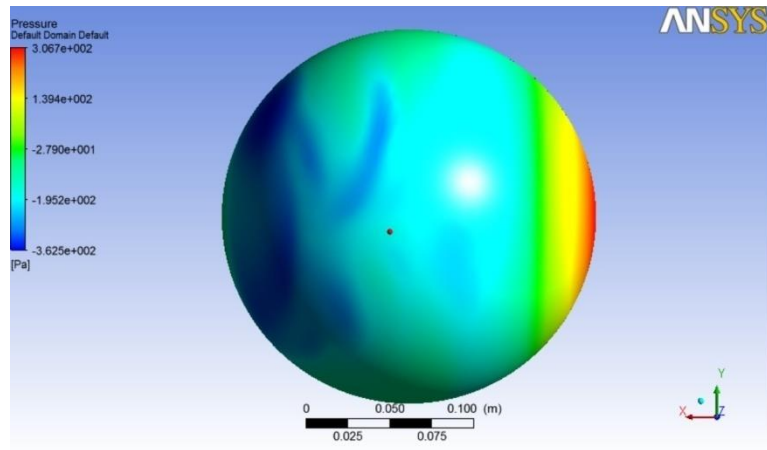
Εικόνα 3.35 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h



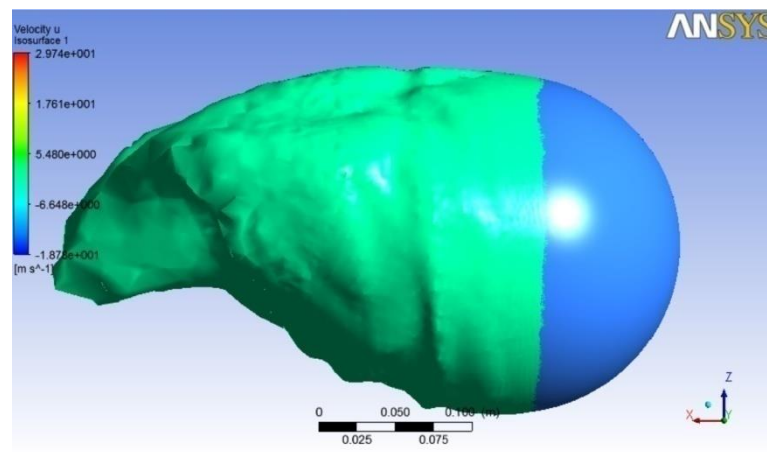
Εικόνα 3.36 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 80km/h



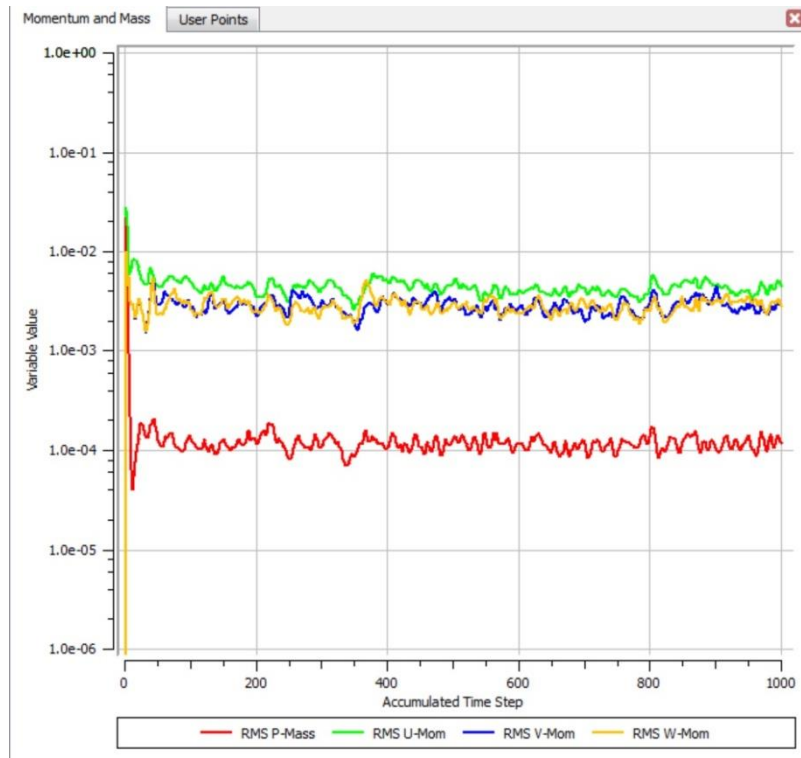
Εικόνα 3.37 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 80km/h



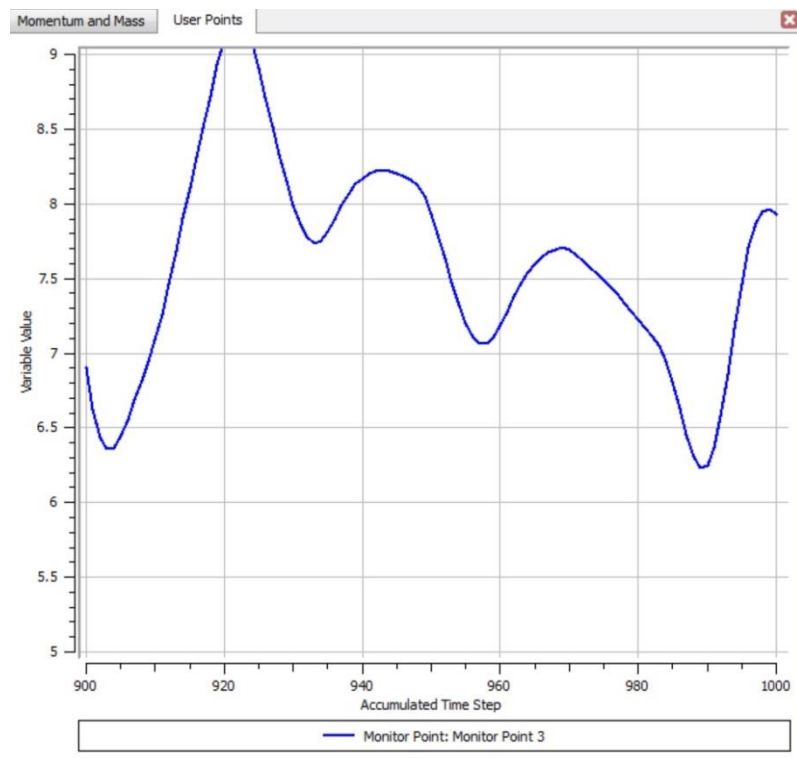
Εικόνα 3.38 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην σφαίρα στα 80km/h



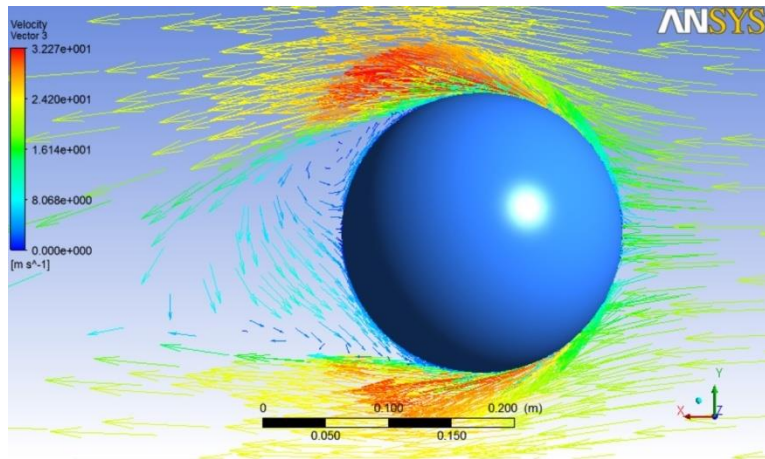
Εικόνα 3.39 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων σφαίρας στα 80km/h



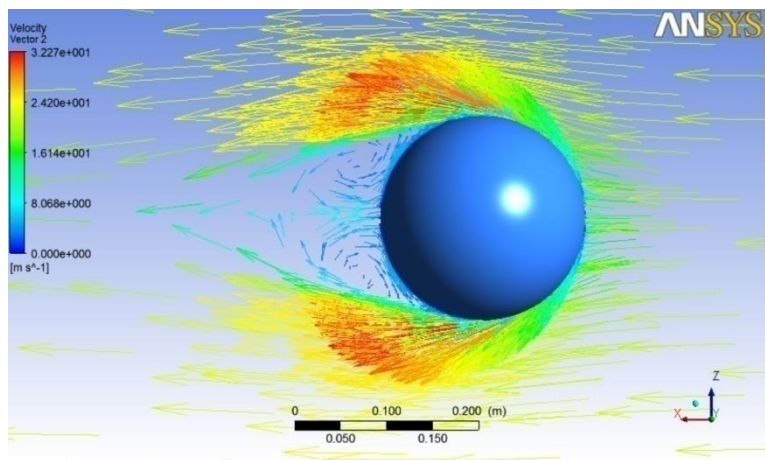
Εικόνα 3.40 : Διάγραμμα residuals σφαίρας στα 80km/h



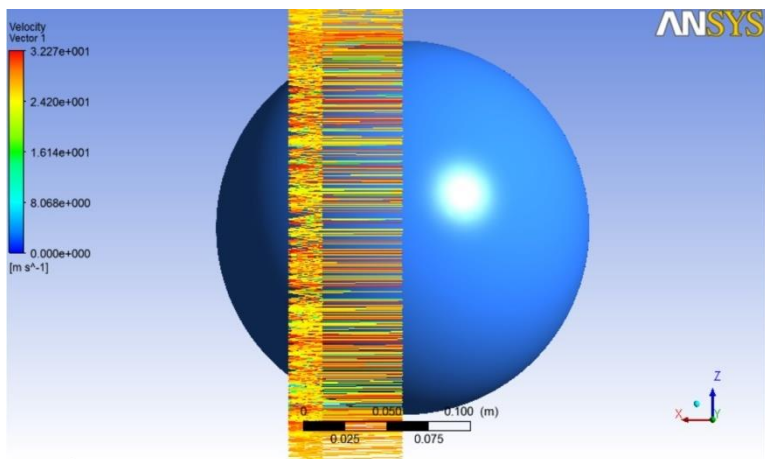
Εικόνα 3.41 : Διάγραμμα δύναμης F σφαίρας στα 80km/h



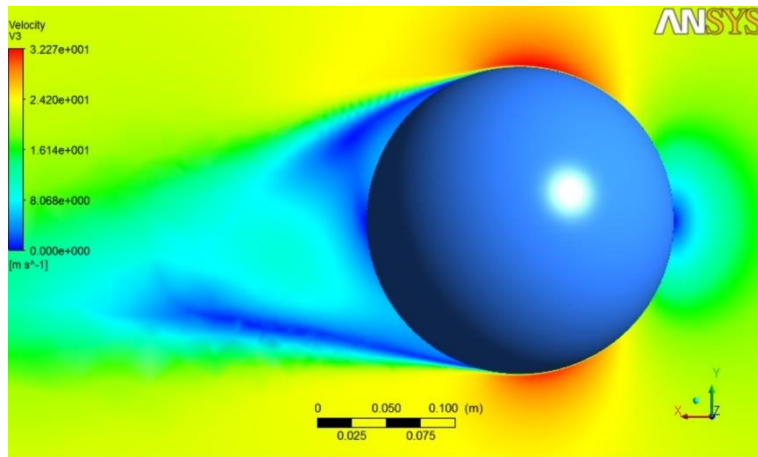
Εικόνα 3.42 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



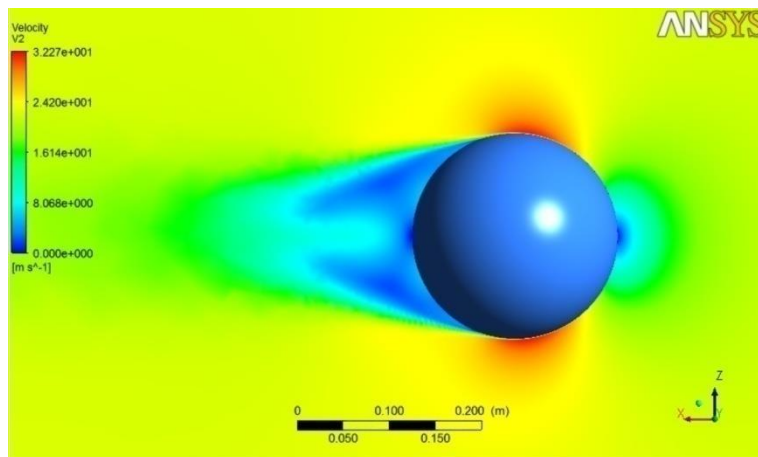
Εικόνα 3.43 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



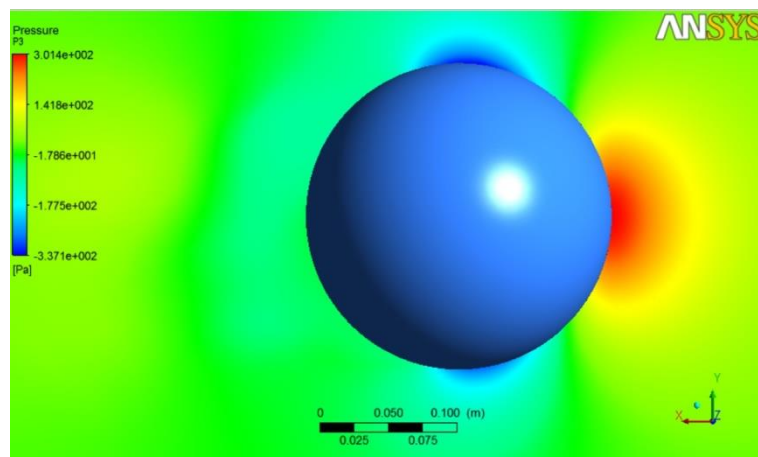
Εικόνα 3.44 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



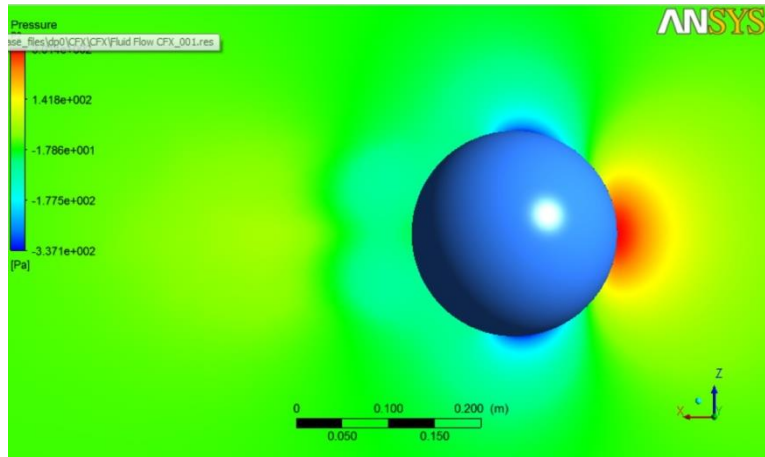
Εικόνα 3.45 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



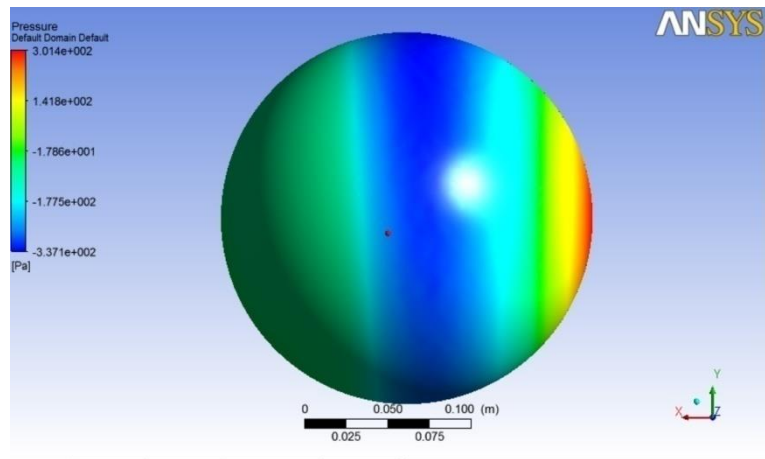
Εικόνα 3.46 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



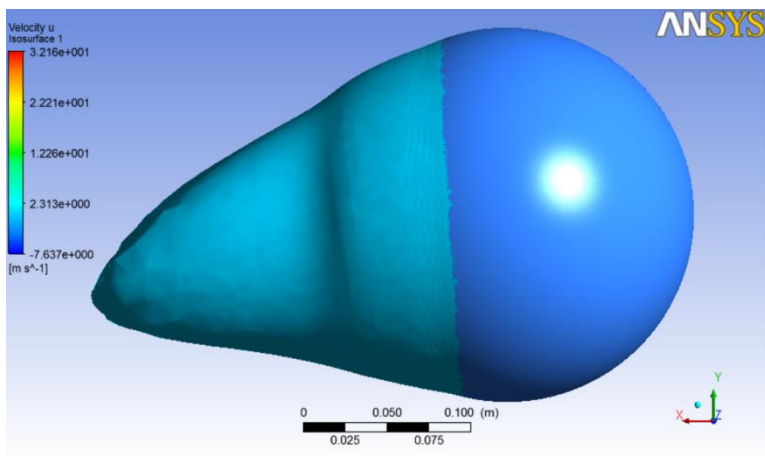
Εικόνα 3.47 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



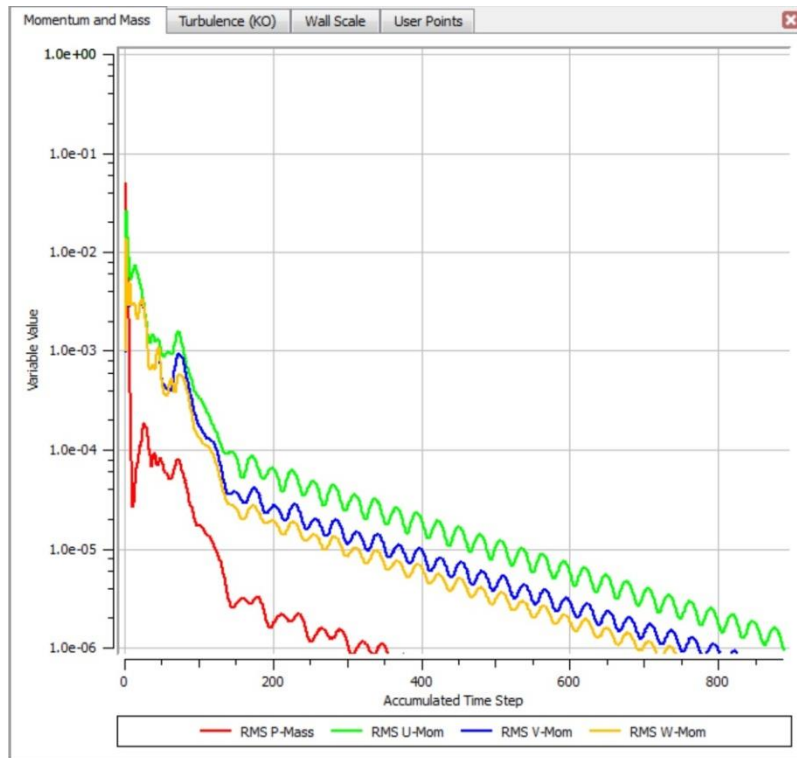
Εικόνα 3.48 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



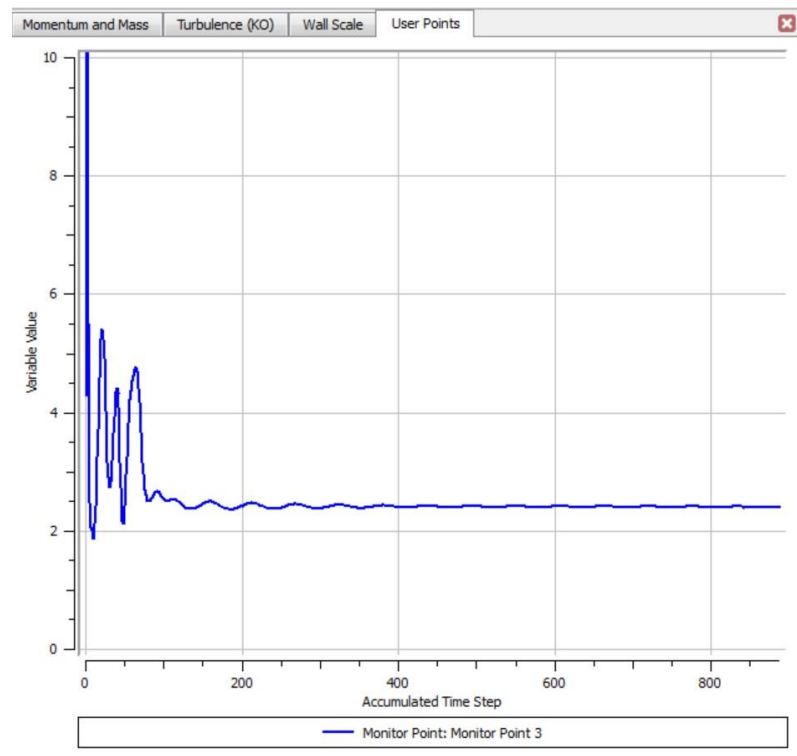
Εικόνα 3.49 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην σφαίρα στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



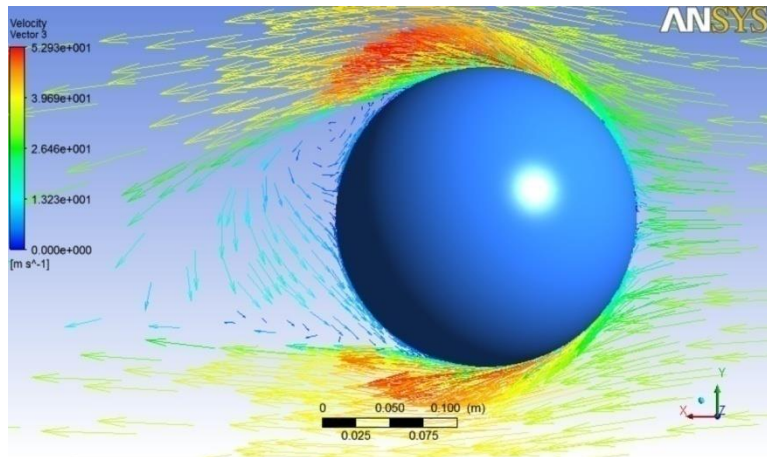
Εικόνα 3.50 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων σφαίρας στα 80km/h (τουρβώδη ροή)



