

# Καταγραφή συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων, σε μη παθολογικές συνθήκες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Μία εκπαιδευτική προσομοίωση

Ειρήνη Λαχανά, Εκπαιδευτικός,  
ΑΣΠΑΙΤΕ, Παιδαγωγικό τμήμα  
[loxanairini@gmail.com](mailto:loxanairini@gmail.com)

Στέφανος Αρμακόλας, PhD, MEd,  
ΕΔΙΠ, ΑΣΠΑΙΤΕ, Παιδαγωγικό τμήμα  
[armakolas@aspete.gr](mailto:armakolas@aspete.gr)

Ιωάννης Χιωτέλης, PhD, MSc,  
Διδάσκων Πανεπιστημίου Πατρών  
[johnchiotelis@yahoo.gr](mailto:johnchiotelis@yahoo.gr)

## Περίληψη

Η παρούσα μελέτη αφορά σε πείραμα ρευστοδυναμικής και στη καταγραφή μετρήσεων με τη βοήθεια πειραματικής διάταξης που σκοπό έχει να προσομοιάσει την υδροδυναμική των έμμορφων χαρακτηριστικών του αίματος και συγκεκριμένα των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Μελετήθηκε η σημασία της παραμόρφωσης και της ευλυγισία της κυτταρικής μεμβράνης των ερυθρών αιμοσφαιρίων, υπό συγκεκριμένα επίπεδα ροής αίματος. Συγκεκριμένα η υδροδυναμική των ερυθρών αιμοσφαιρίων προσομοιάστηκε με τη βοήθεια πειράματος ρευστοδυναμικής, κατά τη διάρκεια της κίνησής τους εντός των αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος του ανθρώπινου οργανισμού. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της μεμβράνης των ερυθροκυττάρων είναι υπεύθυνα για την ικανότητα παραμόρφωσής τους κατά την αιματική ροή, όταν είναι απαραίτητο. Για την διεξαγωγή του πειράματος προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε άτρακτος (ομοίωμα ερυθρών αιμοσφαιρίων) η οποία μπορούσε να καμφθεί υπό διαφορετικές γωνίες κλίσης και να εξεταστεί υπό διαφορετικές ταχύτητες ροής ρευστού. Σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή της συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων του αίματος κατά την αιματική ροή υπό φυσιολογικές συνθήκες στον ανθρώπινο οργανισμό.

## Λέξεις κλειδιά

Ερυθρά αιμοσφαίρια, Παραμορφωσιμότητα, Ρευστοδυναμική, Πεδίο ροής, προσομοίωση

## Summary

This study concerns the simulation of cellular components of blood and specifically the hydrodynamics of red blood cells. We recorded fluid dynamics measurements by using an experimental device that aims to simulate the hydrodynamics of the red blood cells. The deformability and flexibility of red blood cells membrane were studied, using our experimental apparatus, and setting different blood flow levels. We used a prototype, stressed under different flow levels to study how the deformation of the red blood cells provides the necessary hydrodynamics to avoid bad flow conditions during their motion within the vessels of human body's circulatory system. The erythrocytes' membrane special characteristics are responsible for their ability to deform during blood flow when it is necessary. Specifically, to conduct the simulation experiment, we used a spindle-shape (a red blood cell model) which could be flexed at different angles and tested at different fluid flow rates. The purpose of this study is to record the behavior of red blood cells during blood flow under normal conditions in the human body.

## Key words

Simulation, red blood cells, deformability, flexibility, blood flow

## Εισαγωγή

Το αίμα είναι αδιαφανές, παχύρευστο υγρό, ιστός δηλαδή σε υγρή κατάσταση, που αποτελείται από τα έμμορφα συστατικά (ερυθρά, λευκά αιμοσφαίρια, αιμοπετάλια), το πλάσμα και ρέει στο εσωτερικό των αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος, με την ώθηση της καρδιακής λειτουργίας. Βασικές ιδιότητες του αίματος είναι η ανταλλαγή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα μεταξύ ιστών και πνευμόνων, η μεταφορά βιταμινών, ιχνοστοιχείων, θρεπτικών ουσιών, μεταβολικών προϊόντων, η ρύθμιση το pH [ελαφρώς αλκαλικό, 7.33 - 7.45, στους 38 °C (Πάντζαλης, 2017), και η διατήρηση της ομοιόστασης καθώς επίσης και η άμυνα του ανοσοποιητικού συστήματος, μέσω της

μεταφοράς κυττάρων που δρουν έναντι των βλαπτικών ουσιών. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του αίματος είναι το χρώμα, το ιξώδες, η πυκνότητα και η αντίδρασή του (Πλέσσας & Κανέλλος, 1997). Η πυκνότητα του αίματος είναι 1,055 – 1,060 g/cm<sup>3</sup>, των ερυθρών αιμοσφαιρίων 1,097 – 1,100 g/cm<sup>3</sup> και του πλάσματος 1,025 – 1,030 g/cm<sup>3</sup>. Μετά από άσκηση και τις βραδινές ώρες η πυκνότητα του αίματος αυξάνεται, ενώ μετά από γεύμα και απογευματινές ώρες, φαίνεται να μειώνεται. Σε παθολογικές καταστάσεις παρατηρούνται μεταβολές, για παράδειγμα σε αναιμίες η πυκνότητα του αίματος μειώνεται και αυξάνεται με τα εγκαύματα ή σε καταστάσεις απώλειας υγρών (Πάντζαλης, 2017). Στην

αιμοσφαιρίνη (Hb) των ερυθρών αιμοσφαιρίων οφείλεται το χρώμα του και εξαρτάται από την απόλυτη ποσότητα της οξυγονωμένης (Hb-O<sub>2</sub>, ζωηρό κόκκινο, 100% στο αρτηριακό αίμα) και της αναχθείσας αιμοσφαιρίνης (Hb, κυανέρυθρο, 65% ή 35% στο φλεβικό αίμα) που περιέχει. Το ιξώδες του αίματος στους 18 °C είναι 4,75 και του πλάσματος 2,0 σε σχέση με εκείνο του ύδατος που κατά συνθήκη είναι ίσο με 1,0 [σχετικό ιξώδες] (Πλέσσας & Κανέλλος, 1997).

## 1. Η εκπαιδευτική προσομοίωση

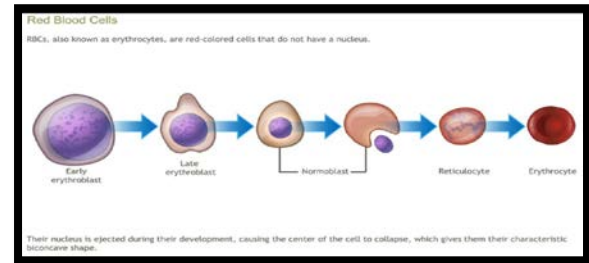
Πείραμα είναι η μέθοδος ελέγχου μιας επιστημονικής ερώτησης ή ενός ερευνητικού ερωτήματος, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι ο ερευνητής έχει επισημάνει όλες τις σχετικές μεταβλητές και τις κρατά σταθερές εκτός από εκείνη την οποία θέλει να μελετήσει. Στην εκπαιδευτική ή συμβολή των πειραμάτων είναι σημαντική διότι όχι μόνο συμβάλλει στην ενεργητική μάθηση αλλά προάγει την καλλιέργεια ικανοτήτων κριτικής σκέψης και επίλυσης προβλημάτων (Hüttner, 2008). Επιπλέον, μέσω των πειραμάτων και της συστηματικής παρατήρησης επιτυγχάνεται η εμπέδωση στο αντικείμενο, η εμπέδωση της γνώσης αλλά και η καλλιέργεια ικανοτήτων ανάληψης πρωτοβουλιών και ανακάλυψης. Επιπροσθέτως, ανταποκρίνονται στην ουσιαστική ανάγκη του σύγχρονου ανθρώπου για ερευνητική διάθεση και δημιουργική έκφραση. (Αρμακόλας, 2009; Καμαρινού, 2012; Papadiamantopoulou, et. al. 2016).