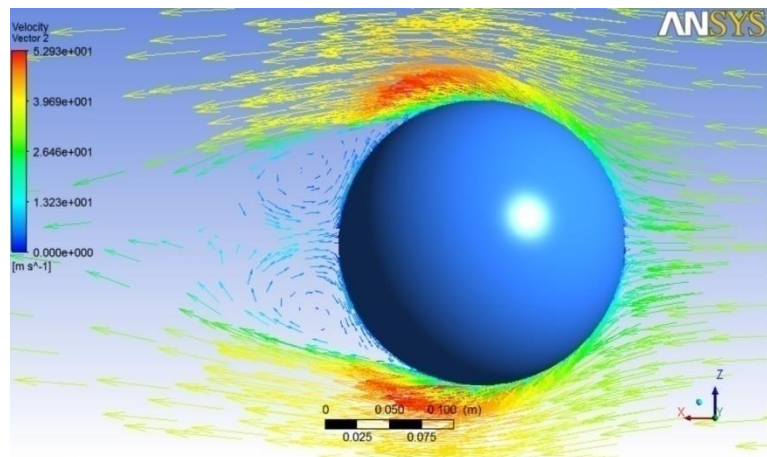
Εικόνα 3.51 : Διάγραμμα residuals σφαίρας στα 80km/h (турβώδη ροή)



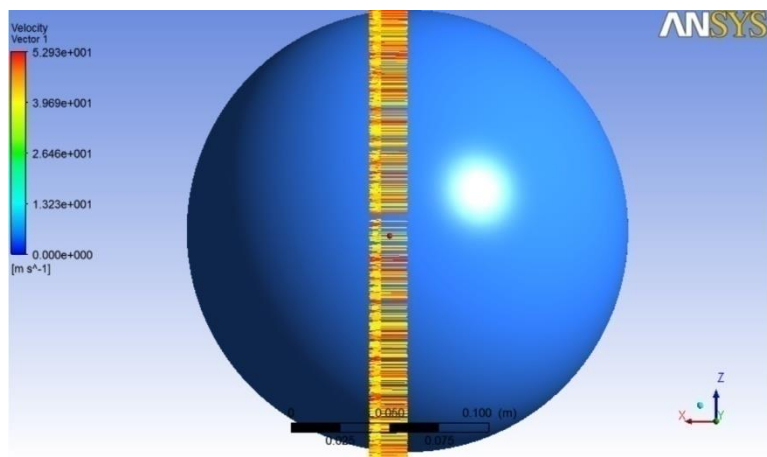
Εικόνα 3.52 : Διάγραμμα δύναμης F σφαίρας στα 80km/h (турβώδη ροή)



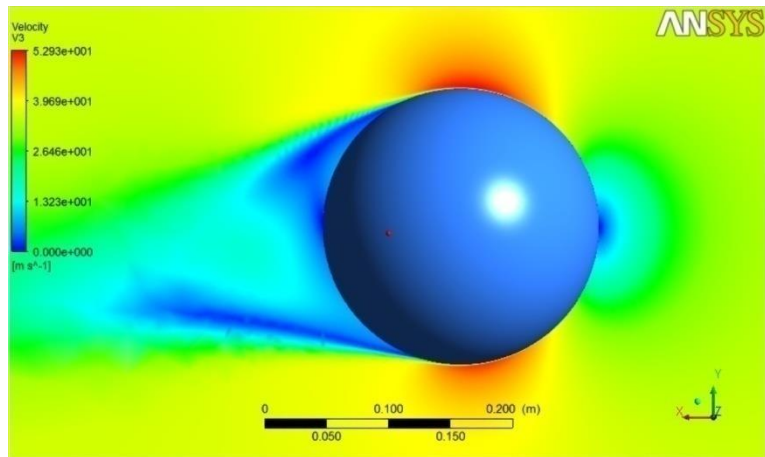
Εικόνα 3.53 : Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 130km/h



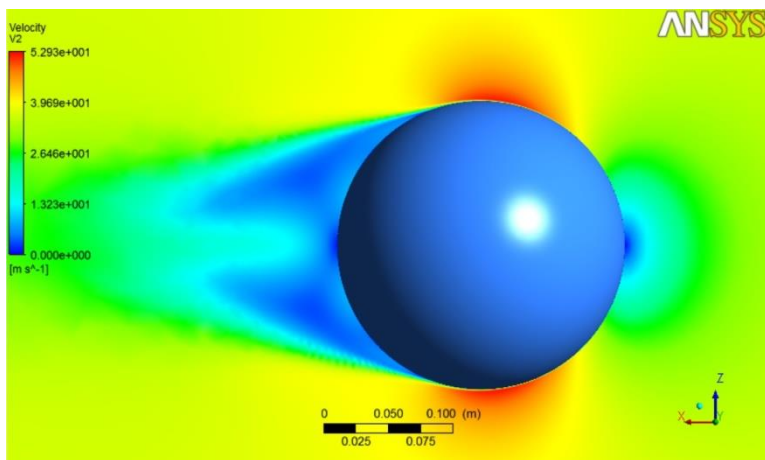
Εικόνα 3.54: Διανύσματα ταχύτητας σφαίρας στα 130km/h



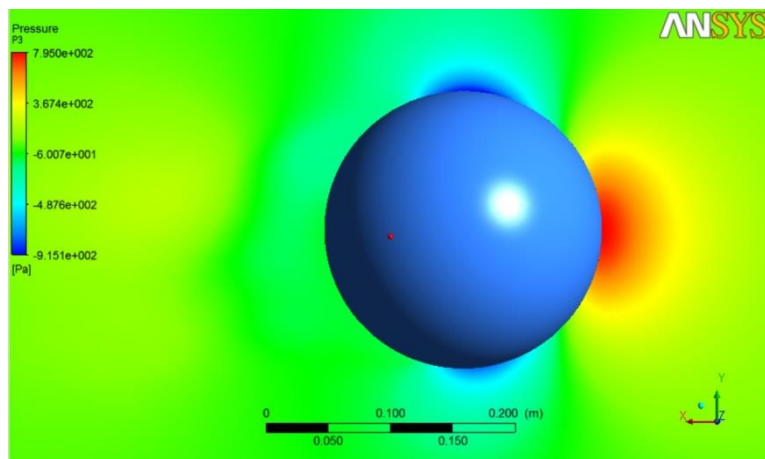
Εικόνα 3.55 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο σφαίρας στα 130km/h



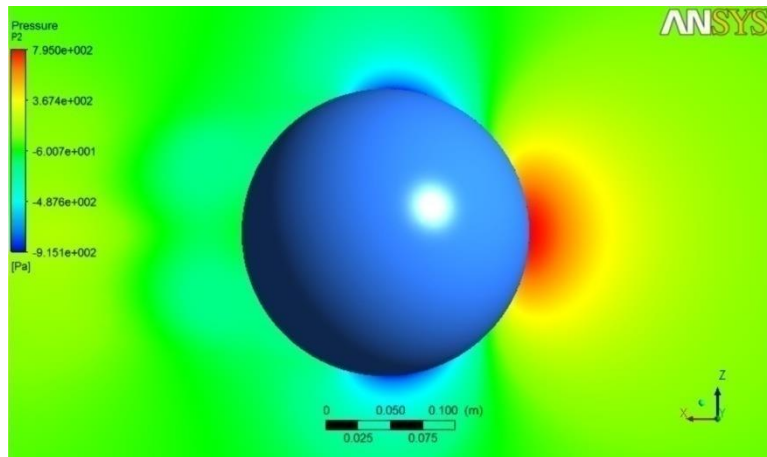
Εικόνα 3.56 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 130km/h



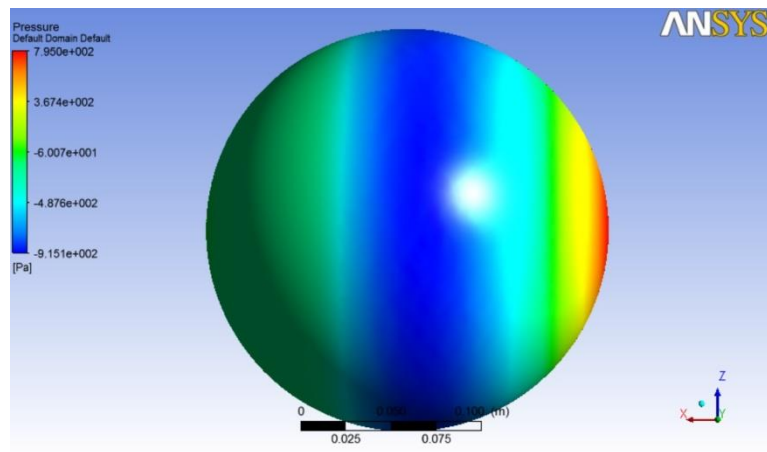
Εικόνα 3.57 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας σφαίρας στα 130km/h



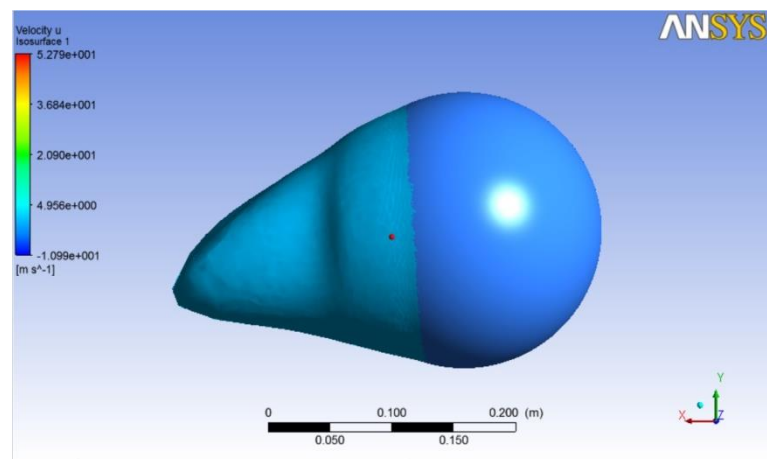
Εικόνα 3.58 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 130km/h



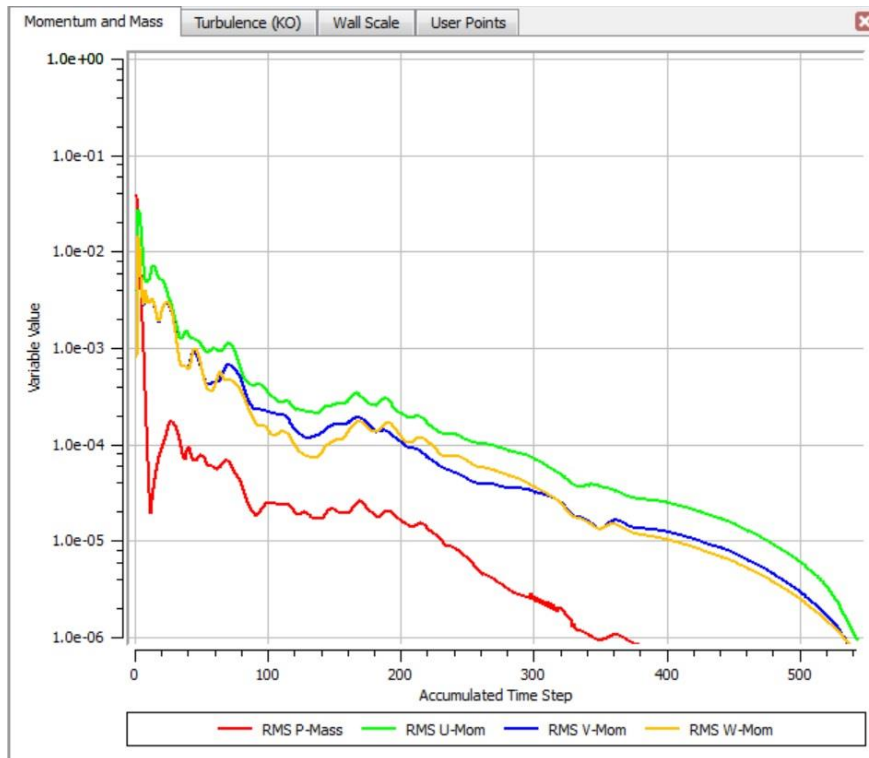
Εικόνα 3.59 : Κατανομή απόλυτης πίεσης σφαίρας στα 130km/h



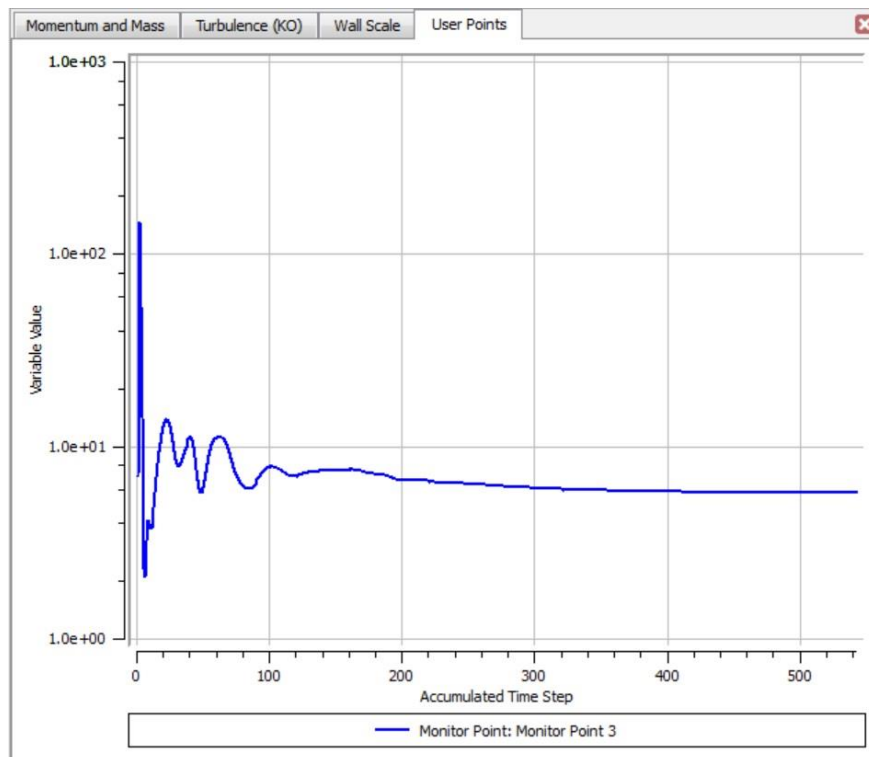
Εικόνα 3.60 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην σφαίρα στα 130km/h



Εικόνα 3.61 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων σφαίρας στα 130km/h

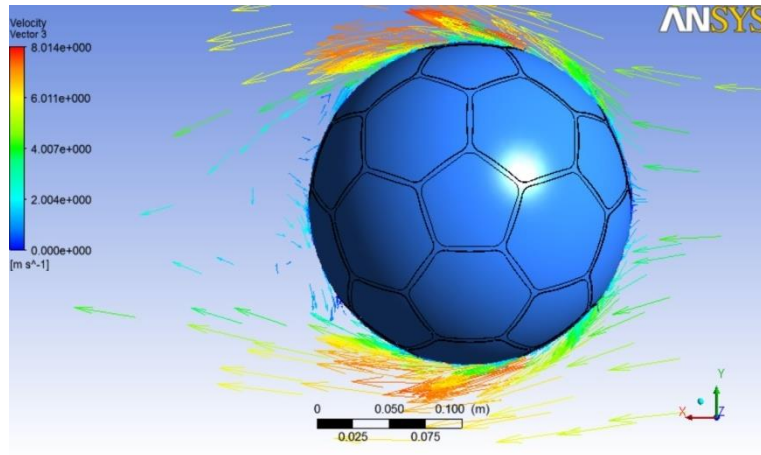


Εικόνα 3.62 : Διάγραμμα residuals σφαίρας στα 130km/h

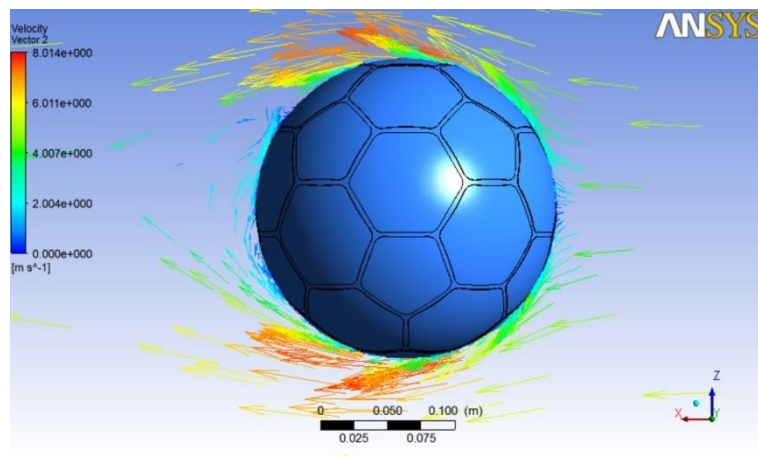


Εικόνα 3.63 : Διάγραμμα δύναμης F σφαίρας στα 130km/h

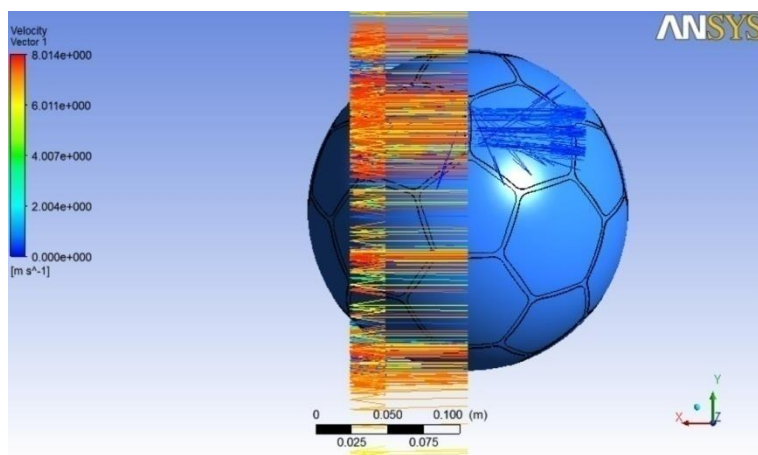
3.4.2 Αποτελέσματα μπάλας νικε(0.5)



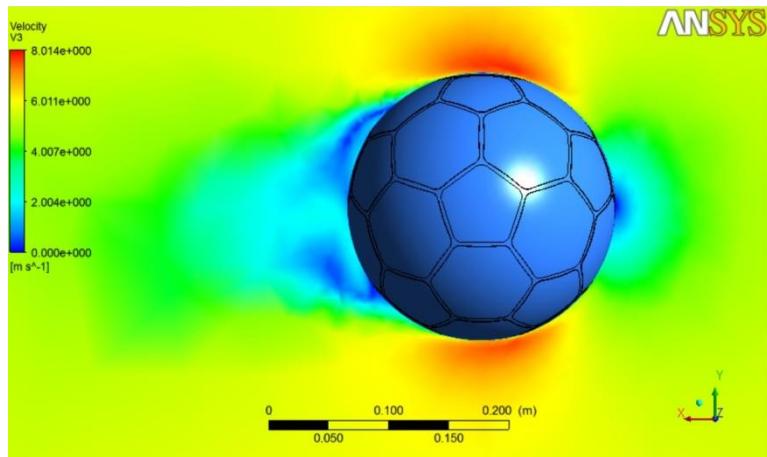
Εικόνα 3.64 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



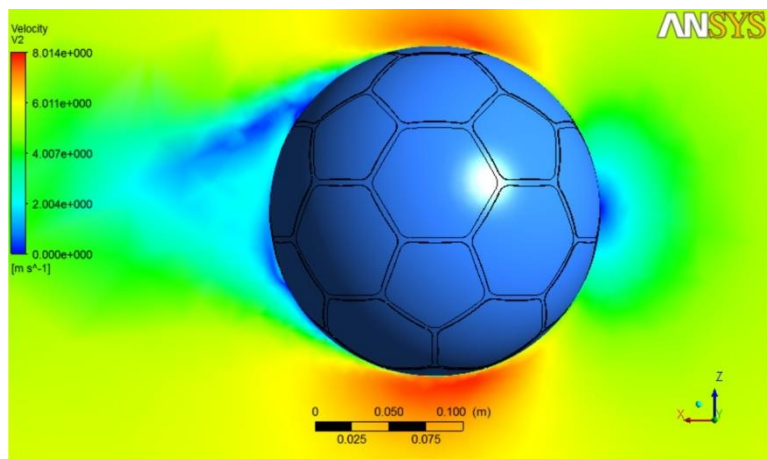
Εικόνα 3.65 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



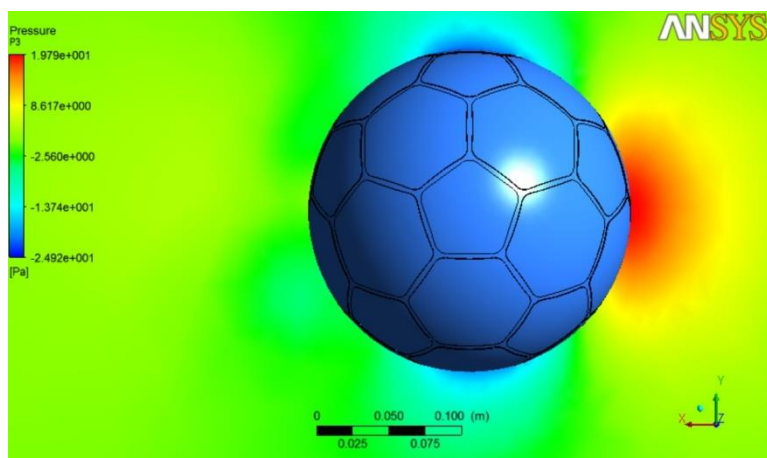
Εικόνα 3.66 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



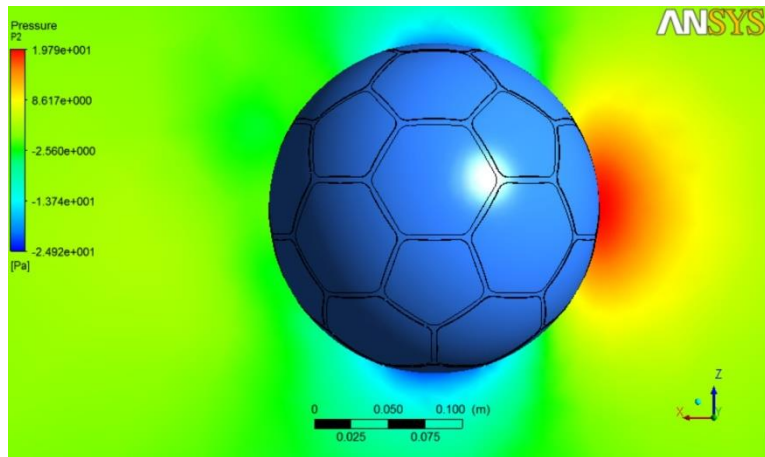
Εικόνα 3.67 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