Η εκπαιδευτική προσομοίωση μέσω του πειράματος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τους μαθητές. Προάγει την κατανόηση της επιστημονικής σκέψης και τους βοηθά να βιώσουν πρακτικές εφαρμογές της. Οι μαθητές μαθαίνουν να εφαρμόζουν έννοιες με σκοπό να αποκτήσουν δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων (Hüttner, 2008; Artemieva, 2016). Τα περιβάλλοντα μάθησης που δημιουργούνται δίνουν την ευκαιρία στους μαθητές να έρθουν σε επαφή με επιστημονικά φαινόμενα που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο. Η τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας προσομοίωσης συμβάντων, που διαφορετικά πιθανόν να πραγματοποιούνταν πολύ γρήγορα, πολύ αργά ή ακόμη και να ήταν πολύ επικίνδυνο, δαπανηρό ή δύσκολο να οπτικοποιηθούν (Roblyer, 2008; Mach, et. al., 2017; Michaloudis, et. al., 2018). Η χρήση ενός θεωρητικού μοντέλου και της προσομοίωσης για την κατανόηση και την λύση περιπλοκών προβλημάτων έχει τις δικές της μεθόδους για να «υποχρεώσει» τα προβλήματα να λυθούν-συγκεκριμένα στη παρούσα εργασία- με τη αξιοποίηση των μαθηματικών, της φυσικής των επιστημών υγείας και της παιδαγωγικής (Ψυχάρης, κ.α, 2018). Για τους μαθητές, που μελετούν την υγεία αποτελεί κίνητρο η σύνδεση της γνώσης που αποκτούν με το ίδιο τους το σώμα. Όταν επιχειρεί κανείς να παρακινήσει τους μαθητές, μέσω της προσομοίωσης του πειράματος, να ασχοληθούν με μια βιολογική λειτουργία του σώματός τους, για παράδειγμα το αίμα, τους βοηθά να εξοικειωθούν με θέματα υψηλότερου επιπέδου και να κατανοήσουν βαθύτερα τα θέματα που εξερευνούν. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή της συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων κατά την αιματική ροή, υπό φυσιολογικές συνθήκες, στον ανθρώπινο οργανισμό.

## 2. Ανατομικά στοιχεία ερυθρού αιμοσφαιρίου

Πρόκειται για απύρνο κύτταρο, που στερείται πρωτεϊνοσύνθεσης. Έχει σχήμα αμφίκιουλου δίσκου που του προσδίδει ομοιόμορφη και ταχύτερη διάχυση των αερίων ενώ αυξάνει την ωφέλιμη επιφάνειά του κατά 30%, θεωρείται σχήμα ισορροπίας και το εμφανίζουν όταν βρίσκονται εντός πλάσματος. Στην εικόνα 1,

παρουσιάζεται η διαδικασία ερυθροποίησης (<https://www.anatomynote.com/human-anatomy/cell-and-tissue/red-cell-erythrocyte-development/>). Ο αριθμός των ερυθρών κυμαίνεται από 4,5.10 μέχρι 5.10<sup>6</sup> ανά mm<sup>3</sup> ενώ η περιεκτικότητα των ερυθροκυττάρων (RBC) εξαρτάται από την ποσότητα της αιμοσφαιρίνης, που συντίθεται κατά τη διάρκεια της ερυθροποίησης και από τον όγκο του ερυθροκυττάρου (Πλέσσας & Κανέλλος, 1997). Η διάρκεια ζωής τους κανονικά είναι 120 ημέρες (Chang et al., 2017).