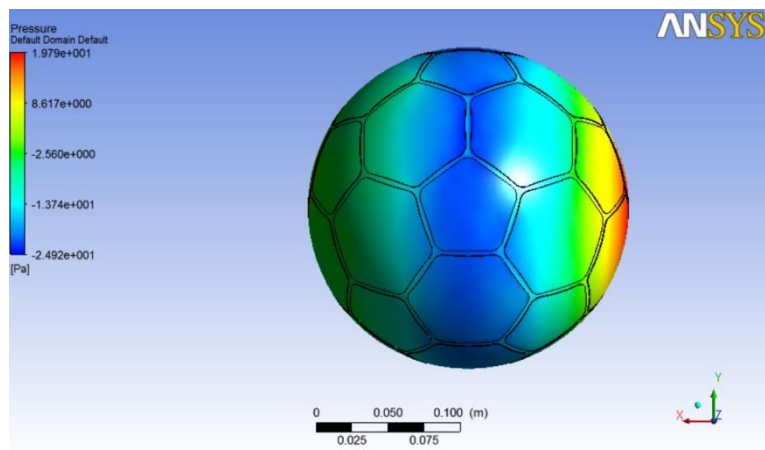
Εικόνα 3.68 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



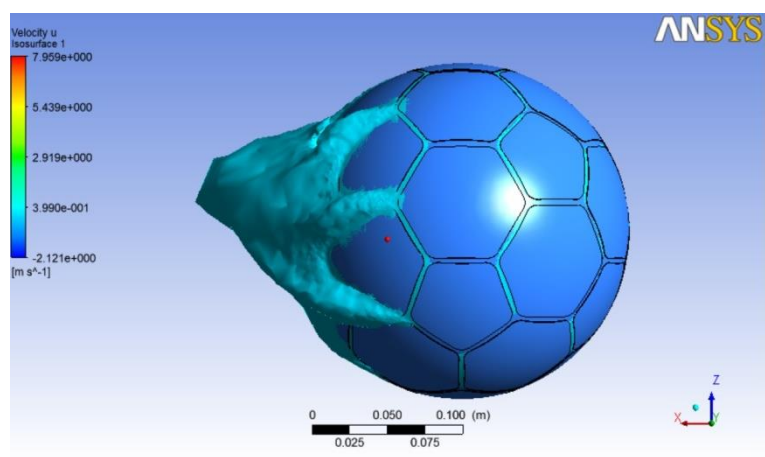
Εικόνα 3.69 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



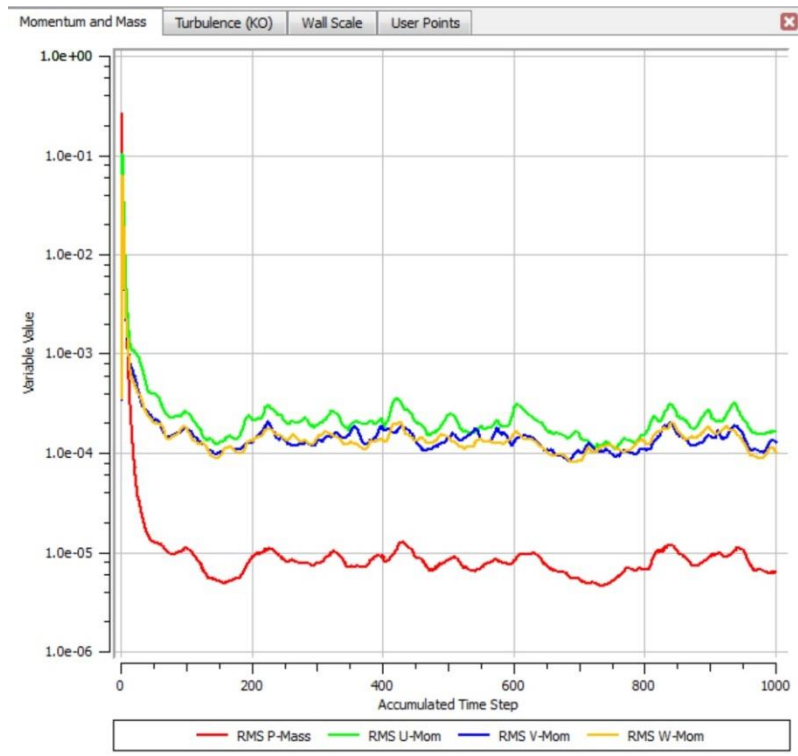
Εικόνα 3.70 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



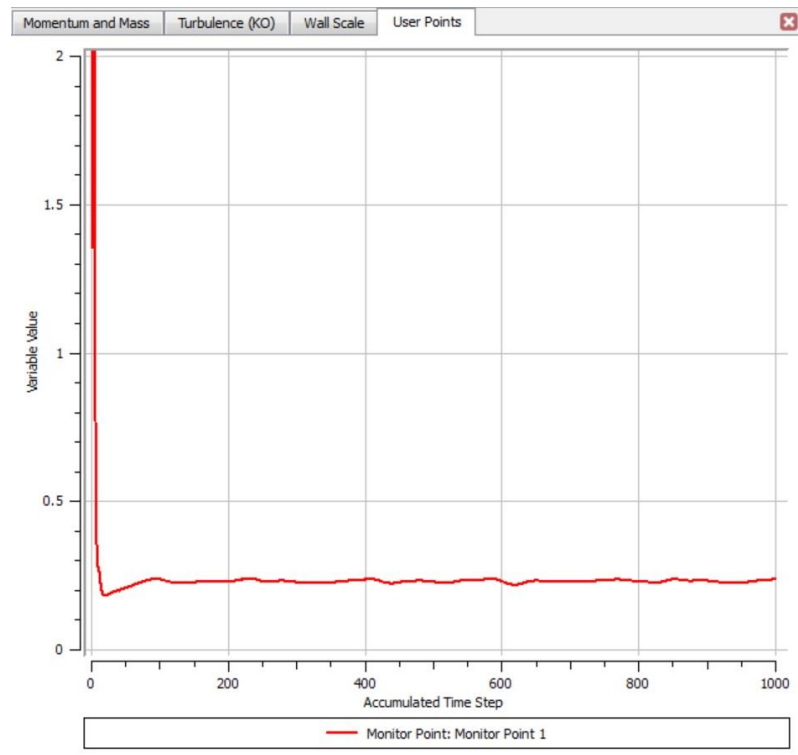
Εικόνα 3.71 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



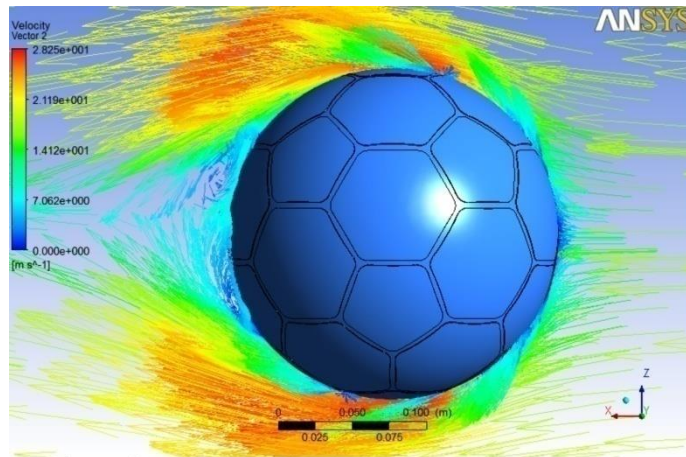
Εικόνα 3.72 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



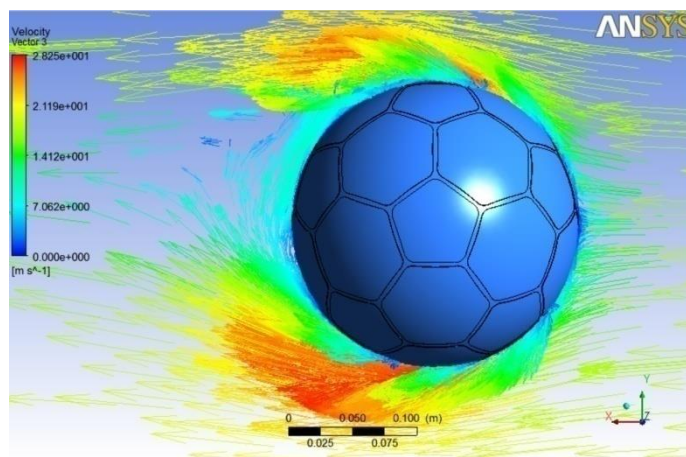
Εικόνα 3.73 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



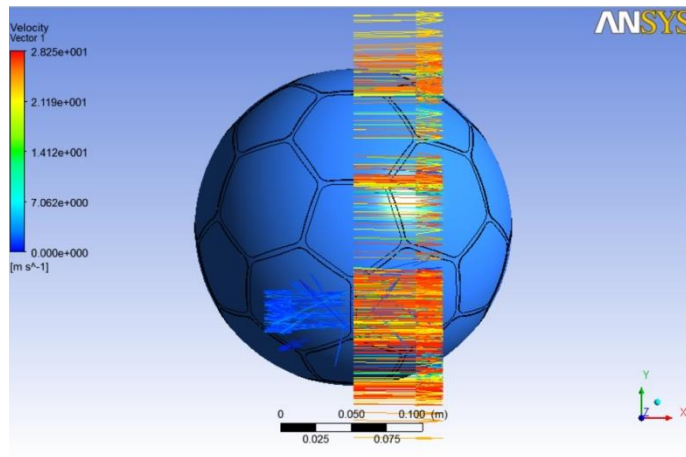
Εικόνα 3.74 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 20km/h



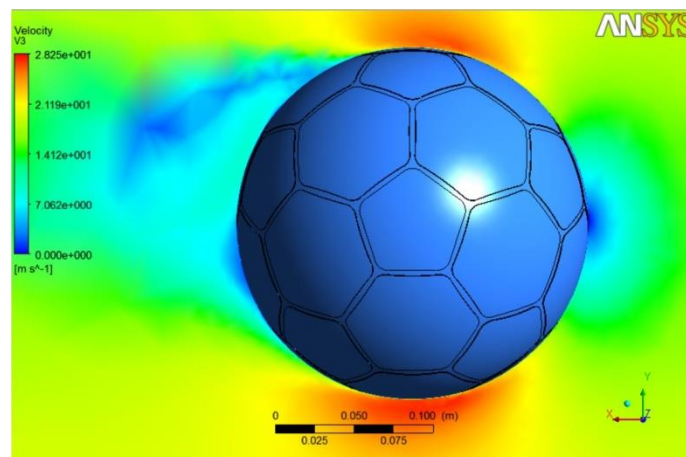
Εικόνα 3.75 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



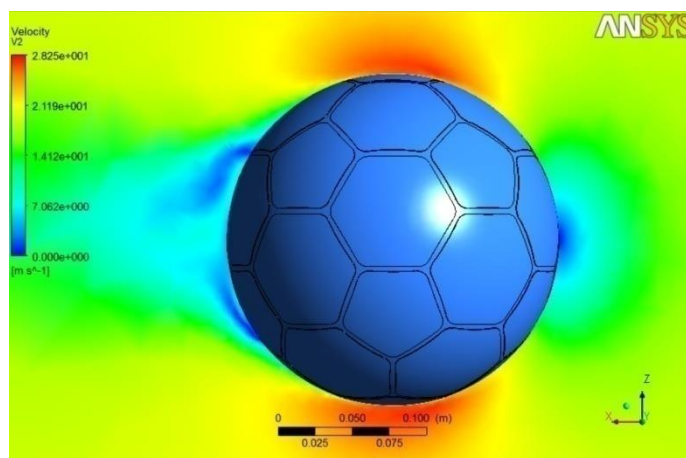
Εικόνα 3.76 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



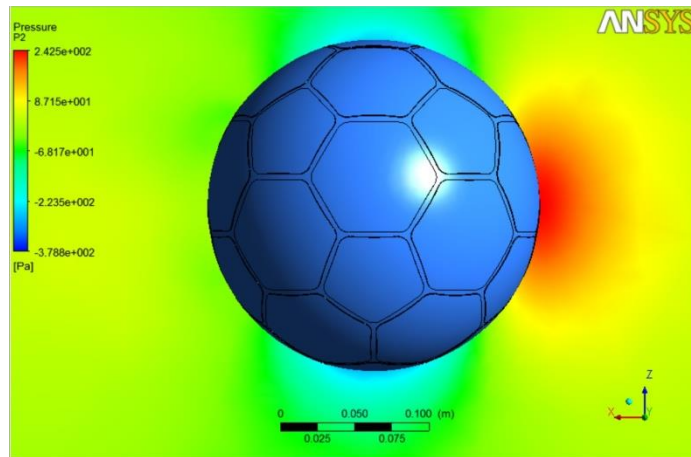
Εικόνα 3.77 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



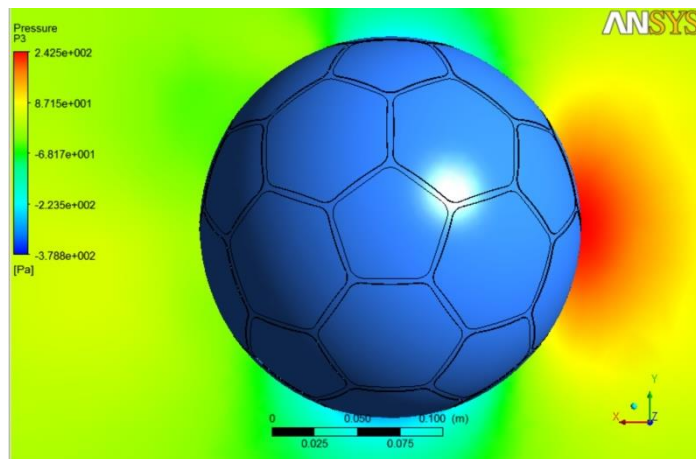
Εικόνα 3.78 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



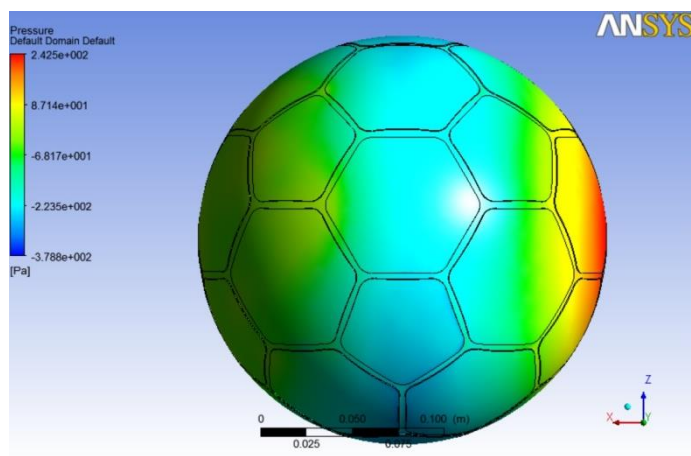
Εικόνα 3.79 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



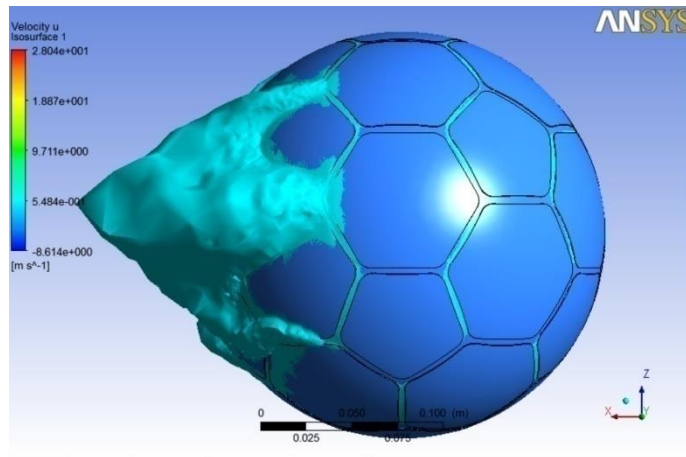
Εικόνα 3.80 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



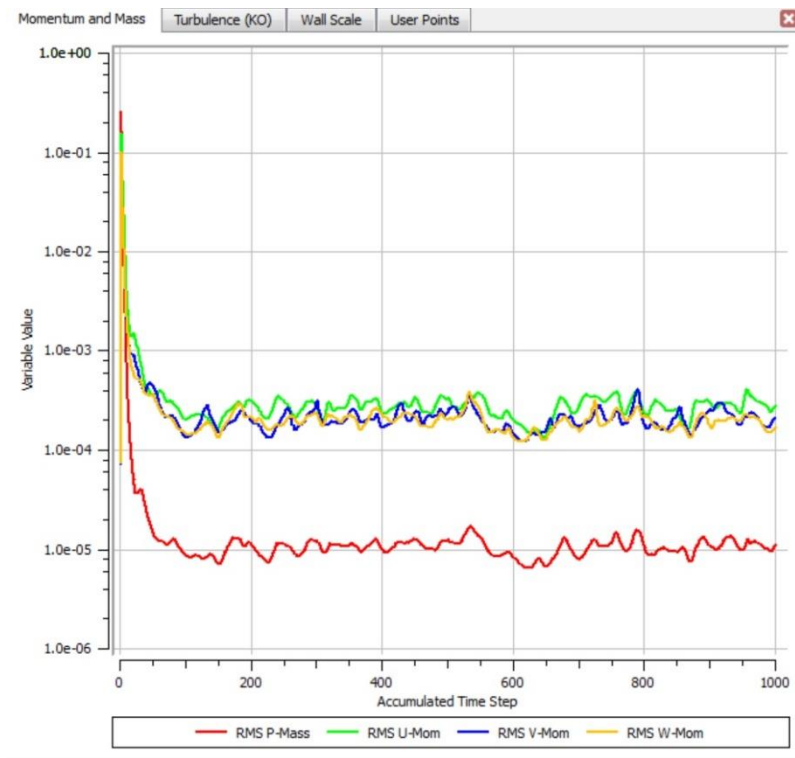
Εικόνα 3.81 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



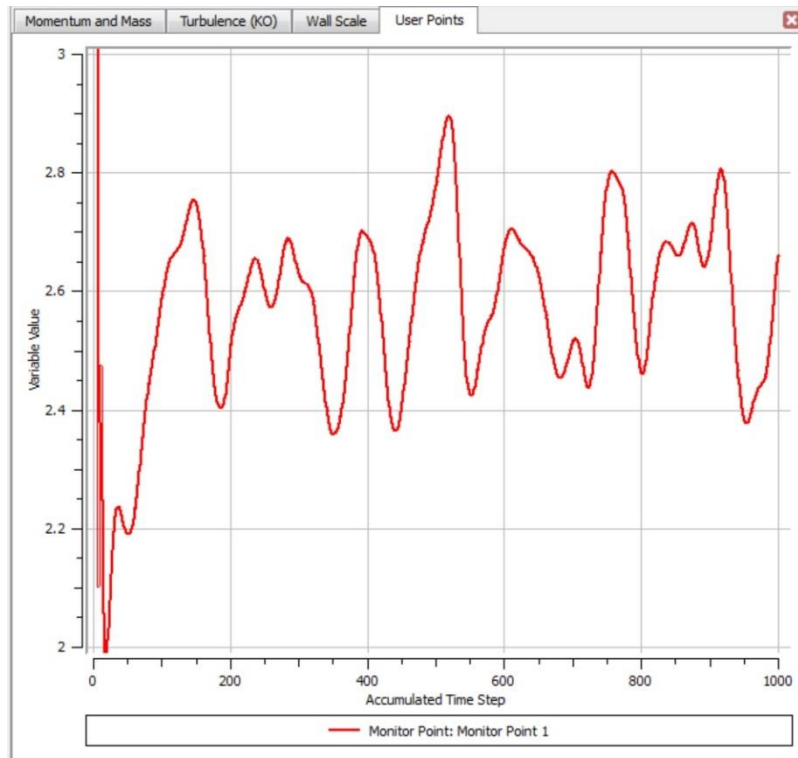
Εικόνα 3.82 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



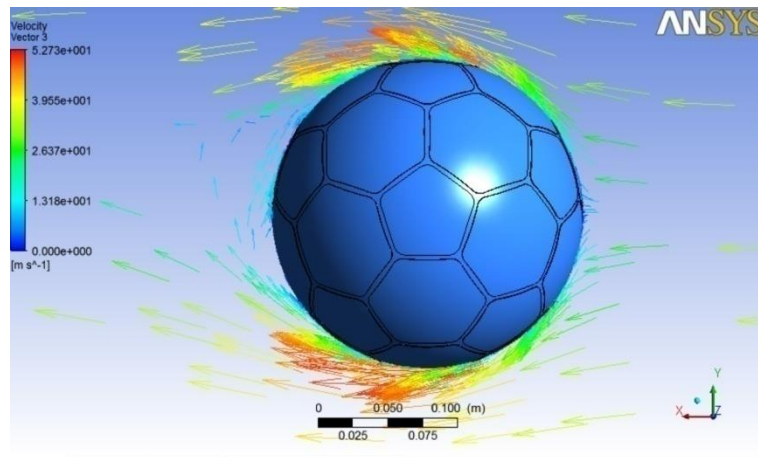
Εικόνα 3.83 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



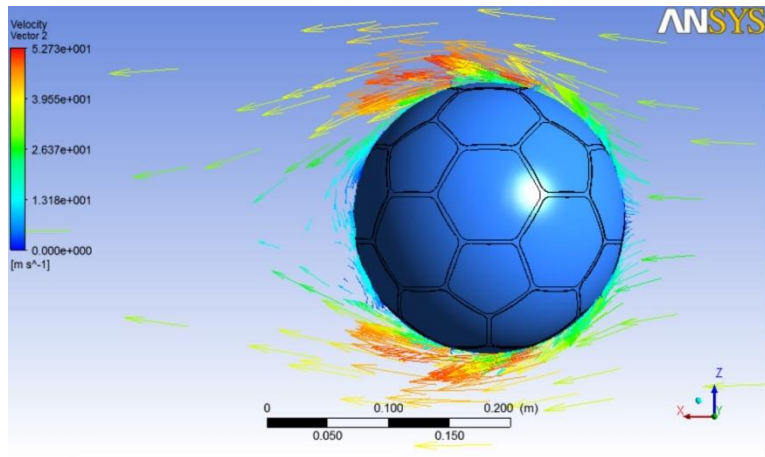
Εικόνα 3.84 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



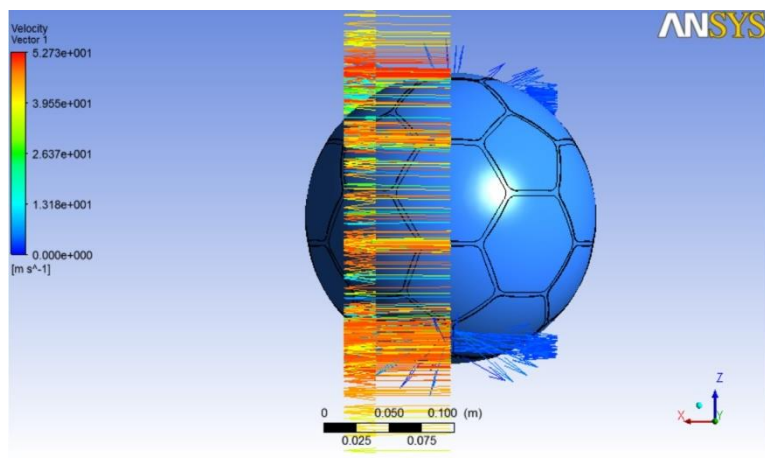
Εικόνα 3.85 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 70km/h



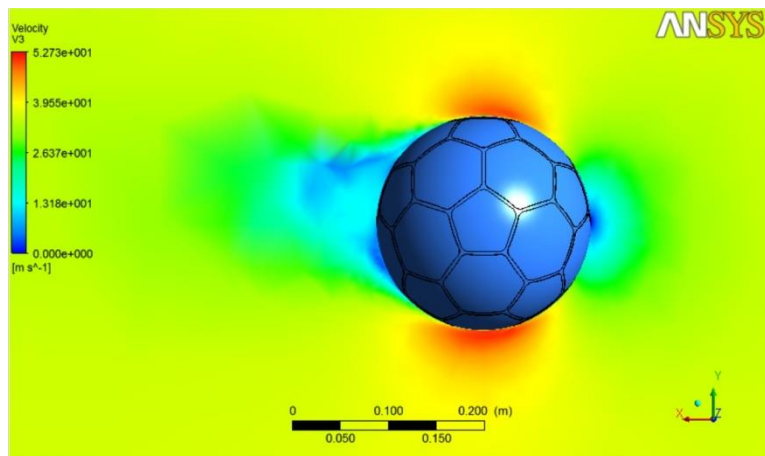
Εικόνα 3.86 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



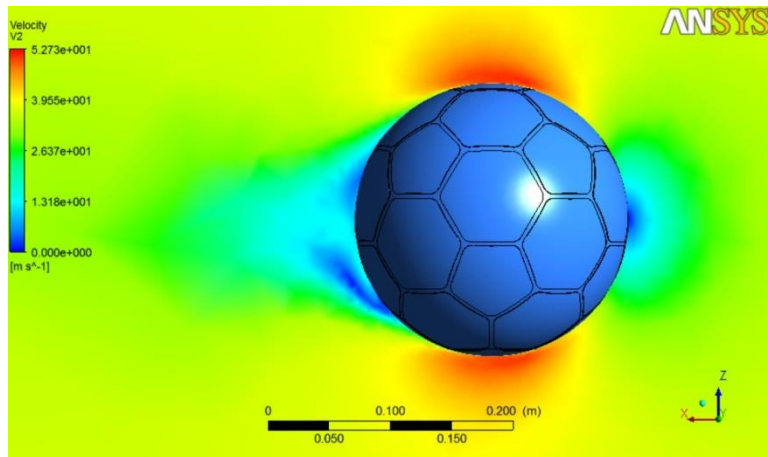
Εικόνα 3.87 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας πικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



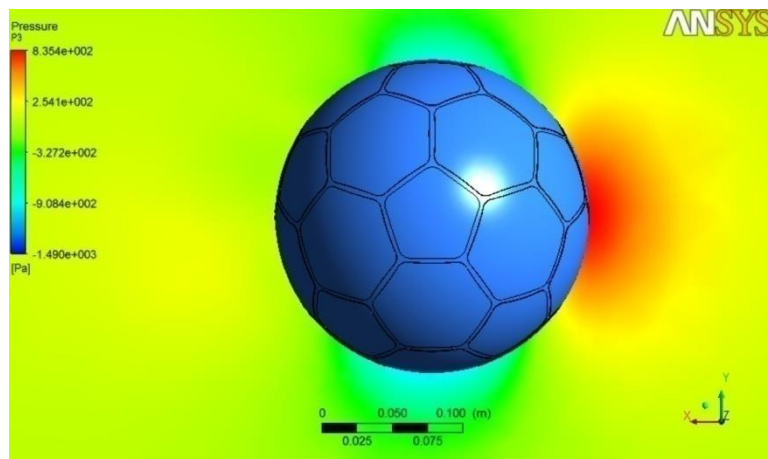
Εικόνα 3.88 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας πικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



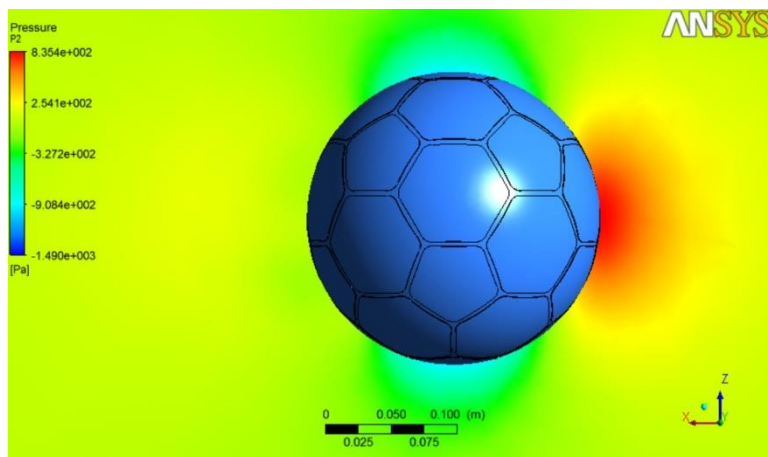
Εικόνα 3.89 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας πικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



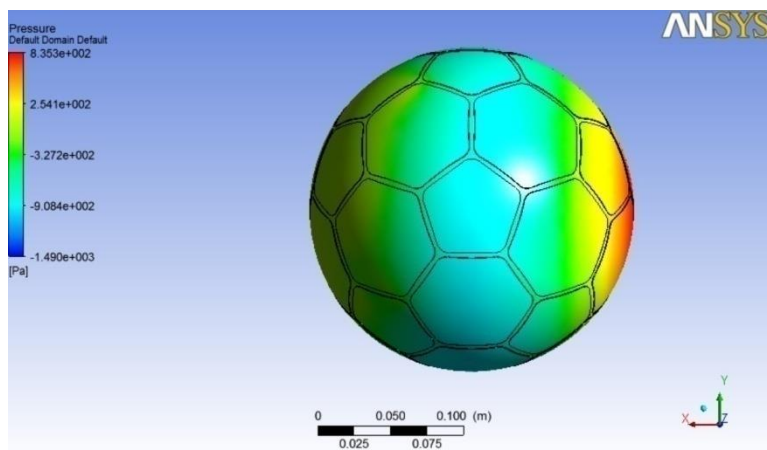
Εικόνα 3.90 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



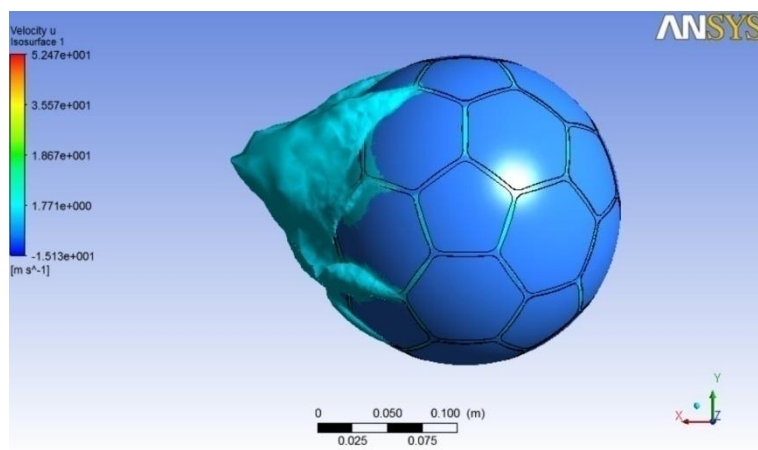
Εικόνα 3.91 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



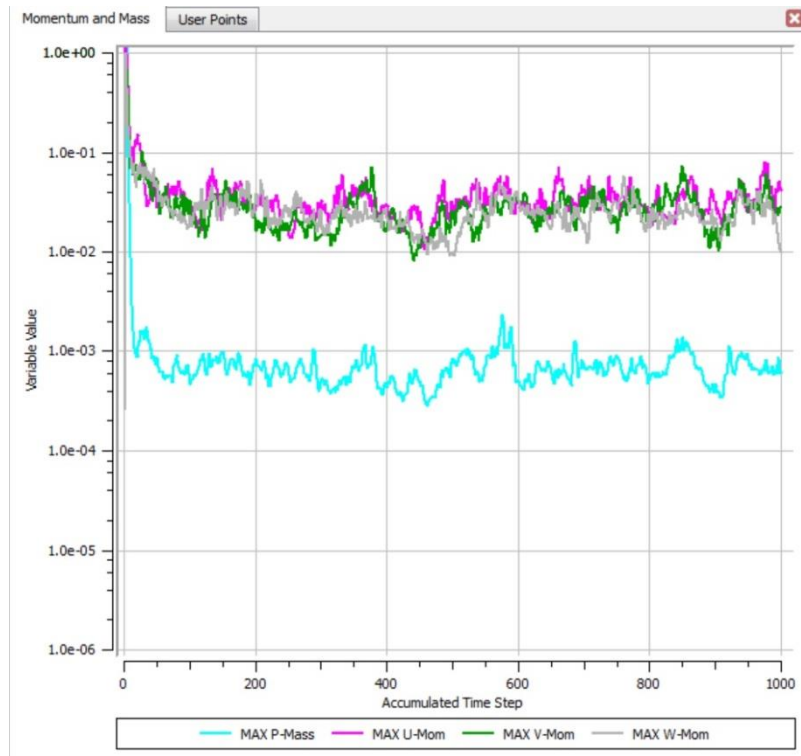
Εικόνα 3.92 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



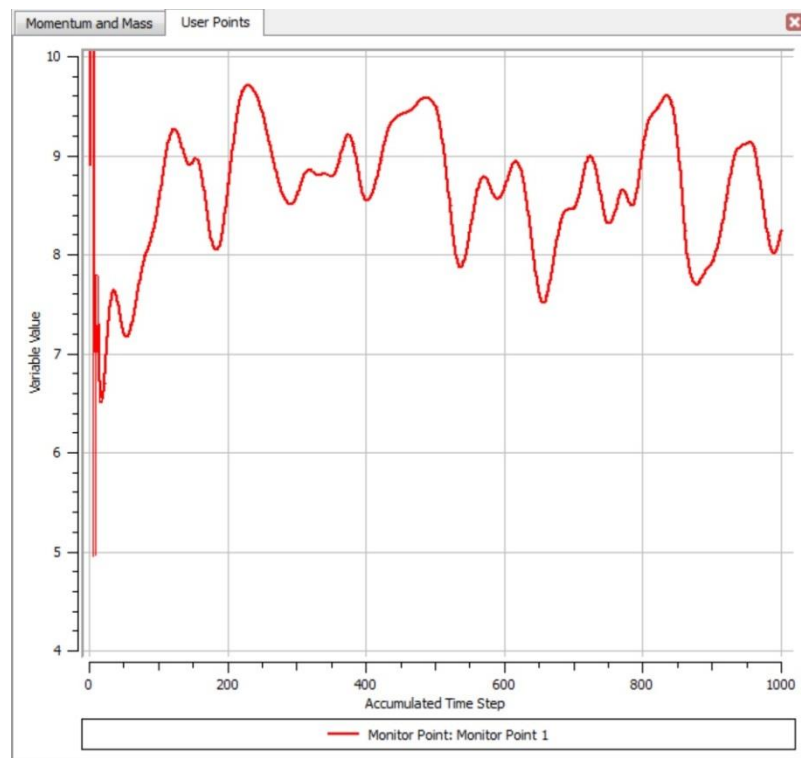
Εικόνα 3.93 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h



Εικόνα 3.94 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h

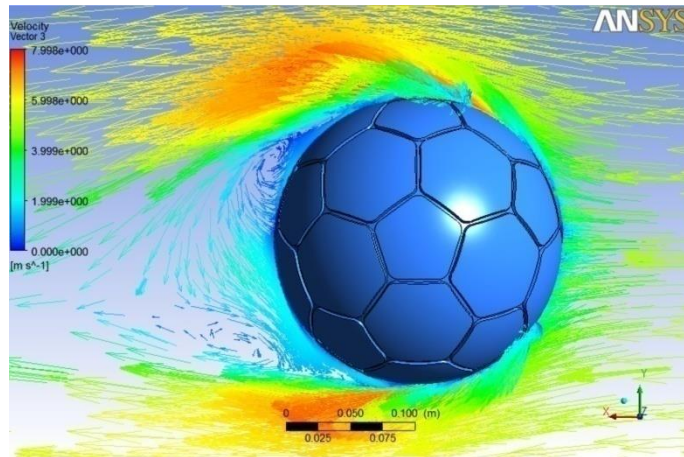


Εικόνα 3.95 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h

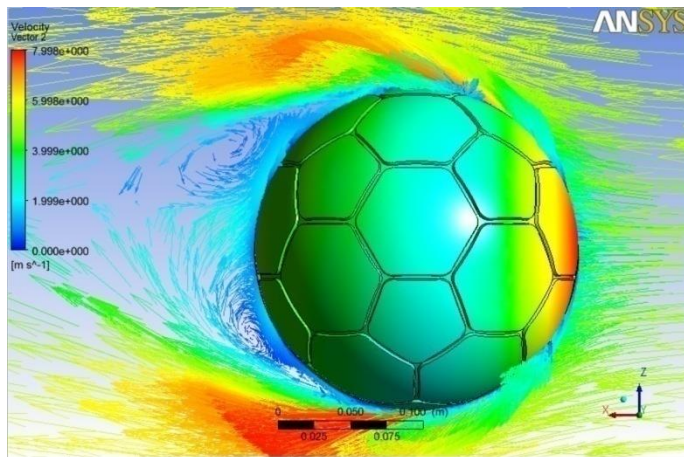


Εικόνα 3.96 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μικρότερου βάθους ραφής στα 130km/h

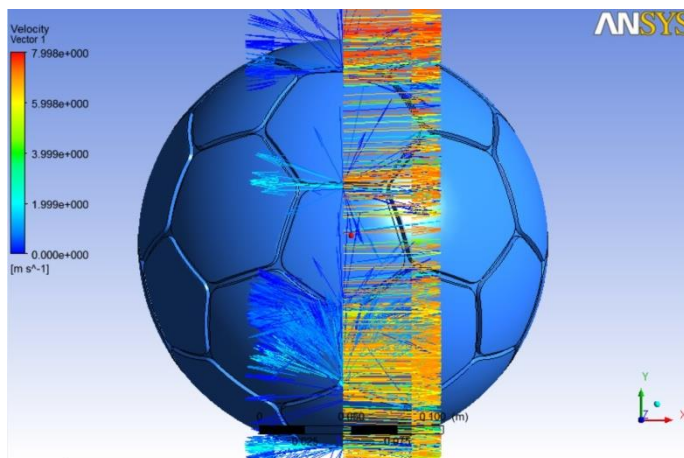
3.4.3 Αποτελέσματα μπάλας νικε



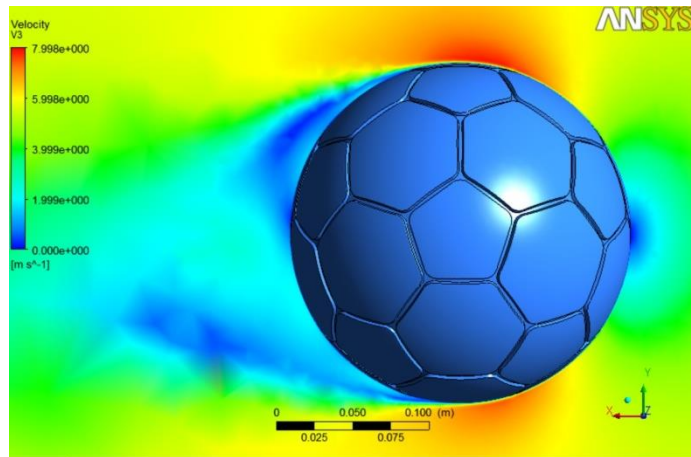
Εικόνα 3.97 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



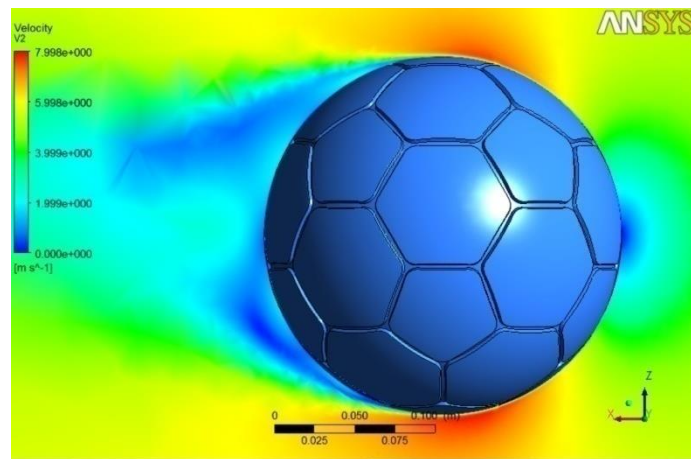
Εικόνα 3.98 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



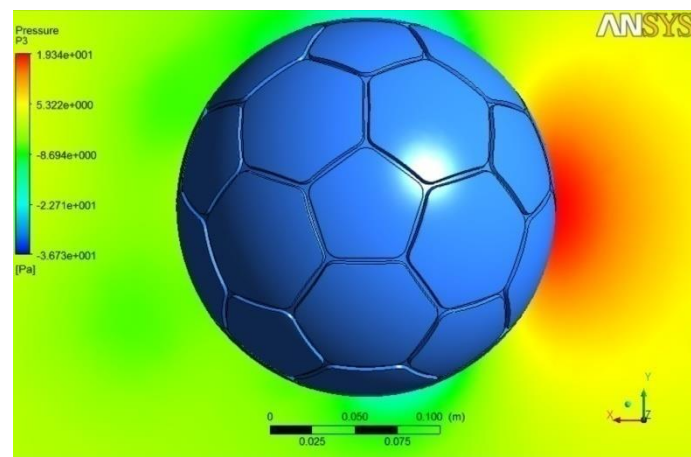
Εικόνα 3.99 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



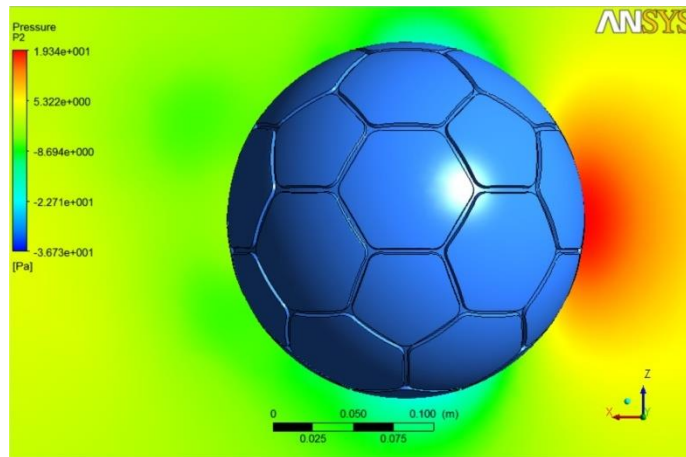
Εικόνα 3.100 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



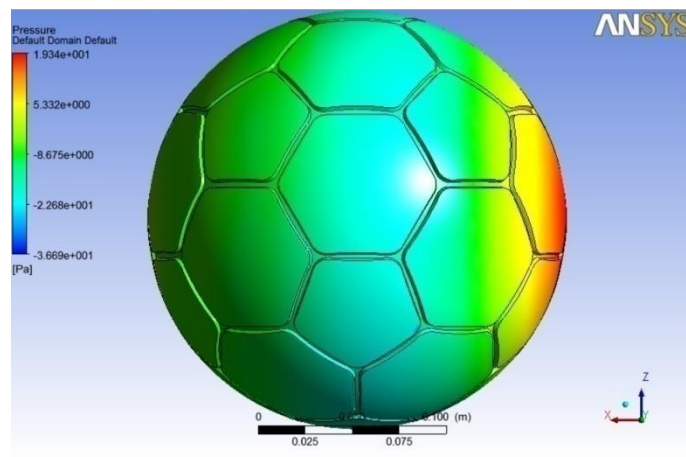
Εικόνα 3.101 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



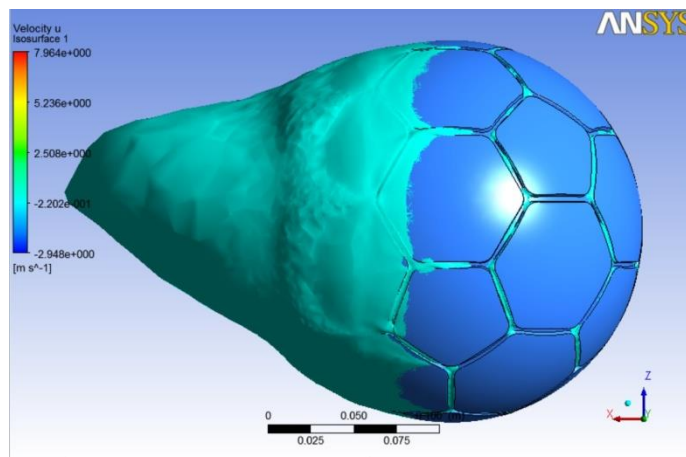
Εικόνα 3.102 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