Εικόνα 1. Παραγωγή ερυθρού αιμοσφαιρίου

### 2.1 Παραμορφωσιμότητα Ερυθρών Κυττάρων

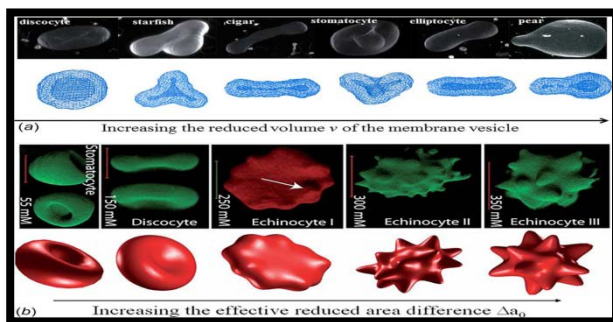
Η παραμόρφωση του ερυθροκυττάρου είναι απαραίτητη για τη διέλευση του στα τα τριχοειδή αγγεία, μειώνει το ιξώδες στα μεγαλύτερα αγγεία, αποτρέποντας τη φαγοκυττάρωση από μακροφάγα και βοηθά στην έξοδο του από το μυελό των οστών και εξαρτάται από τη γεωμετρία των κυττάρων, τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες της μεμβράνης και το ενδοκυτταρικό ιξώδες. Η μεμβράνη των RBC πρέπει να αντιστέκεται στις μηχανικές καταπονήσεις που εφαρμόζονται σε αυτήν καθώς τα RBC κυκλοφορούν στο σώμα. Η παραμόρφωση και η αντοχή της μεμβράνης τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον κυτταροσκελετό τους. Εκτός πλάσματος τα RBC, παίρνουν σφαιρικό σχήμα και αυτό οφείλεται στην απουσία μιας πρωτεΐνης του πλάσματος, έτσι μειώνεται η έκταση της επιφάνειας τους. Τα σφαιροκύτταρα, είναι λιγότερο εύκαμπτα, επιβιώνουν λιγότερο όταν αυτά υποβάλλονται σε μηχανικές καταπονήσεις, όπως είναι η διοδός τους διαμέσου των τριχοειδών αγγείων. Όταν αυξάνει η ταχύτητα ροής του αίματος, για να μην αυξηθούν υπέρμετρα οι εσωτερικές τριβές, τα σωματίδια παραμορφώνονται και προσανατολίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνουν τη ροή (Πλέσσας & Κανέλλος, 1997). Τα RBC αποτελούν περίπου το 50% του όγκου του αίματος, συνεπώς, είναι υπεύθυνα για τις μη νευτώνειες ρεολογικές ιδιότητες του αίματος. Οι ελαστικές ιδιότητες της μεμβράνης και το σχήμα τους, επιτρέπουν τη ροή λόγω της τεράστιας παραμόρφωσης που μπορούν να υφίστανται. Η ακραία παραμόρφωση τους επιτρέπει να συμπιέζονται σε στενά τριχοειδή αγγεία με διάμετρο μικρότερη από 3 mm χωρίς καμία αρνητική επίπτωση. Εξαιτίας της υγρής φύσης της λιπιδικής διπλοστιβάδας και της ελαστικής φύσης του κυτταροσκελετού, το RBC δέχεται μεγάλες παραμορφώσεις κατά τη διέλευση από στενά τριχοειδή αγγεία διαμέτρου μικρότερης των 3 mm (Chang et al., 2017).

Το RBC υφίσταται σοβαρές παραμορφώσεις στα τριχοειδή. Η μεμβράνη τους περικλείει ένα διάλυμα αιμοσφαιρίνης, του οποίου το ιξώδες είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από αυτό του πλάσματος του αίματος υπό φυσιολογικές συνθήκες. Σε χαμηλά επίπεδα ροής τα RBC αποκρίνονται με ήπια πτώση και επιπέδωση ενώ σε υψηλά επίπεδα ροής ως πάμα δεξαμενής, όπως παρατηρήθηκε σε πειράματα. Αυτή η συμπεριφορά εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες της μεμβράνης τους, τον ρυθμό διάτμησης και τα ιξώδη της εσωτερικής και εσωτερικής μεμβράνης του κυττάρου. Κατά την ροή στα τριχοειδή αγγεία, το σχήμα του ερυθρού αλλάζει

από αμφίκυρτος δίσκος σε αλεξίπτωτο καθώς αυξάνεται ο ρυθμός ροής. Όπως βρέθηκε σε πρόσφατες μελέτες, η παραμόρφωση οφείλεται στις ελαστικές και καμπτικές ιδιότητες της μεμβράνης RBC (Fedosov, et al., 2010).

Όπως προαναφέρθηκε υπό απλή ροή διάτμησης, έχουν περιγραφεί πειραματικά μόνο δύο κινήσεις, η «πτώση» και «πώμα δεξαμενής», οι οποίες σχετίζονται με την κυτταρική μηχανική. Όταν τα RBCs μπουν στη ροή, ο προσανατολισμός τους καθορίζεται από τον ρυθμό διάτμησης. Μπορεί να παρατηρηθεί «κυλιόμενη» κίνηση, παρόμοια με αυτή ενός τροχού, που επιτρέπει στα κύτταρα να αποφεύγουν ενεργειακά δαπανηρές παραμορφώσεις, εξαιτίας της ελαστικότητας του κυτταροσκελετού. Η παραμόρφωση των RBCs και η ελαστικότητά τους εξαρτάται από κυτταρικές ρεολογικές ιδιότητες (εσωτερικό ιξώδες, ελαστικότητα κυτταροσκελετού). Σε περίπτωση ασθενειών όπου γενετικά αλλάζουν οι κυτταρολογικές ιδιότητες ή μετά από λοίμωξη αλλάζει η αιματική ροή μπορεί να είναι σοβαρά μειωμένη. Η μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ ρεολογίας κυττάρων και ροής μπορεί να δημιουργήσει πολύπλοκες δυναμικές, οι οποίες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητες πειραματικά. Στην κυτταρική κλίμακα, η ροή αίματος επηρεάζεται κυρίως από την συμπεριφορά των RBC στο υδροδυναμικό στρες και ως προς τον προσανατολισμό αλλά και ως προς την παραμόρφωσή τους. Σε χαμηλά επίπεδα ροής, ευνοείται ο σχηματισμός στοιβών RBCs, σαν στοιβές νομισμάτων, που αυξάνει το ιξώδες του αίματος. Σε υψηλούς ρυθμούς, ευνοείται η εξατομίκευση των RBC, η ευθυγράμμιση τους και το τέντωμα τους στη ροή, με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδες του αίματος. Οι ρεολογικές ιδιότητες του RBC εξαρτώνται επίσης από το μικροπεριβάλλον και από τη μεταβολική λειτουργικότητα. Τόσο οι τοπικές όσο και οι συστημικές διαταραχές της ομοιόστασης (σε σακχαρώδη διαβήτη, υπέρταση) έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν ρεολογικές αλλοιώσεις RBC και κατά συνέπεια να βλάψουν την κυκλοφορία του αίματος (Dupire, et al., 2012).

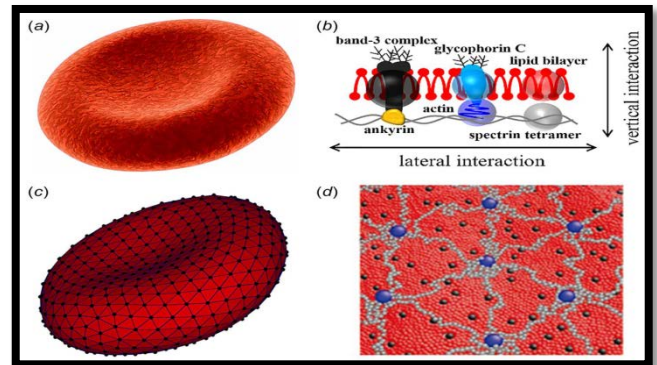
Σε παθολογικές καταστάσεις όπως η ελονοσία ή ο σακχαρώδης διαβήτης, το δίκτυο σπεκτρίνης και η διπλοστιβάδα λιπιδίων των RBCs, μεταβάλλονται σημαντικά, και αυτό οδηγεί στη μειωμένη λειτουργικότητά τους και στην απώλεια της ικανότητας παραμορφωσιμότητάς τους. Μετά από πειράματα στην εικόνα 2, βλέπουμε τα διαφορετικά σχήματα που αναγκάζονται τα ερυθροκύτταρα να πάρουν προκειμένου να επιτελέσουν τις λειτουργίες τους κατά την αιματική ροή σε παθολογικές αιματολογικές καταστάσεις, όπως η δρεπανοκυτταρική αναιμία, η ελονοσία, ο σακχαρώδης διαβήτης και άλλες (Li, et al., 2017).



**Εικόνα 2.** Παραμορφωποίηση ερυθρών αιμοσφαιρίων σε παθολογικές καταστάσεις.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση ενός υγιούς ανθρώπινου RBC. Διαγράφεται το σχήμα του (a) και η σύνθετη δομή της κυτταρικής μεμβράνης του (b). Η κυτταρική μεμβράνη είναι κατασκευασμένη