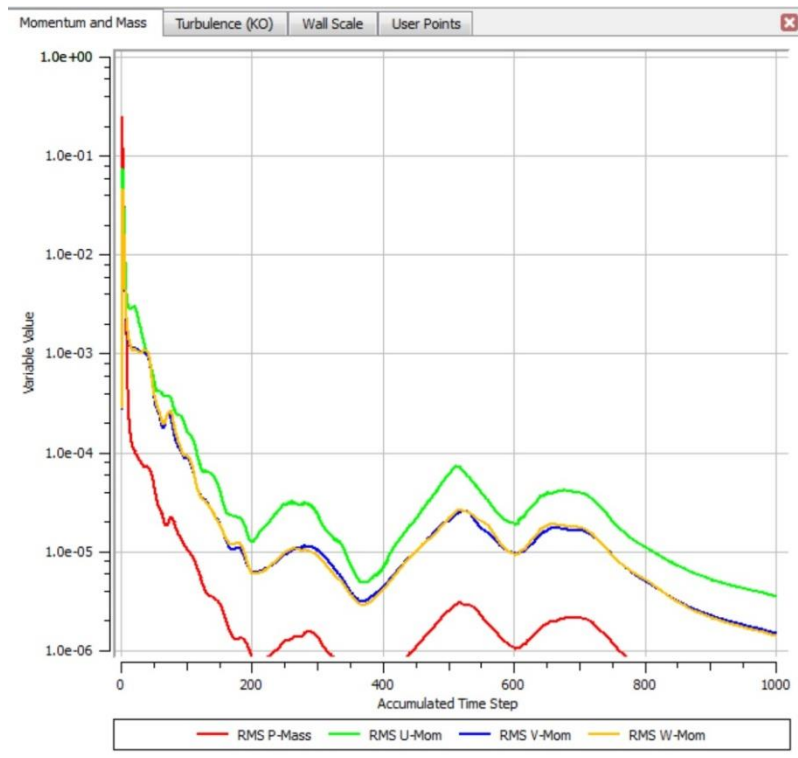
Εικόνα 3.103 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



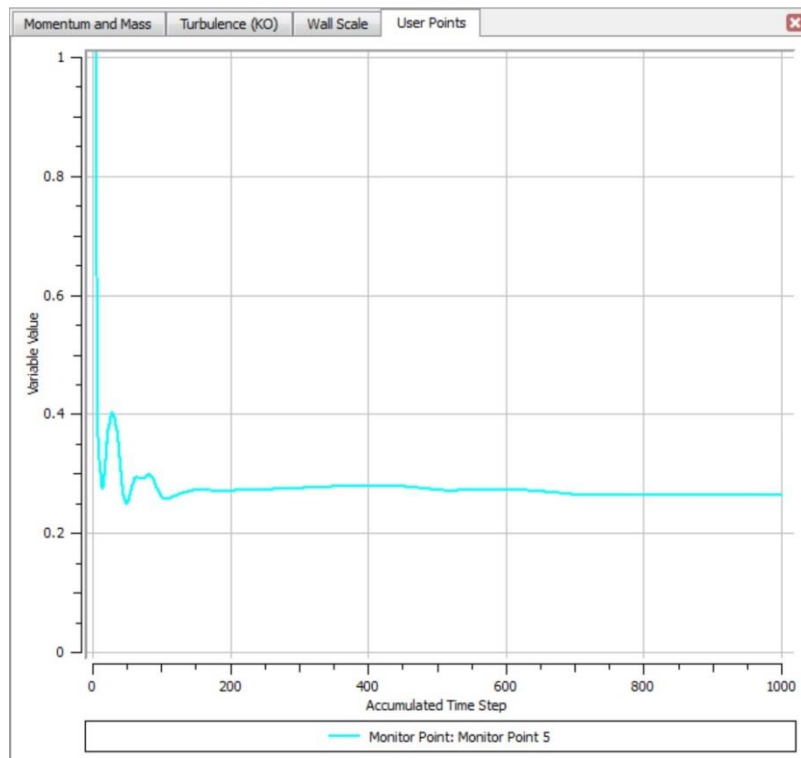
Εικόνα 3.104 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



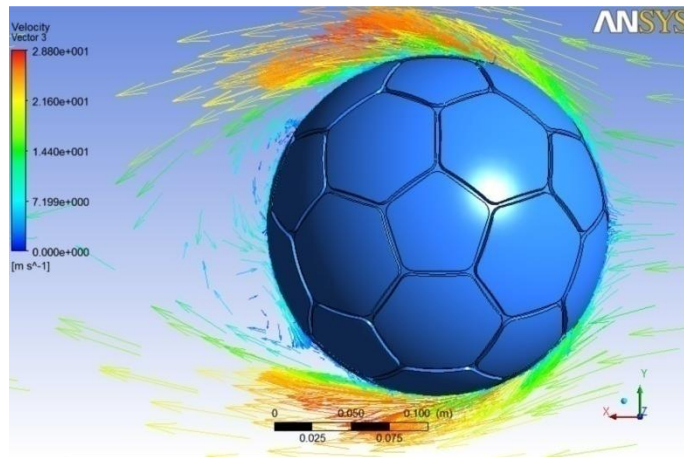
Εικόνα 3.105 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



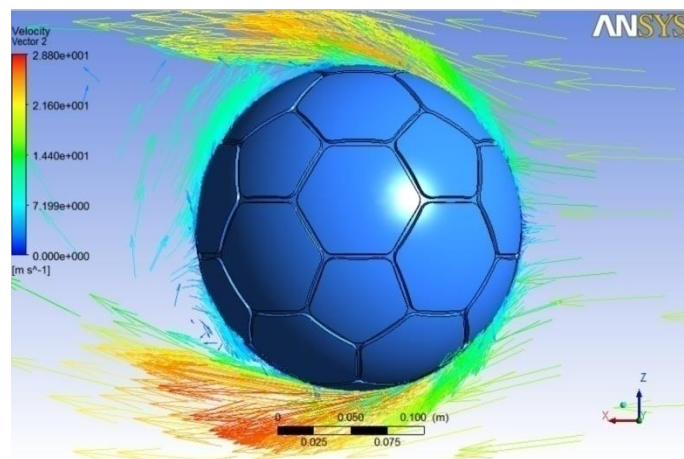
Εικόνα 3.106 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



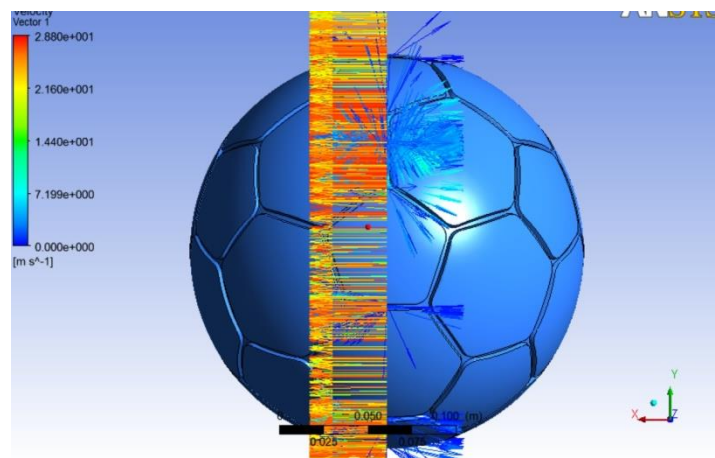
Εικόνα 3.107 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 20km/h



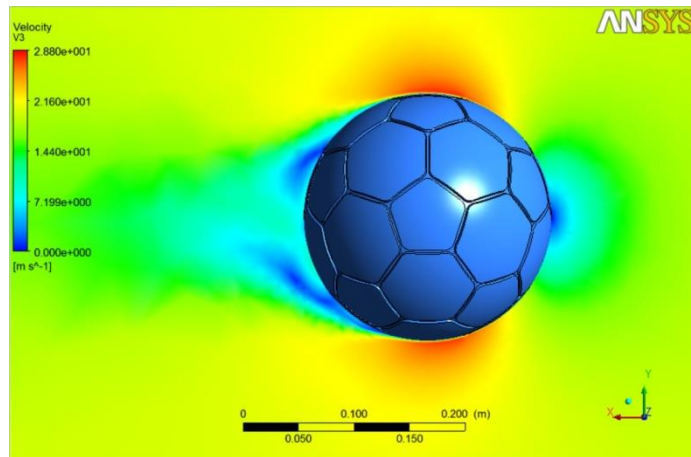
Εικόνα 3.108 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



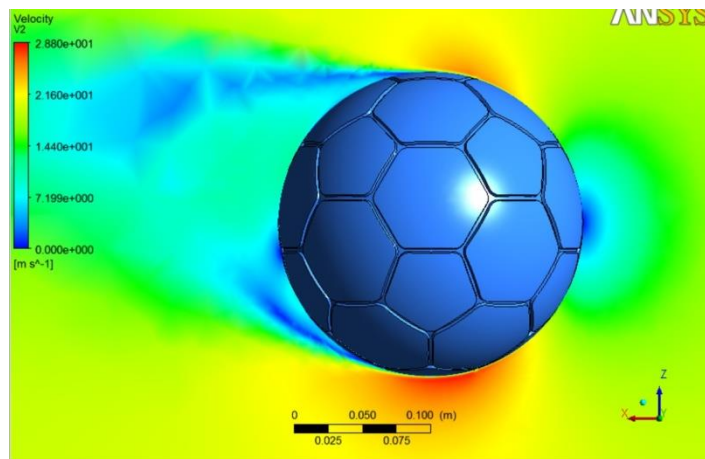
Εικόνα 3.109 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



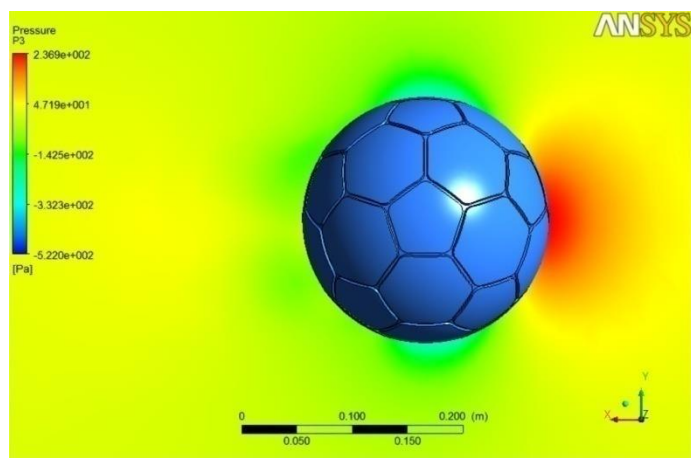
Εικόνα 3.110 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



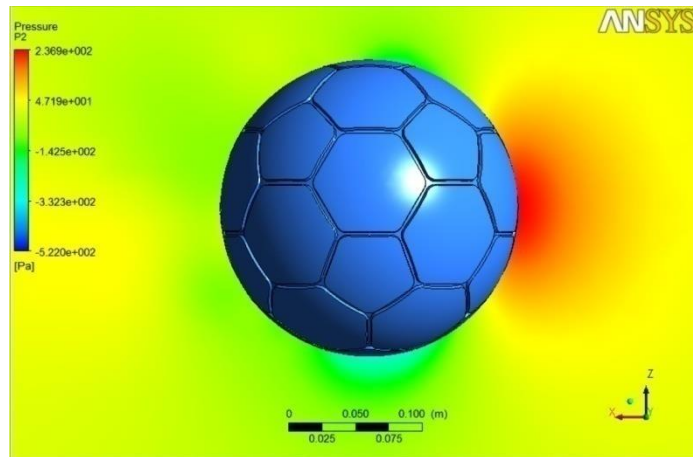
Εικόνα 3.111 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



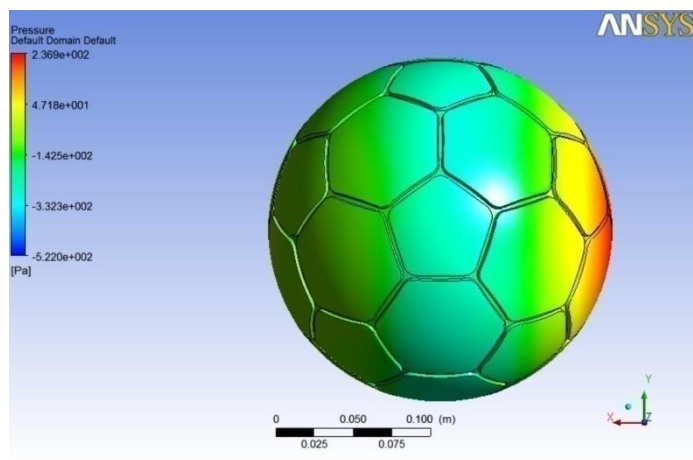
Εικόνα 3.112 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



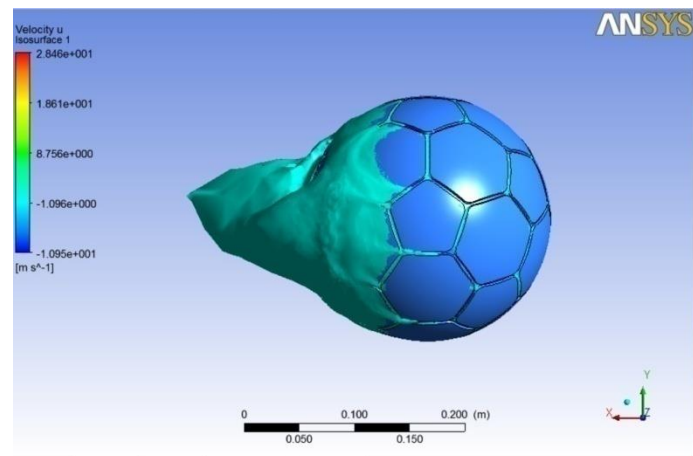
Εικόνα 3.113 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



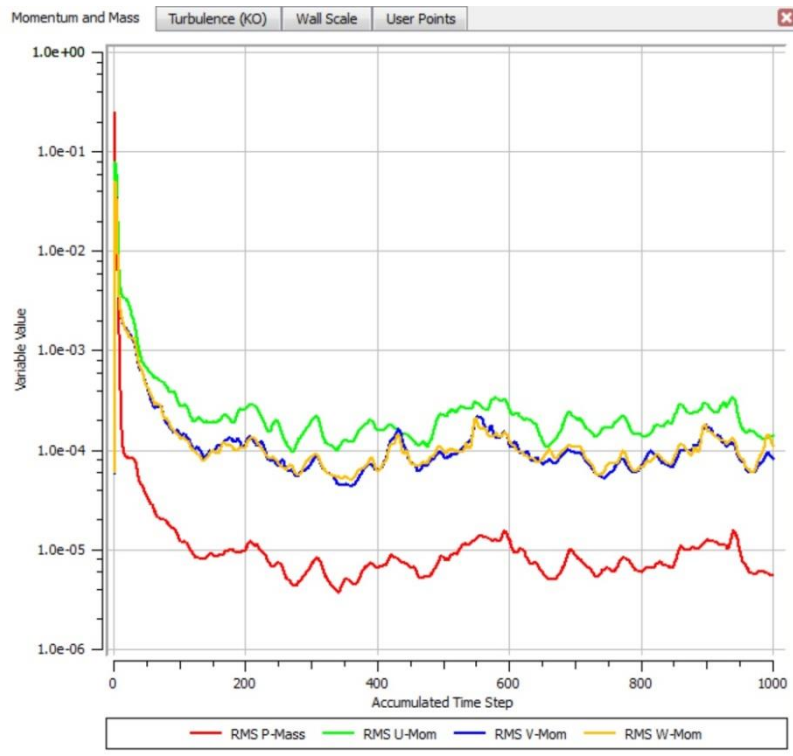
Εικόνα 3.114 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



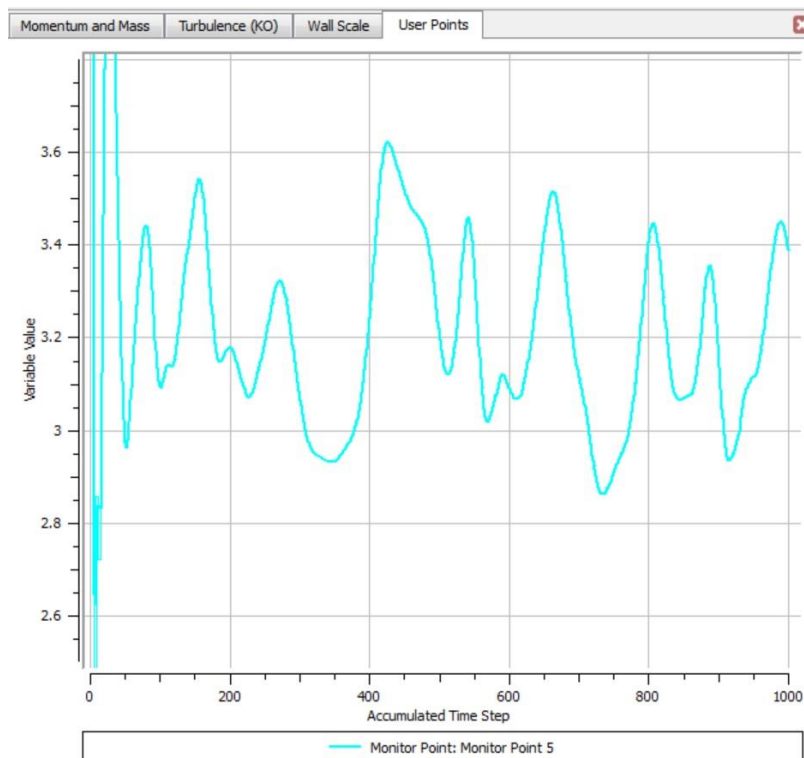
Εικόνα 3.115 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



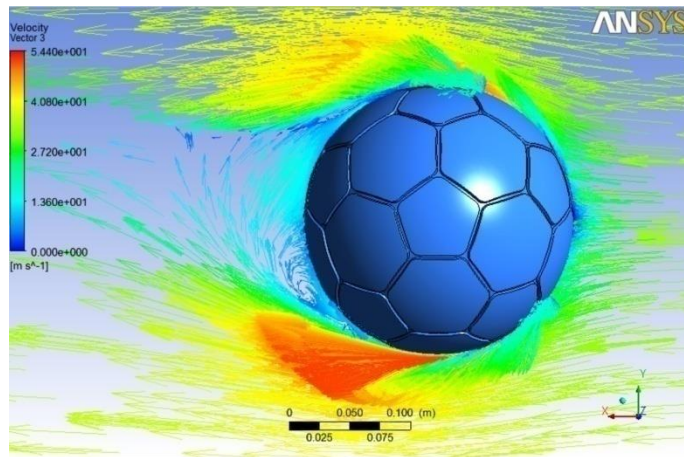
Εικόνα 3.116 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



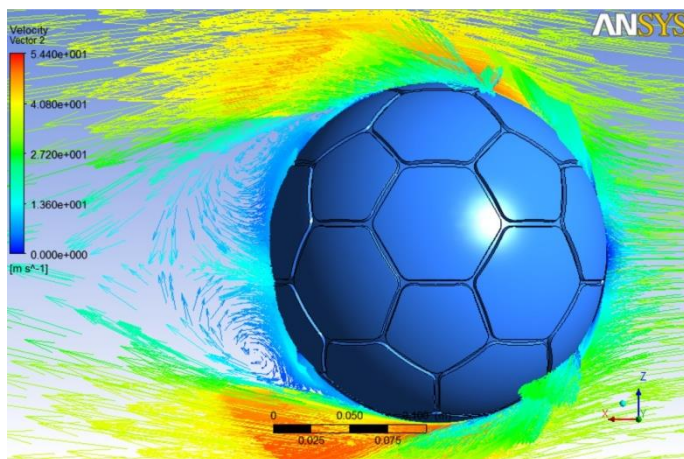
Εικόνα 3.117 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



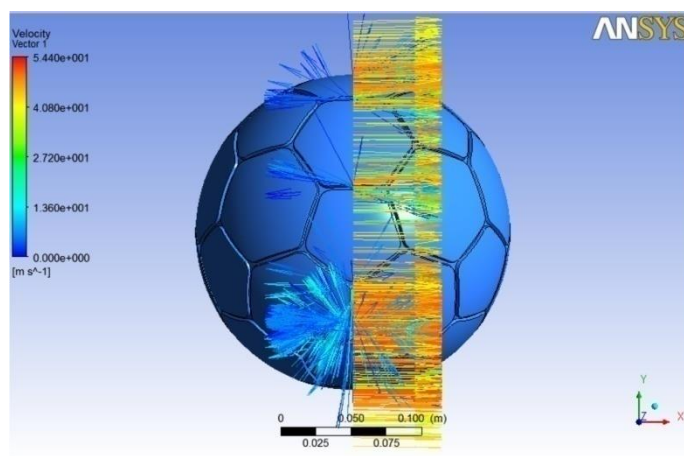
Εικόνα 3.118 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 70km/h



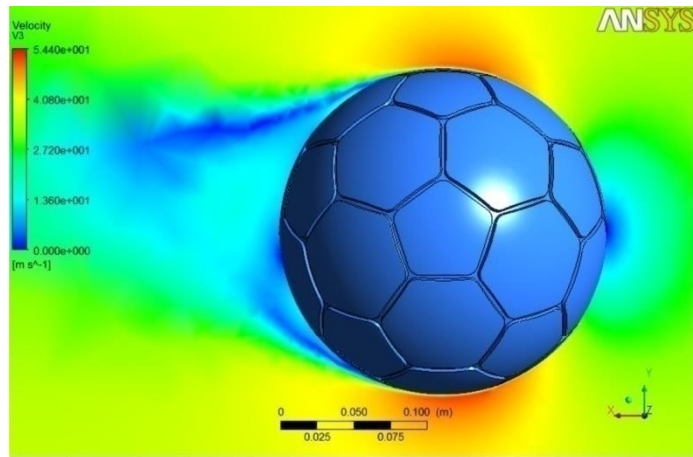
Εικόνα 3.119 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας πικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



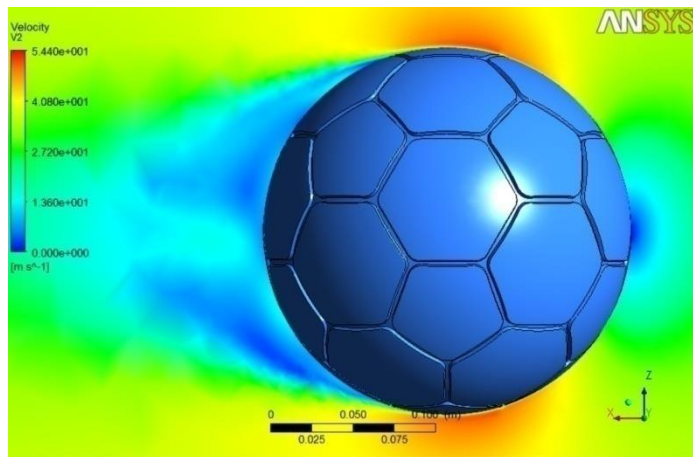
Εικόνα 3.120 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας πικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



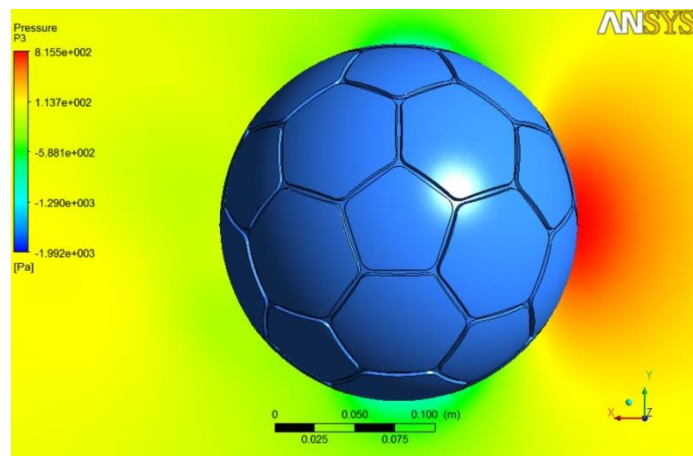
Εικόνα 3.121 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας πικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