από μια λιπιδική διπλοστιβάδα ενισχυμένη στο εσωτερικό της από ένα ευέλικτο διασπασμένο δίκτυο σπεκτρίνης. Στις εικόνες d) και c) η σχηματική άποψη της σωματιδιακής βάσης, μοντέλο ολόκληρων κυττάρων και μοντέλο σύνθετης μεμβράνης. Για το μοντέλο ολόκληρων κυττάρων (d), η λιπιδική διπλοστιβάδα και ο κυτταροσκελετός διαγράφονται με σκούρα γκρι και μαύρα τριγωνικά δίκτυα. Για το μοντέλο σύνθετης μεμβράνης χονδρόκοκκου (c), το σκούρο γκρι, το μαύρο και τα σωματίδια με ανοιχτό γκρι αντιπροσωπεύουν μόρια λιπιδίων, συνδέσεις ακτίνης και νημάτια σπεκτρίνης του κυτταροσκελετού, αντίστοιχα. Τα μαύρα σωματίδια δείχνουν τα σύμπλοκα ζώνης-3 (Chang et al., 2017).



**Εικόνα 3.** Δομή και σχήμα φυσιολογικού ανθρώπινου ερυθροκυττάρου.

Τα RBCs σχηματικά παρουσιάζονται ως μια μη πλήρως διογκωμένη σακούλα, με μεμβράνη πλάσματος, γεμάτη με ένα ιξώδες υγρό, το κυτταρόπλασμα. Το σχήμα αμφίκυκλου δίσκου (ηρεμίας) του RBC καθορίζεται από τις ελαστικές ιδιότητες της μεμβράνης και την επιφάνεια της ενώ με τη δράση εξωτερικών δυνάμεων, παραμορφώνεται αλλά επιστρέφει στο σχήμα ηρεμίας του όταν οι δυνάμεις απομακρύνονται (Fischer, 2004). Η ικανότητα παραμόρφωσης του σχήματος τους κάτω από το εφαρμοσμένο στρες, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κύρια λειτουργία τους. Πειραματικές μετρήσεις με βάση τις βιομηχανικές ιδιότητες των μεμβρανών RBC, [συντελεστής διάτμησης, μέτρο κάμψης (κc)], αποκαλύπτουν ότι τα RBCs έχουν αξιοσημείωτη δυνατότητα παραμόρφωσης, μπορούν να κάμπτονται και να ρέουν ομαλά όταν περνούν από στενά τριχοειδή αγγεία, (μονοκυτταρικές τεχνικές, μικροσκοπία φάσης περίθλασης, μαγνητική συστοर्फή κυτταρομετρίας, αναρρόφηση μικροπιπέτας, οπτικές λαβίδες και τεχνικές με υπερήχους). Για παράδειγμα σε ασθενείς με δρεπανοκυτταρική αναιμία (SCA) η κυτταρική μεμβράνη των RBCs είναι πιο δύσκαμπτη από το κανονικό, ανάλογα με την οξυγόνωση και τη σοβαρότητα της νόσου (Chang et al., 2017). Το πείραμα go-and-stop, κατέγραψε ότι τα ερυθρά διαθέτουν μνήμη σχήματος. Πάνω στην μεμβράνη των κυττάρων προσκολλήθηκαν σφαιρίδια λατέξ και προκλήθηκαν αλλαγές στο σχήμα τους από την διατμητική ροή. Σε όλα σχεδόν τα RBCs βρέθηκε μνήμη σχήματος. Μετά τη διακοπή της ροής και κατά την επιστροφή των σφαιριδίων λατέξ στην αρχική θέση, το σχήμα των RBCs ήταν αμφίκυκλο. Μετά από 4 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου αλλά και τους 37 ° C δεν παρατηρήθηκε επιστροφή στο αρχικό σχήμα. Βρέθηκε ότι ο χρόνος χαλάρωσης του στρες, από τις διατμητικές ροές είναι 80 λεπτά και τα ερυθρά κύτταρα έχουν μνήμη σχήματος (Fischer, 2004).



### 3. Τριβή στα ρευστά – Ιξώδες – Δυναμική Άνωση

Τα ιδανικά ρευστά είναι εντελώς ασυμπίεστα, δεν έχουν εσωτερικές τριβές και δεν παρουσιάζουν συνάφεια με τα τοιχώματα που έρχονται σε επαφή. Ιδανικά ρευστά δεν υπάρχουν στη φύση και για λόγους απλότητας αναφερόμαστε σε πραγματικά ρευστά. Πραγματικά ρευστά ονομάζονται αυτά για τα οποία δεν ισχύουν οι παραπάνω τρεις ιδιότητες.

Το αίμα όπως και τα περισσότερα βιολογικά υγρά του ανθρώπινου οργανισμού, είναι πραγματικά - νευτώνεια ρευστά (συμπιεσά, δύναμη εσωτερικής τριβής που αντιτίθενται στην κίνηση ενός τμήματος του ρευστού ως προς ένα άλλο τμήμα του) (Cameron, et. al. 2001). Ως νευτώνεια ρευστά ορίζουμε τα ρευστά στα οποία η εσωτερική τριβή είναι ανάλογη της ταχύτητας ροής του ρευστού. Για να συνεχίσει η κίνηση χρειάζεται μια δύναμη η οποία θα αντισταθμίσει τις τριβές. Η τριβή στα ρευστά δίνεται από τη σχέση (Young, 1996):

$$F = \eta A \frac{u}{l}$$

όπου η είναι ο συντελεστής ιξώδους ο οποίος είναι χαρακτηριστικός για κάθε ρευστό και μετριέται σε poise,  $1 P = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ . Ο συντελεστής ιξώδους εξαρτάται από την φύση του υγρού και την θερμοκρασία (Πάντζαλης, 2017). Το χαρακτηριστικό της μη-νευτώνειας φύσης του ρευστού είναι η μεταβολή του ιξώδους καθώς μεταβάλλεται ο ρυθμός παραμόρφωσης, δηλαδή δεν υπάρχει σχέση αναλογίας μεταξύ εσωτερικής τριβής και ταχύτητας ροής στην περίπτωση του αίματος. Συγκεκριμένα, ενώ το πλάσμα του αίματος είναι νευτώνειο ρευστό, επειδή το ιξώδες του είναι ανεξάρτητο του ρυθμού παραμόρφωσης, το αίμα, στους 37°C έχει συντελεστή ιξώδους 2,7 x 10<sup>-3</sup>, δηλαδή τετραπλάσιο ιξώδες από ότι έχει το νερό οπότε στη συγκεκριμένη θερμοκρασία, χαρακτηρίζεται ως μη νευτώνειο ρευστό. Το ιξώδες του αίματος εξαρτάται από τον αιματοκρίτη και τη θερμοκρασία του δείγματος αίματος, αλλά γενικά η ποιοτική συμπεριφορά οποιουδήποτε δείγματος αίματος είναι η ίδια Σε πειραματικές μελέτες έχει αποδειχθεί ότι σε υψηλούς ρυθμούς διάτμησης το ιξώδες του ανθρώπινου αίματος με 45% αιματοκρίτη φθάνει σε σταθερή τιμή 3,5 - 4,0 mPa · s (Behbahani, et al., 2009).

#### 3.1 Αντίσταση στη ροή

Σε μικρές ταχύτητες ροής, τα διάφορα στρώματα του υγρού, μετακινούνται παράλληλα το ένα με το άλλο, χωρίς να αναμειγνύονται, οπότε τότε η ροή χαρακτηρίζεται στρωτή. Τέτοιου είδους ροή σε φυσιολογικές συνθήκες υπάρχει στα τριχοειδή αγγεία, στα οποία η ταχύτητα του αίματος είναι μικρή. Εάν η ταχύτητα του αίματος αυξηθεί ή εάν μεγαλώσει η διατομή του αγγείου εμφανίζονται στρόβιλοι και η ροή χαρακτηρίζεται τυρβώδης. Για τα υγρά που ρέουν σε σωλήνες υπάρχει ο αριθμός Reynolds (Young, 1996),

$$Re = \rho u \frac{r}{\eta}$$

όπου ρ η πυκνότητα του υγρού, u η ταχύτητα ροής, r η ακτίνα του σωλήνα και η το ιξώδες του υγρού ή αλλιώς το ηλίκιο  $R = \rho u l / \eta$ , ρ η πυκνότητα του ρευστού, u η ταχύτητα του, μ ο συντελεστής εσωτερικής τριβής η δυναμικό ιξώδες και L το μήκος μιας διάστασης του αντικείμενου που παρεμβάλλεται στη ροή ή περιβάλλει τη ροή. Αν μεταβληθεί το μήκος μεταβάλλεται το πεδίο ροής. Ο αριθμός είναι καθαρός αριθμός και ανάλογος της ταχύτητας της ροής. Η τιμή του εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής.