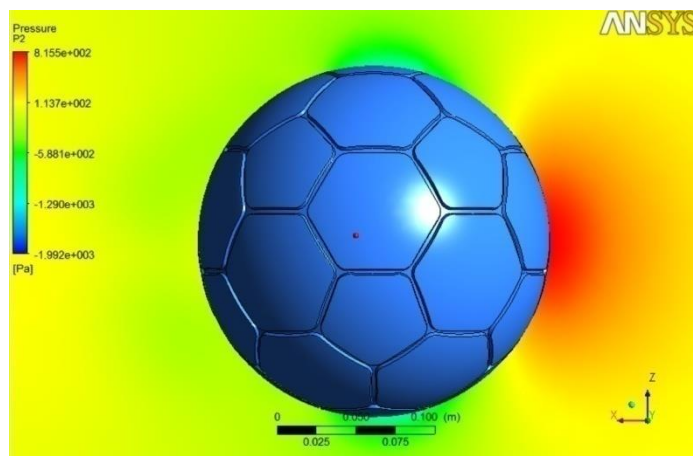
Εικόνα 3.122 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



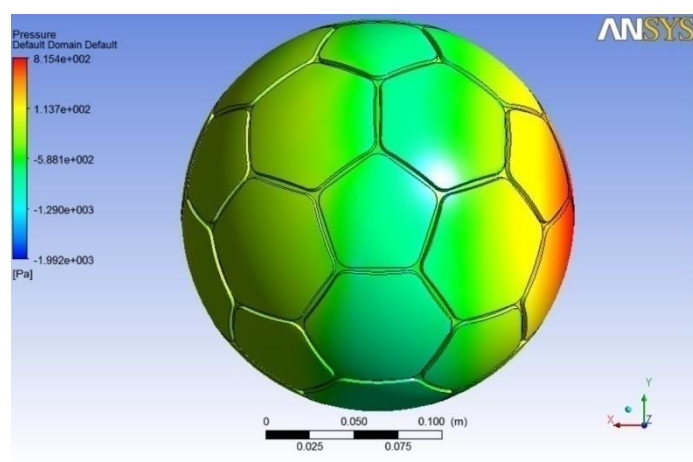
Εικόνα 3.123 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



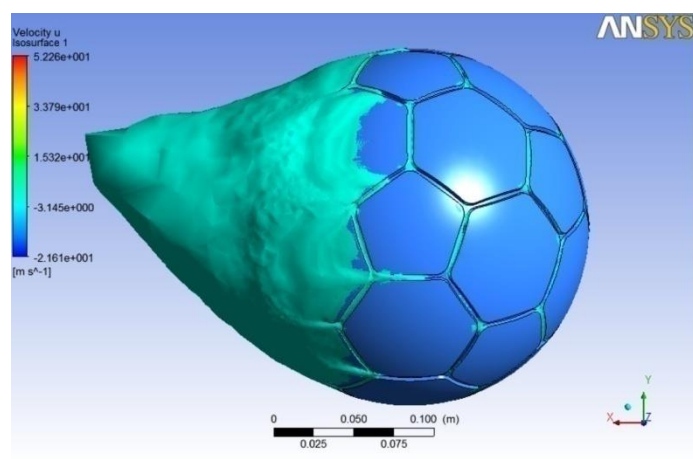
Εικόνα 3.124 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



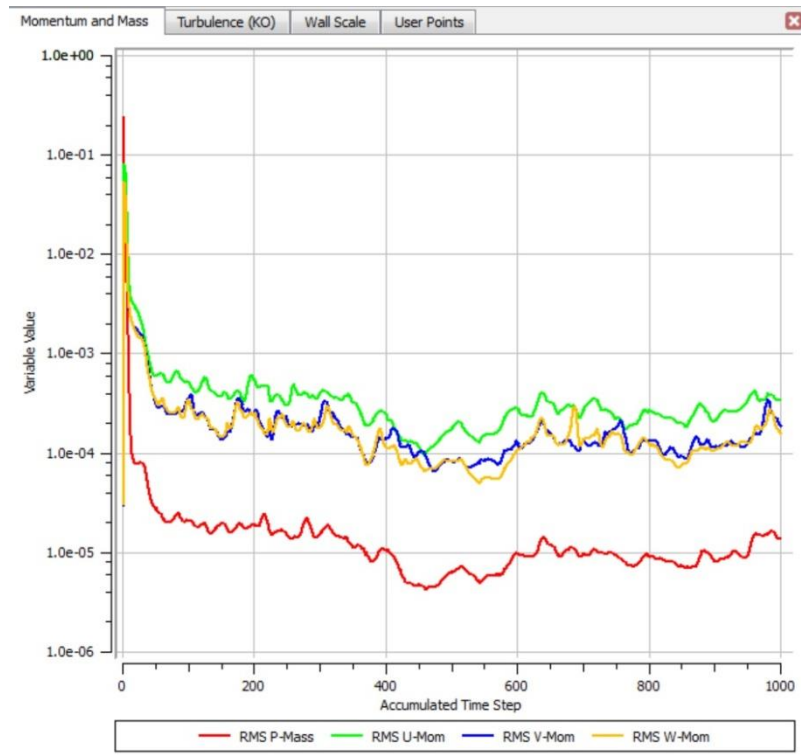
Εικόνα 3.125 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



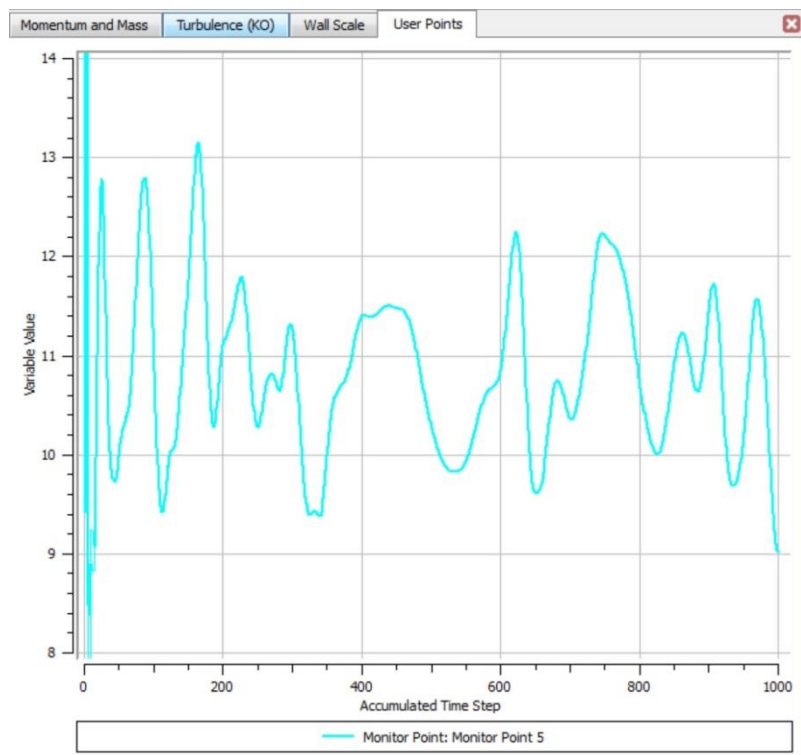
Εικόνα 3.126 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h



Εικόνα 3.127 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h

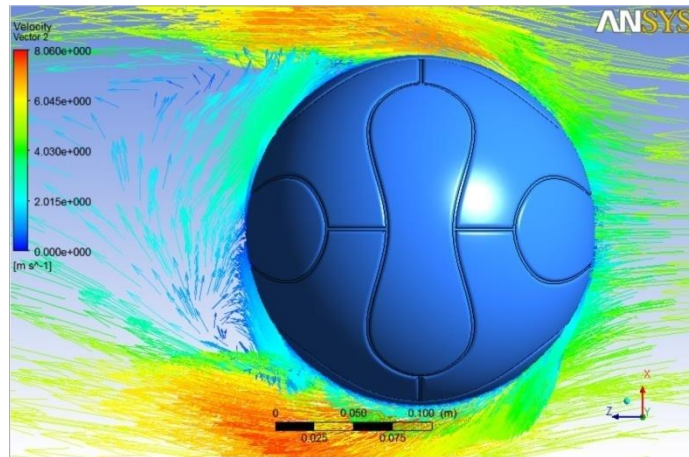


Εικόνα 3.128 : Διάγραμμα residuals μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h

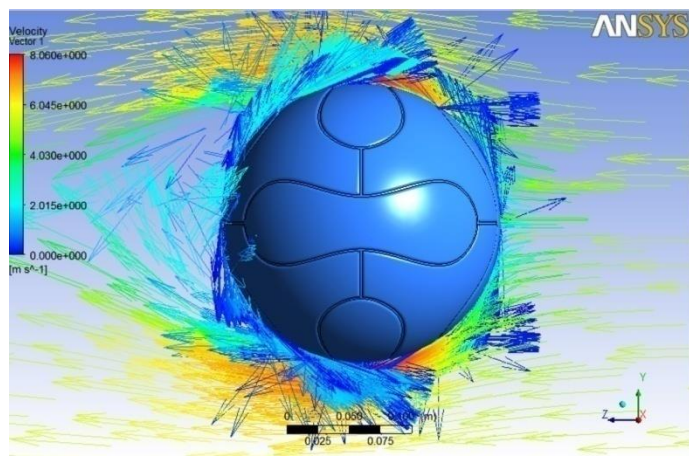


Εικόνα 3.129 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας νικε μεγαλύτερου βάθους ραφής στα 130km/h

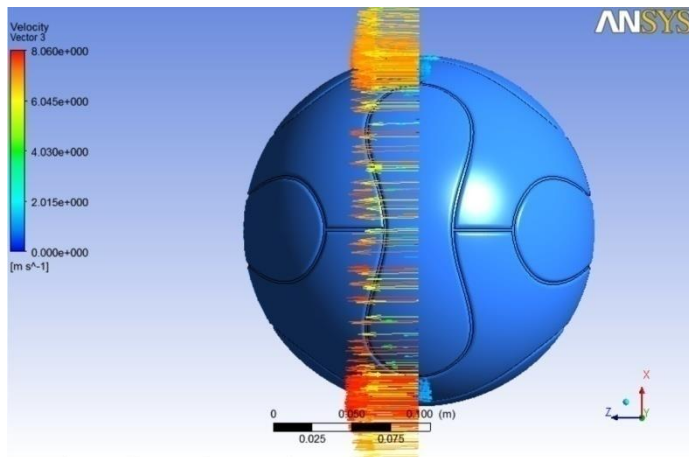
3.4.4 Αποτελέσματα μπάλας adidas



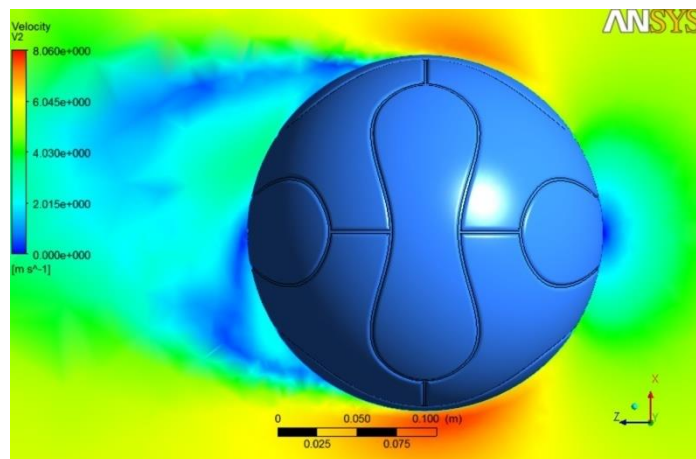
Εικόνα 3.130 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 20km/h



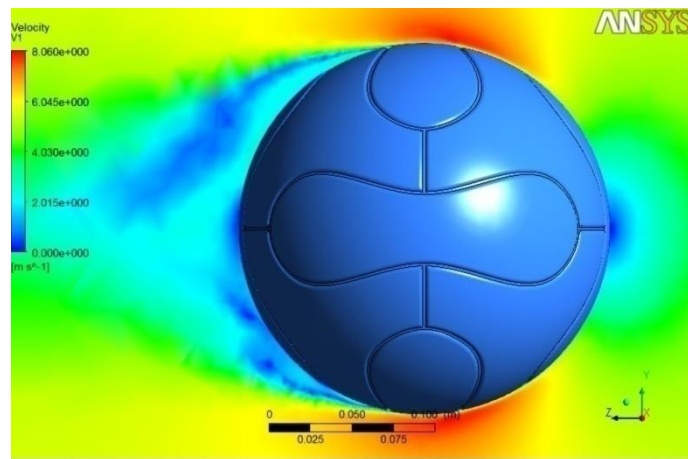
Εικόνα 3.131 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 20km/h



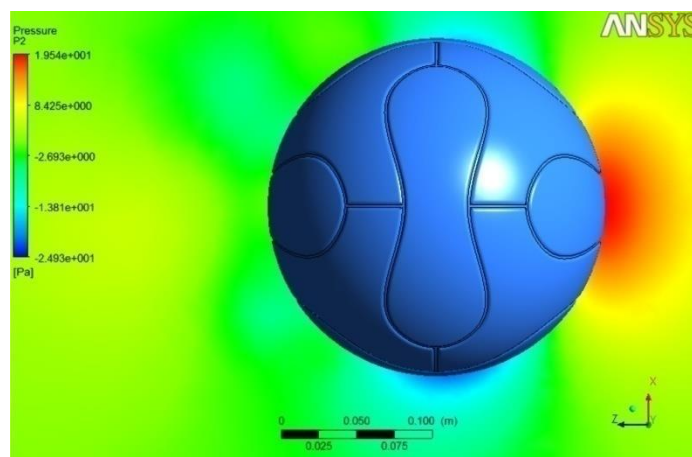
Εικόνα 3.132 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας adidas στα 20km/h



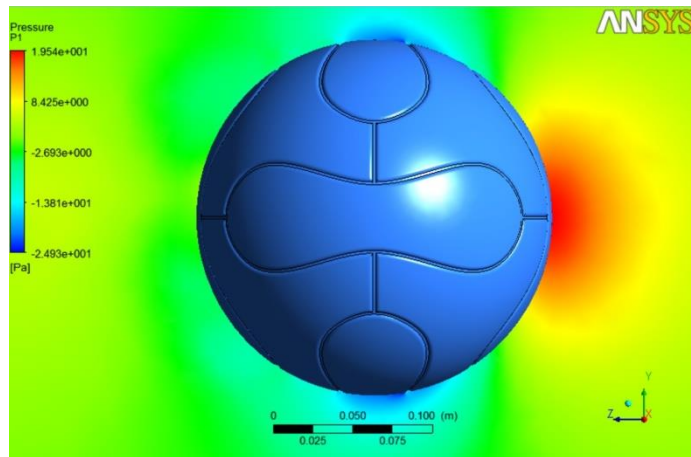
Εικόνα 3.133 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 20km/h



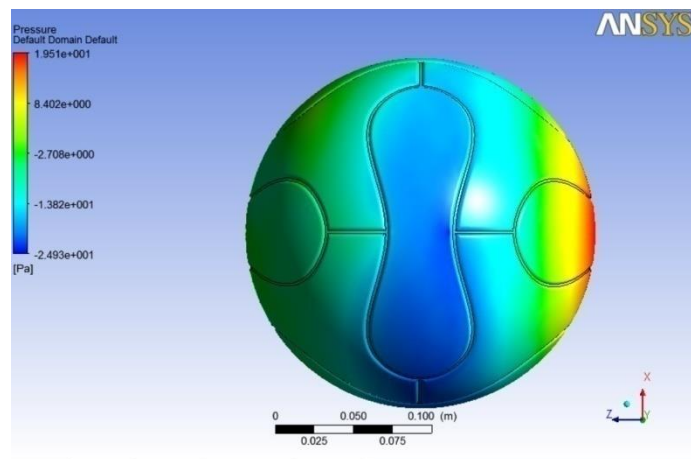
Εικόνα 3.134 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 20km/h



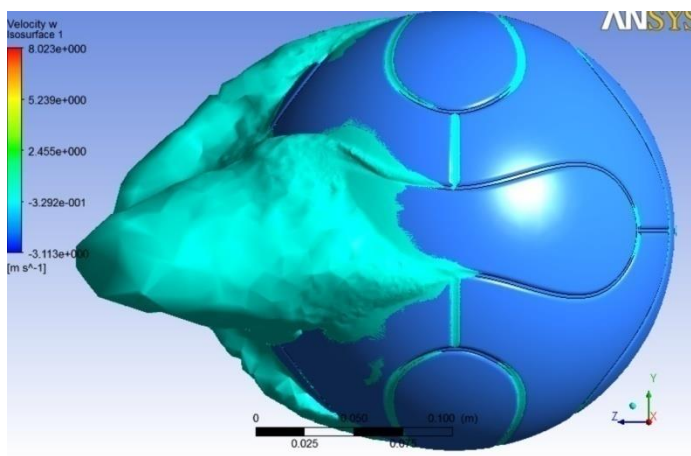
Εικόνα 3.135 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 20km/h



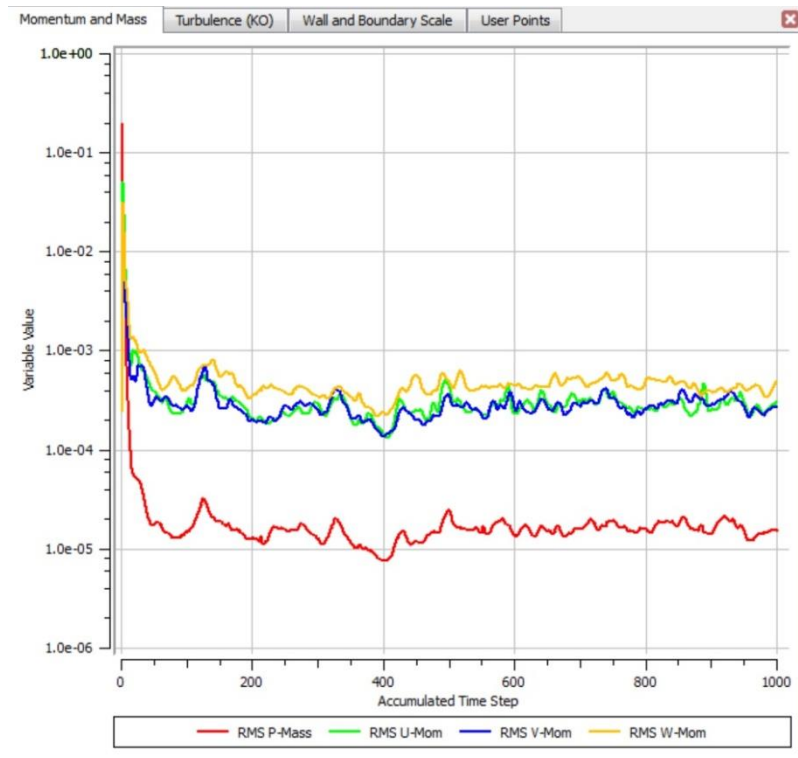
Εικόνα 3.136 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 20km/h



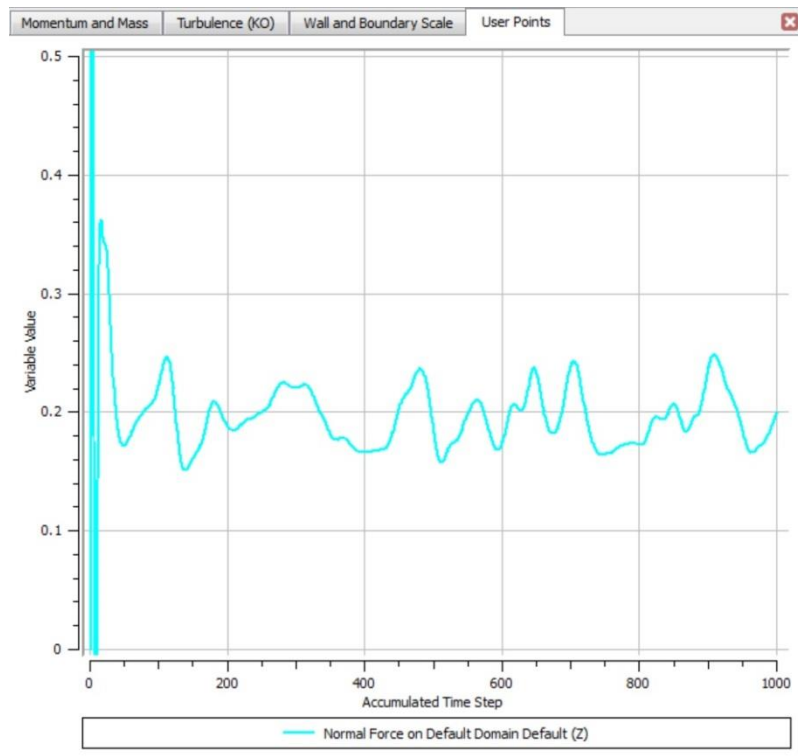
Εικόνα 3.137 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα adidas στα 20km/h



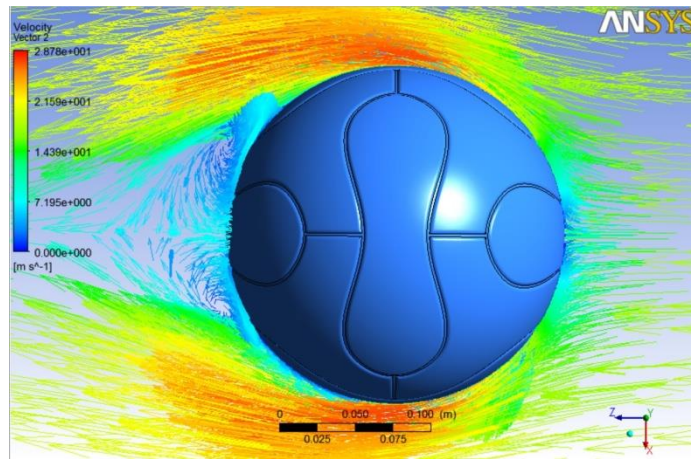
Εικόνα 3.138 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας adidas στα 20km/h



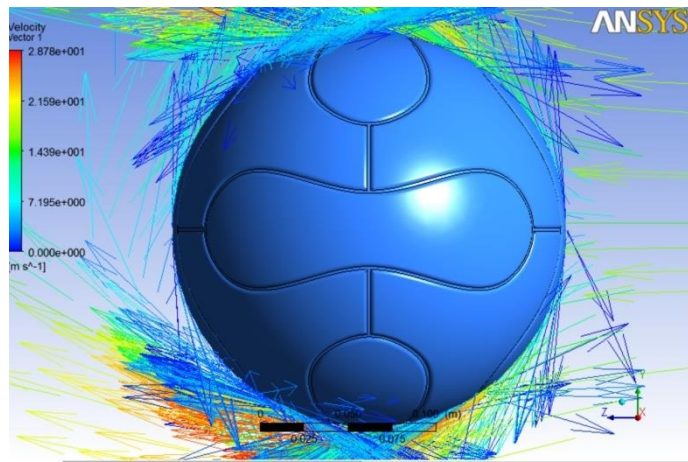
Εικόνα 3.139 : Διάγραμμα residuals μπάλας αρίδας στα 20km/h



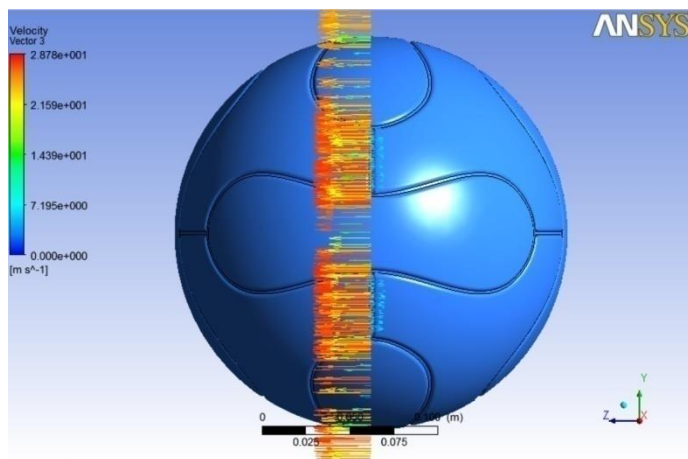
Εικόνα 3.140 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας αρίδας στα 20km/h



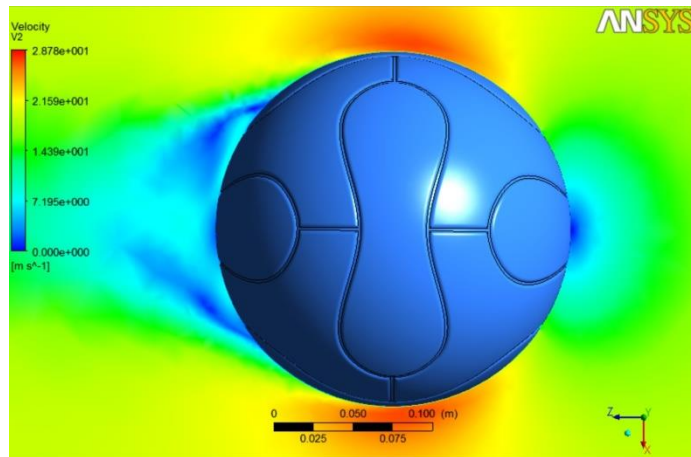
Εικόνα 3.141 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 70km/h



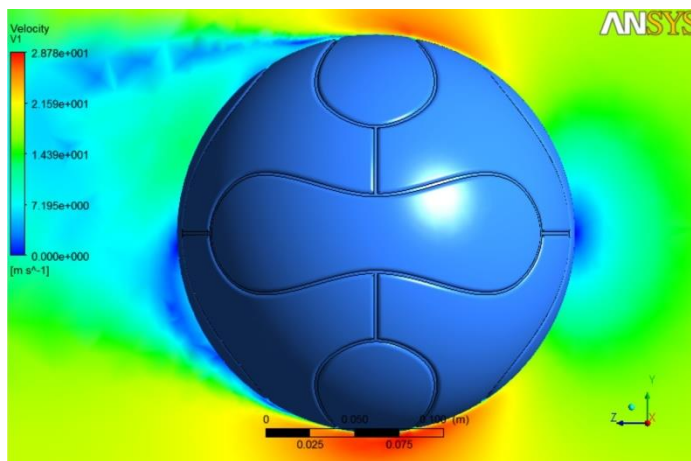
Εικόνα 3.142 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 70km/h



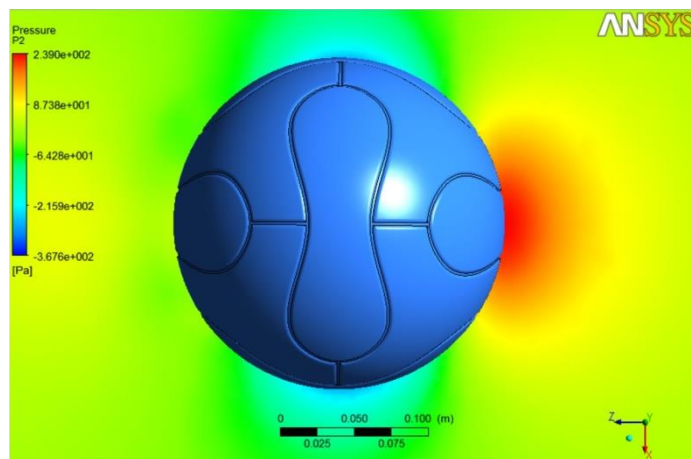
Εικόνα 3.143 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας adidas στα 70km/h



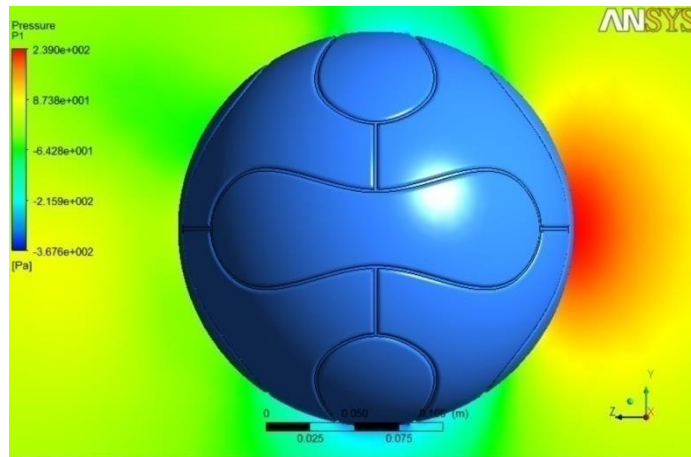
Εικόνα 3.144 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 70km/h



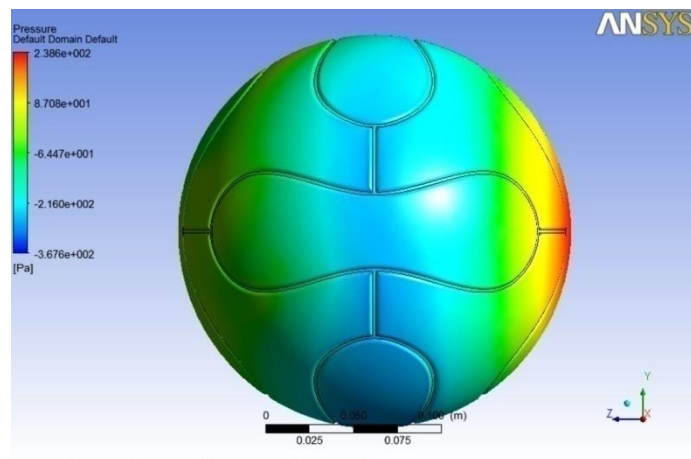
Εικόνα 3.145 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 70km/h



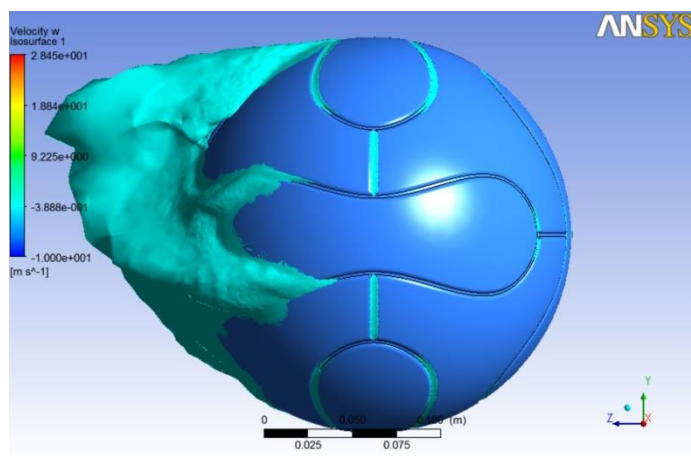
Εικόνα 3.146 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 70km/h



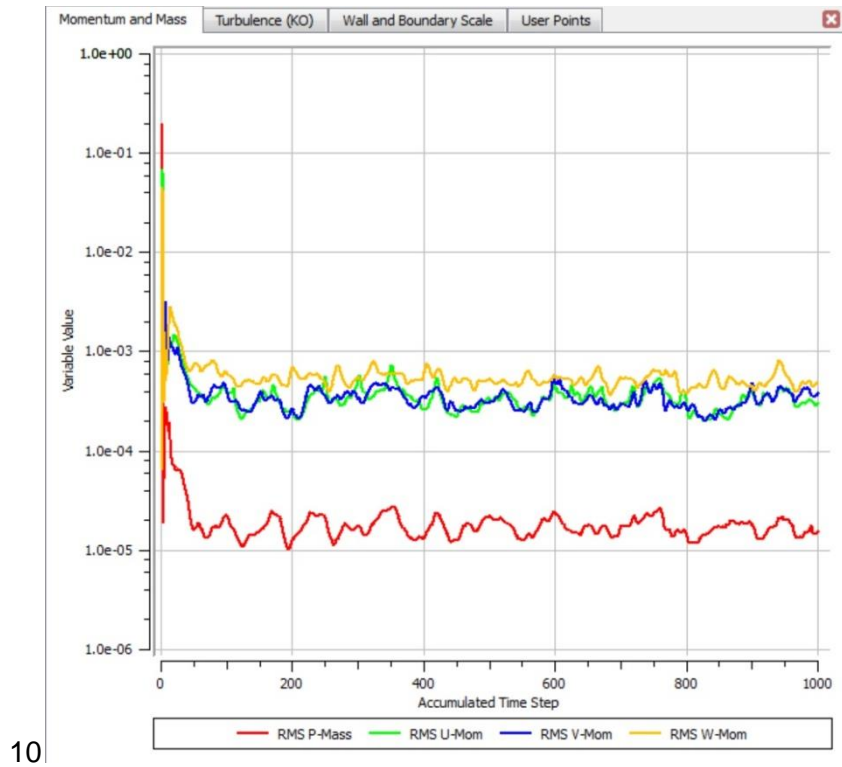
Εικόνα 3.147 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 70km/h



Εικόνα 3.148 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα adidas στα 70km/h

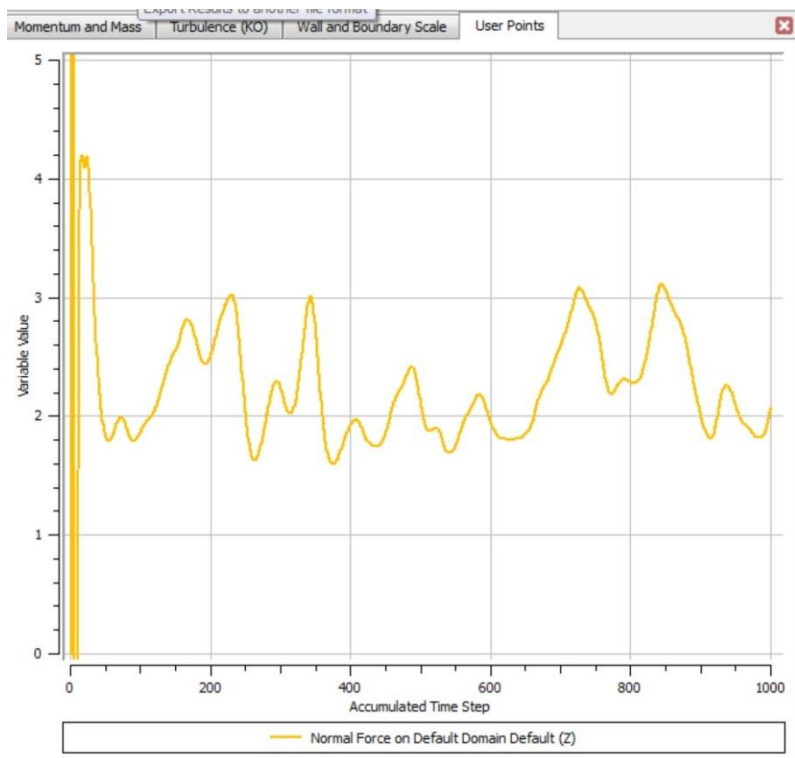


Εικόνα 3.149 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας adidas στα 70km/h

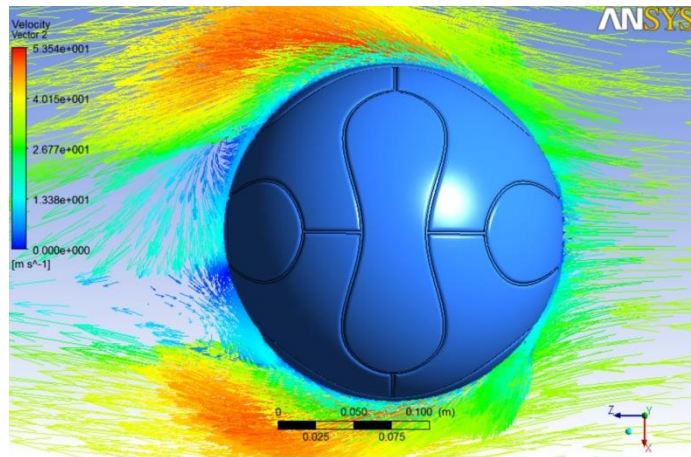


10

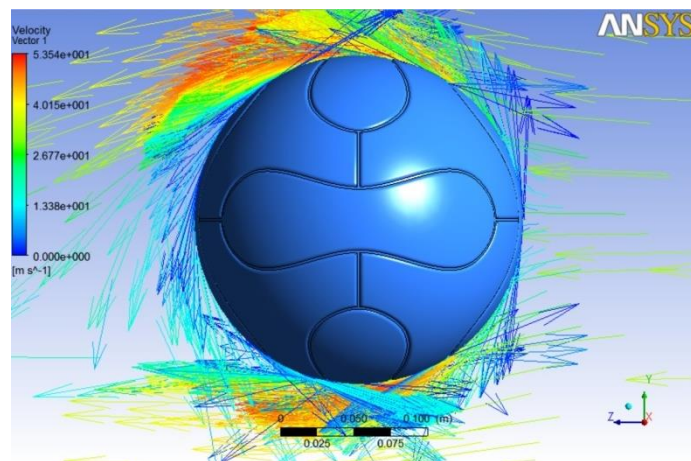
Εικόνα 3.150 : Διάγραμμα residuals μπάλας adidas στα 70km/h



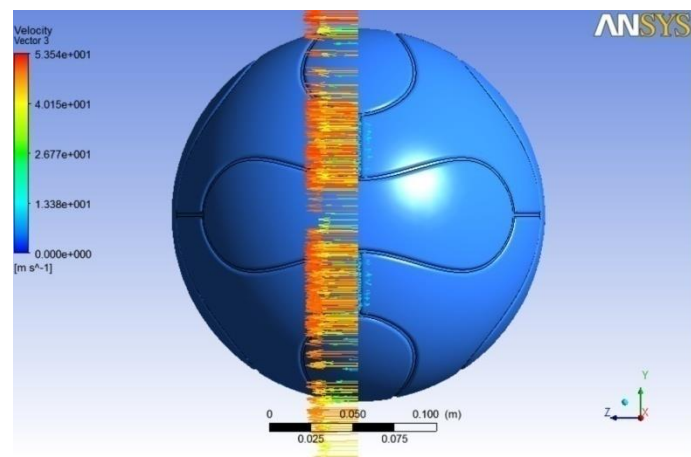
Εικόνα 3.151 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας adidas στα 70km/h



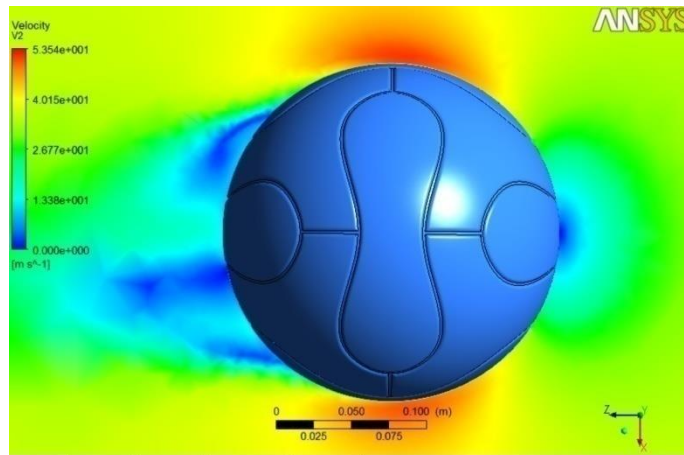
Εικόνα 3.152 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 130km/h



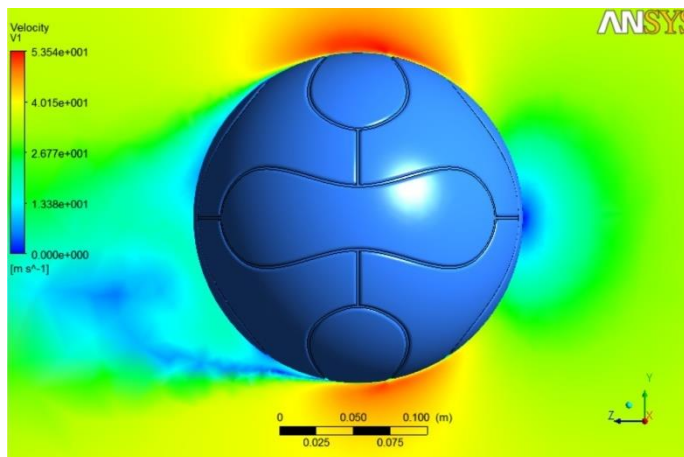
Εικόνα 3.153 : Διανύσματα ταχύτητας μπάλας adidas στα 130km/h



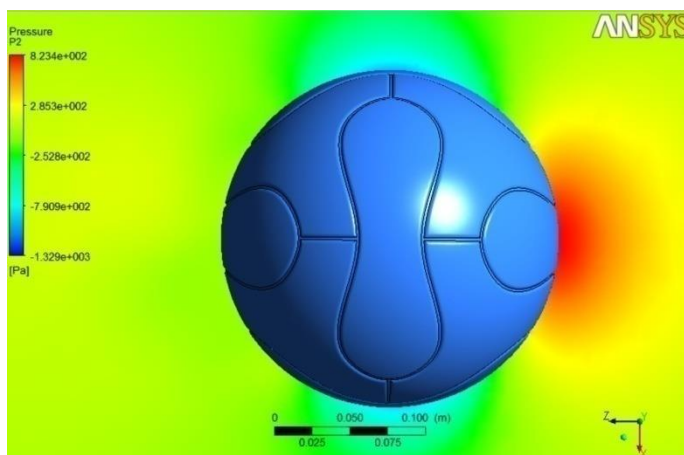
Εικόνα 3.154 : Διανύσματα ταχύτητας στο κάθετο επίπεδο μπάλας adidas στα 130km/h



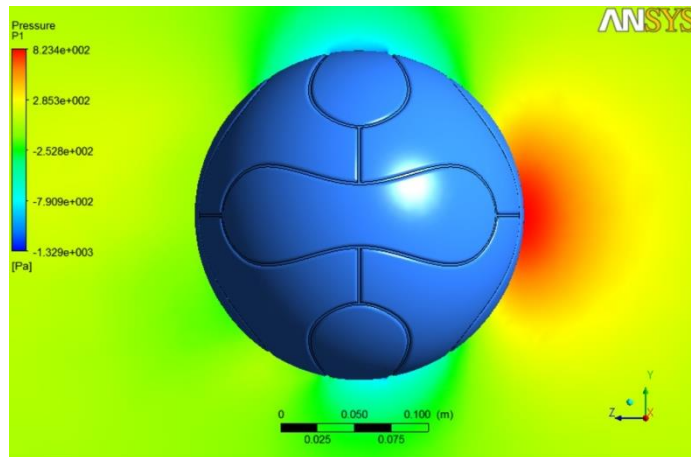
Εικόνα 3.155 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 130km/h



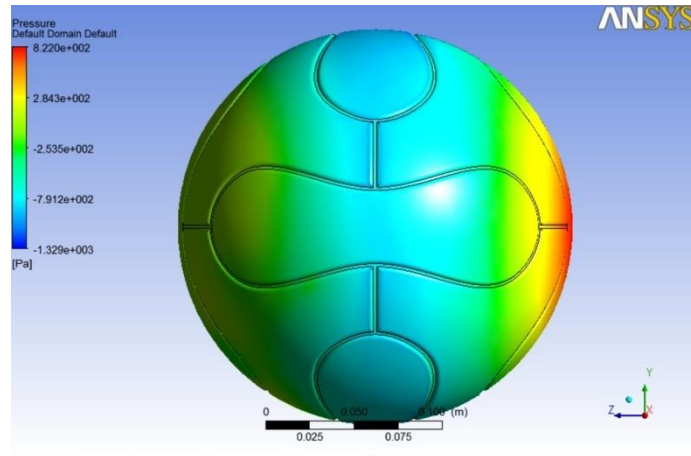
Εικόνα 3.156 : Κατανομή συνιστωσών ταχύτητας μπάλας adidas στα 130km/h



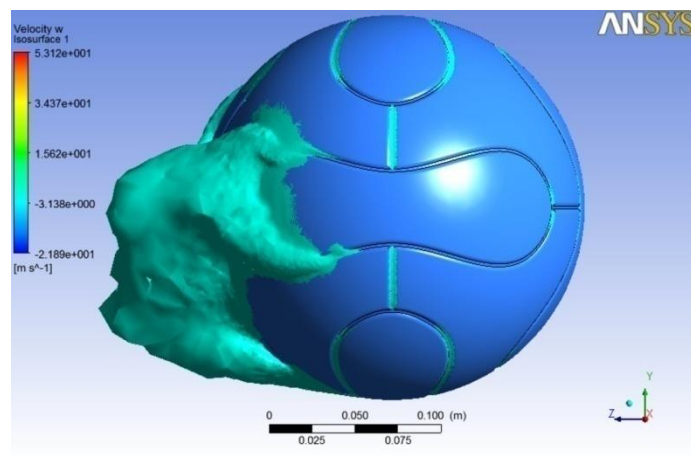
Εικόνα 3.157 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 130km/h



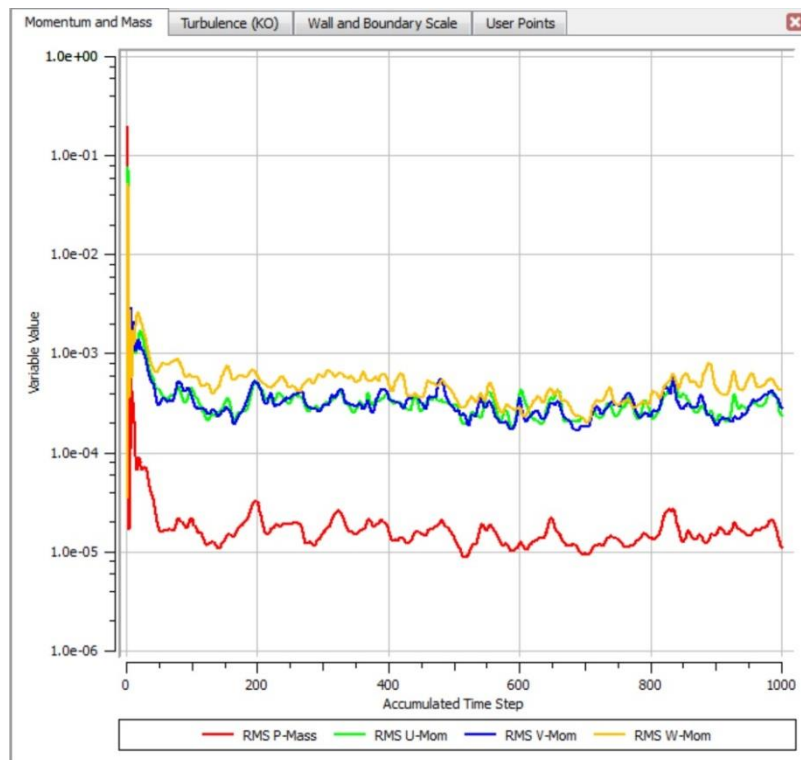
Εικόνα 3.158 : Κατανομή απόλυτης πίεσης μπάλας adidas στα 130km/h



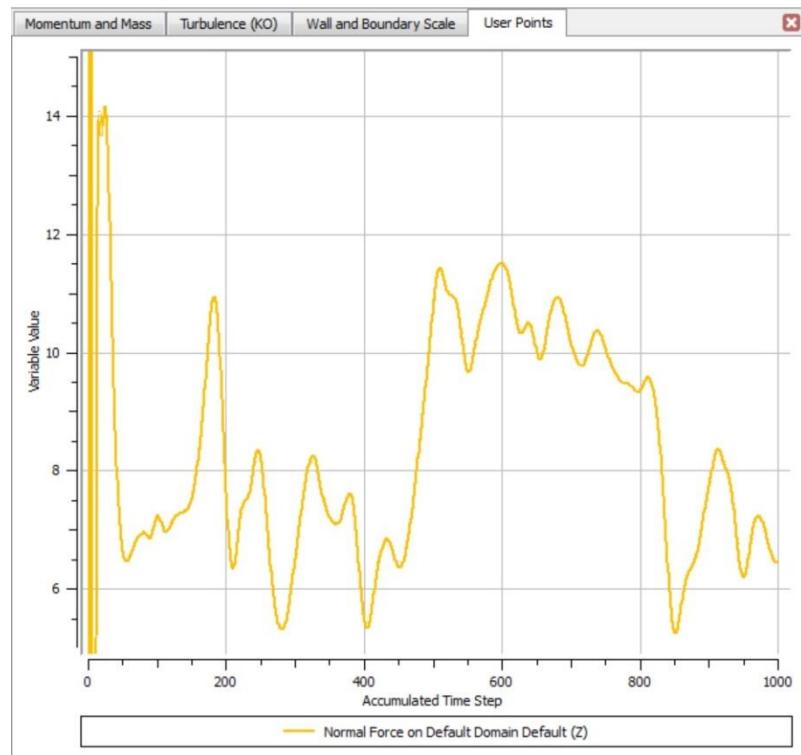
Εικόνα 3.159 : Κατανομή απόλυτης πίεσης πάνω στην μπάλα adidas στα 130km/h



Εικόνα 3.160 : Ισοεπιφάνεια αρνητικών ταχυτήτων μπάλας adidas στα 130km/h



Εικόνα 3.161 : Διάγραμμα residuals μπάλας αρίδας στα 130km/h



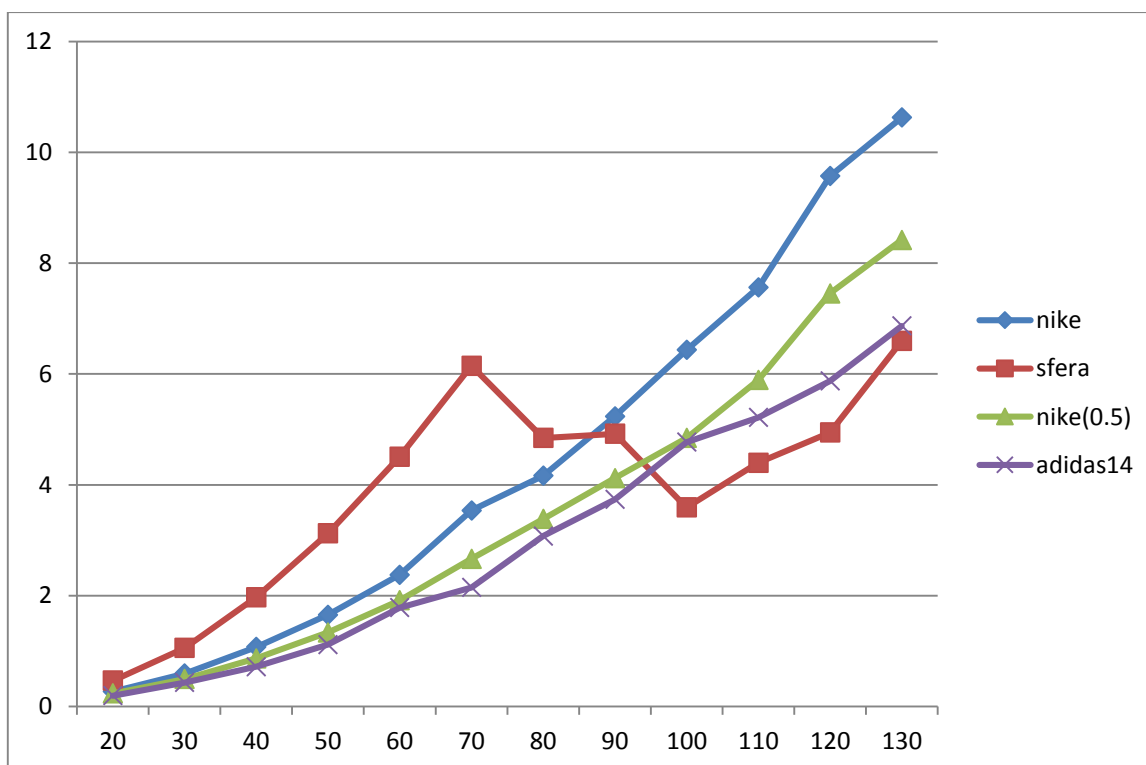
Εικόνα 3.162 : Διάγραμμα δύναμης F μπάλας αρίδας στα 130km/h

Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της δύναμης της αντίστασης F από τους υπολογισμούς του cfx-pre solver εισήχθησαν στο microsoft windows Excel, και μετά από επεξεργασία για να βρεθεί ο μέσος όρος της δύναμης της κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται οι παρακάτω πίνακες διαγράμματα.

km/h	mesos oros F(N) sferas	km/h	mesos oros F(N) nike	km/h	mesos oros F(N) nike(0,5)	km/h	mesos oros F(N) adidas
20	0,463297263	20	0,268184096	20	0,233669862	20	0,193443984
30	1,055211187	30	0,591260374	30	0,494200602	30	0,429335982
40	1,970552745	40	1,069972695	40	0,867345453	40	0,715681285
50	3,124457715	50	1,65200216	50	1,333930555	50	1,113893626
60	4,50834918	60	2,374275685	60	1,914876105	60	1,782628715
70	6,14739227	70	3,536603565	70	2,663488505	70	2,147465825
80	4,845260085	80	4,16459274	80	3,384212135	80	3,073707105
90	4,920184613	90	5,234241485	90	4,119232415	90	3,73597777
100	3,591777925	100	6,435561895	100	4,8463521	100	4,769058705
110	4,39728689	110	7,561743735	110	5,890601635	110	5,214937925
120	4,943382265	120	9,57281112	120	7,455795765	120	5,87295389
130	6,596102475	130	10,63076446	130	8,42086172	130	6,867177485

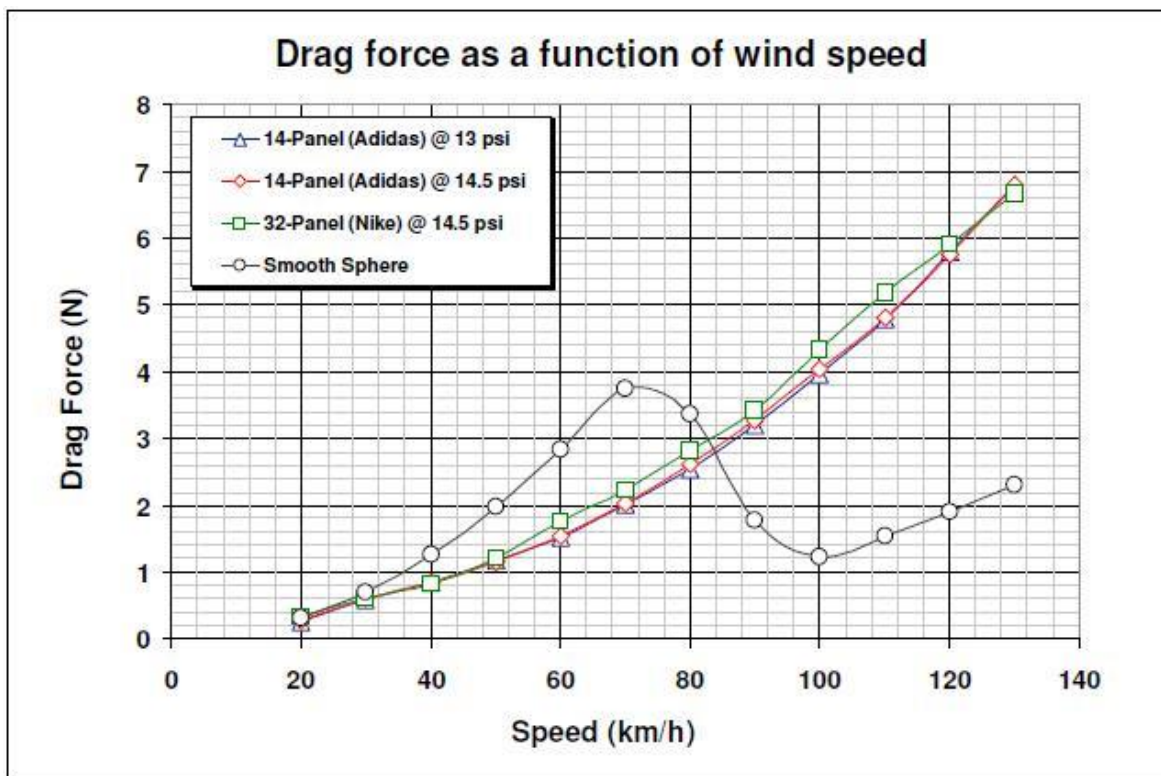
Πίνακας 3.3 Δύναμης-Ταχύτητας



Εικόνα 3.163 Διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας υπολογιστικής μοντελοποίησης

Σε σύγκριση με το διάγραμμα της εργασίας του πειράματος, τα αποτελέσματα έχουν μια ομοιομορφία παρόλο που οι τιμές της δύναμης F διαφέρουν. Η μπάλα της adidas φαίνεται να δέχεται μικρότερη αντίσταση σε σχέση με της nike και στα δύο διαγράμματα ενώ η σφαίρα μέχρι και τα 70 km/h δέχεται την μεγαλύτερη αντίσταση καθώς μετά εισέρχεται σε μεταβατική κατάσταση και ελαττώνεται η δύναμη ώσπου από τα 100 km/h μέχρι και τα 130km/h είναι η μικρότερη και στα δύο διαγράμματα. Αξιοσημείωτη είναι και η διαφορά μεταξύ των δυο μπαλών της nike. Είναι φανερό ότι η μπάλα με το μικρότερο βάθος ραφής έχει και την μικρότερη αντίσταση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα αναφέρονται στις μέσες τιμές των δυνάμεων που παρουσιάστηκαν κατά την επίλυση του πεδίου ροής το οποίο αν και επιλύθηκε ως μόνιμο στην πραγματικότητα παρουσίασε έντονα χαρακτηριστικά "μη μονιμότητας" μέσω της εκροής δυνών που παρουσιάστηκε στον απόρο του των μπαλών. Παρόλα αυτά για λόγους κυρίως υπολογιστικής ισχύος δεν επιχειρήθηκε μη μόνιμη επίλυση του πεδίου ροής.



Εικόνα 3.164 Διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας του πειράματος

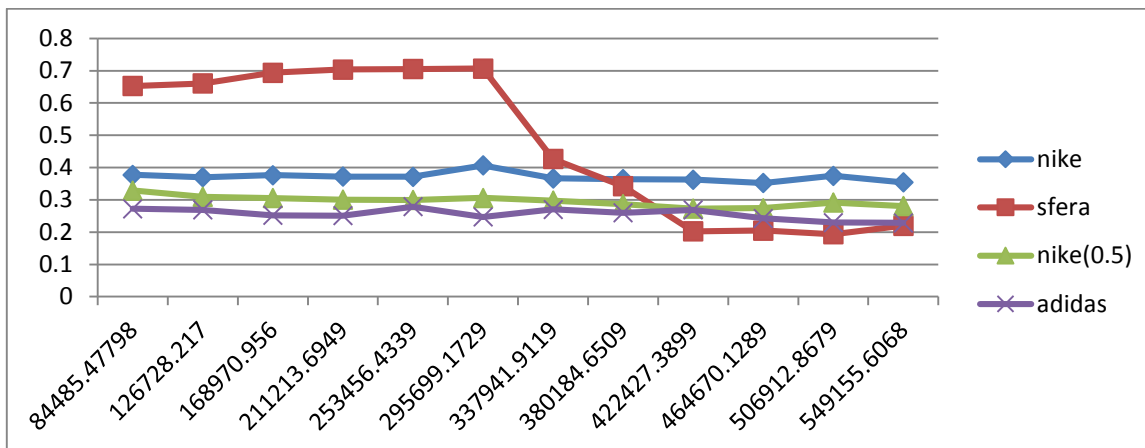
m/s	Cd sferas	m/s	Cd nike
5,555556	0,652494969	5,555556	0,377703015
8,333333	0,66050225	8,333333	0,370095401
11,11111	0,693817909	11,11111	0,37672994
13,88889	0,704063884	13,88889	0,372261417
16,66667	0,70549261	16,66667	0,371540421
19,44444	0,706760503	19,44444	0,406600328
22,22222	0,42649559	22,22222	0,366581031
25	0,342195114	25	0,364037531
27,77778	0,202342402	27,77778	0,362546649
30,55556	0,204727817	30,55556	0,352057831
33,33333	0,193392277	33,33333	0,374502242
36,11111	0,219876145	36,11111	0,354368586

Πίνακας 3.4 Cd-Ταχύτητας

m/s	Cdn nike(0,5)	m/s	Cd adidas
5,5556	0,329094129	5,55556	0,272441122
8,3333	0,309341498	8,33333	0,268739931
11,111	0,305386298	11,1111	0,2519864
13,889	0,235310468	13,8889	0,251004284
16,667	0,299650912	16,6667	0,278956074
19,444	0,306219026	19,4444	0,246892334
22,222	0,297889386	22,2222	0,270557721
25	0,286489495	25	0,259834425
27,778	0,273018696	27,7778	0,268664381
30,556	0,274253202	30,5556	0,242795815
33,333	0,291681534	33,3333	0,229758466
36,111	0,28070313	36,1111	0,228912228

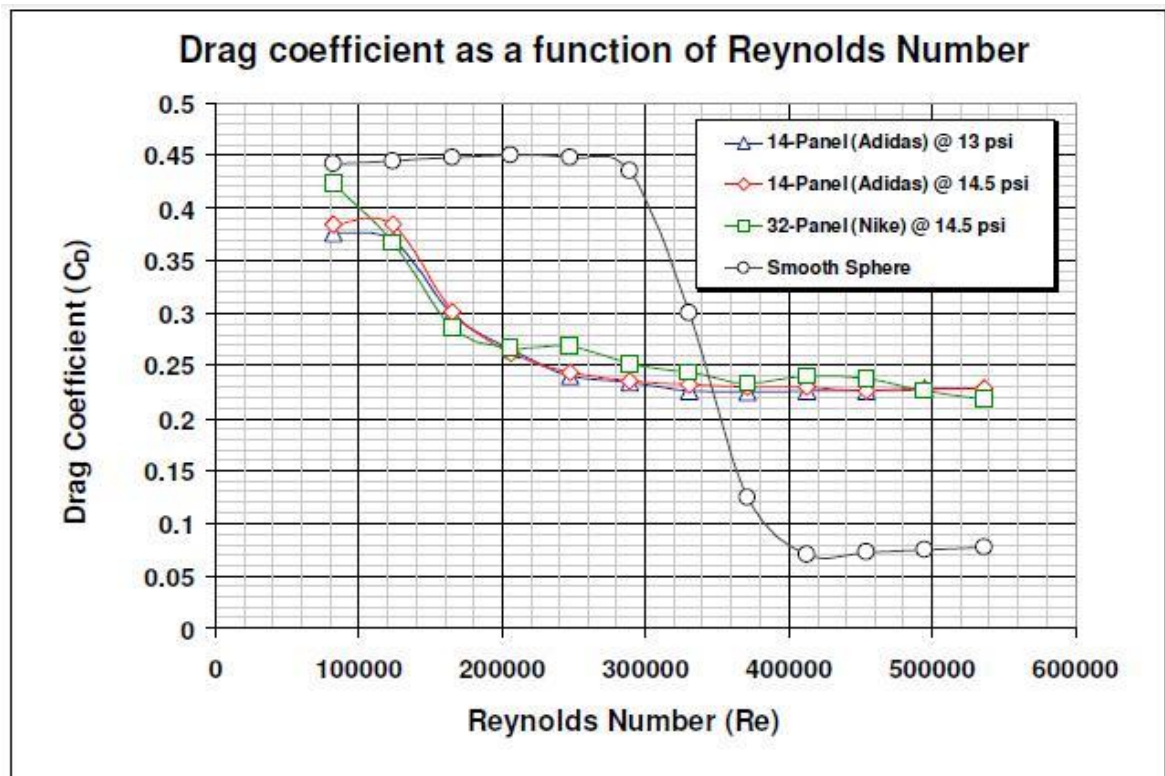
Πίνακας 3.5 Cd-Ταχύτητας

Στα διαγράμματα των Cd-Reynolds παρατηρείται μια σημαντική διαφορά του Cd των μπαλών για τις αρχικές τιμές του αριθμού Reynolds (από 80.000 έως 160.000). Στο διάγραμμα του πειράματος οι τιμές του cd ξεκινάνε υψηλές, πέφτοντας σταδιακά μέχρι η τιμή του Reynolds να ξεπεράσει τις 160.000 όπου και ομαλοποιούνται, ενώ στο υπολογιστικό διάγραμμα οι τιμές του Cd είναι ομαλές από την αρχή.



Εικόνα 3.163 Διάγραμμα Cd-Reynolds υπολογιστικής μοντελοποίησης

Ο συντελεστής αντίστασης της σφαίρας είναι μεγαλύτερος και στα δυο διαγράμματα από όλες τις μπάλες, για τιμές του Reynolds από 80.000 έως 380.000. Από τις 300.000 μέχρι τις 400.000 συνεχώς μειώνεται λόγω της μεταβατικής κατάστασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή ενώ από τις 400.000 και μετά έχει φτάσει στις κατώτερες τιμές. Όπως και με τα διαγράμματα των δυνάμεων έτσι και εδώ η adidas έχει τον μικρότερο συντελεστή οπισθέλκουσας και ακολουθούν η nike με μικρότερο βάθος ραφής και η nike με μεγαλύτερο βάθος ραφής.



Εικόνα 3.163 Διάγραμμα C_D - $Reynolds$ του πειράματος

Οι διαφορές των τιμών μεταξύ του πειράματος και των υπολογισμών είναι λογικό να υπάρχουν γιατί δεν είναι δυνατόν να σχεδιαστούν επακριβώς οι γεωμετρίες των πραγματικών μπαλών. Η μέθοδος θερμικής κόλλησης των πάνελ για την μπάλα της adidas, όπως επίσης και οι κλασικές ραφές της μπάλας nike έχουν αντικατασταθεί για λόγους ευκολίας με αυλάκια

Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά καθώς διακρίνονται καθαρά οι διαφορές μεταξύ των μπαλών και της σφαίρας.

Κεφάλαιο 5: Προτάσεις για μελλοντική επέκταση της εργασίας

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια κατανόησης της αεροδυναμικής συμπεριφοράς διαφόρων μπαλών ποδοσφαίρου. Ωστόσο για λόγους υπολογιστικής ισχύος, οι επιλύσεις που έγιναν δεν αναπαριστούν με απόλυτη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες κατά τις οποίες βρίσκεται μία μπάλα μετά από ένα ελεύθερο χτύπημα. Για εμβάθυνση της μελέτης και αποτελέσματα που έρχονται πιο κοντά στην απεικόνιση της πραγματικότητας προτείνονται τα παρακάτω:

- 1) Επίλυση ροής ως μη μόνιμη
- 2) Μελέτη νέων μπαλών με διαφορετική γεωμετρία
- 3) Επίλυση περιπτώσεων με περιστροφή της μπάλας (spin)

Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία

1. Nasa επίσημη ιστοσελίδα <http://www.grc.nasa.gov>
2. <http://www.soccerballworld.com>
3. Firoz Alam, Harun Chowdhury*, Mark Stemmer, Zilong Wang, Jie Yang. Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics (2012)
4. Takeshi Asaia*, Shinichiro Itob, Kazuya Seoc, Sekiya Koikea. Characteristics of modern soccer balls
5. <http://www.sigmarockets.com/>
6. Firoz Alam*, Harun Chowdhury, Hazim Moria and Franz Konstantin Fuss A Comparative Study of Football Aerodynamics (2010)
7. Ansys Inc, Ansys CFX Documentation
8. Ansys Inc, Ansys Meshing Documentation