Για το αίμα των μεγάλων αρτηριών υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds,  $Re(\kappa\rho) = 1000$  και ανάλογα με τη τιμή αυτή χαρακτηρίζονται οι διάφοροι τύποι αιματικής ροής. Οπότε για: α)  $Re < Re(\kappa\rho)$  η ροή καλείται στρωτή, β)  $Re(\kappa\rho) = 1000 < Re < 2000$ , η ροή είναι ασταθής και γ)  $Re > 2000$ , η ροή γίνεται τυρβώδης

(με στροβίλους). Στο καρδιαγγειακό σύστημα του ανθρώπου η τυρβώδης ροή μπορεί να εμφανιστεί στην αορτή και συνοδεύεται από έναν χαρακτηριστικό ήχο (Πάντζαλης, 2017).

Ο χώρος στον οποίο κινείται ένα ρευστό λέγεται πεδίο ροής. Σε κάθε σημείο του πεδίου ροής αντιστοιχεί ένα διάνυσμα ταχύτητας, που εξαρτάται από τον χρόνο και από τη θέση του σημείου. Μία καμπύλη η οποία σε κάθε σημείο της η ταχύτητα έχει τη διεύθυνση της εφαπτομένης στο σημείο αυτό ονομάζεται ρευματική γραμμή. Το σχήμα των ρευματικών γραμμών μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Εάν η ταχύτητα ροής είναι ανεξάρτητη του χρόνου οι ρευματικές γραμμές έχουν αμετάβλητο σχήμα. Κάθε ρευματική γραμμή είναι η τροχιά ενός πολύ μικρού στοιχείου μάζας του ρευστού. Οι ρευματικές γραμμές σχεδιάζονται πυκνότερες στις περιοχές του πεδίου που η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Η ολική ενέργεια δοσμένης ποσότητας ρευστού παραμένει σταθερή σε όλα τα σημεία μιας ρευματικής γραμμής αν αγνοηθούν οι τριβές (Young, 1996).

Η δύναμη που δρα σε ένα σώμα, σαν αποτέλεσμα της κίνησής του μέσα σε ένα ρευστό λέγεται δυναμική άνωση. Διαφέρει από την στατική άνωση, που περιέγραψε ο Αρχιμήδης, που ασκείται πάνω σε ένα σώμα. Αν παρατηρήσουμε ένα αντικείμενο μέσα σε μια αεροδυναμική σήραγγα, σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli, θα προκύψουν συμμετρικές ρευματικές γραμμές και η ταχύτητα του αέρα είναι η ίδια σε αντίστοιχα σημεία πάνω και κάτω από αυτό.

$$P + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho gh = P_{ολ} = \text{σταθερό}$$

όπου P η πίεση, ρ η πυκνότητα, u η ταχύτητα, h το υψόμετρο σε σχέση με κάποια στάθμη με υψόμετρο μηδέν, (στατική, δυναμική και υψομετρική πίεση – νόμος Bernoulli). Το Ρολ. είναι σταθερό κατά μήκος μιας ρευματικής γραμμής.

Δυναμική άνωση εμφανίζεται σε ένα αντικείμενο όταν οι ρευματικές γραμμές στη μια πλευρά του αντικείμενου είναι πιο πυκνές από τις δυναμικές γραμμές στην αντίθετη (άλλη) πλευρά. Αν το αντικείμενο είναι σφαιρικό οι δυναμικές γραμμές εμφανίζονται ισαπέχουσες σε δυο αντιδιαμετρικά σημεία της σφαίρας, ενώ σε άλλες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα σε ένα πτερύγιο αεροπλάνου, οι ρευματικές γραμμές εμφανίζονται πυκνότερες στο πάνω μέρος της πτέρυγας από ότι στο κάτω. Η αρχή του Bernoulli, προβλέπει ότι η πίεση στο κάτω μέρος της πτέρυγας θα είναι μεγαλύτερη από την πίεση στο πάνω μέρος με αποτέλεσμα να εμφανίζεται δυναμική άνωση προς τα πάνω (Halliday & Resnick, 1966). Όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό, στην επιφάνεια επαφής σώματος και ρευστού αναπτύσσονται δυνάμεις όπως κάθετες τάσεις που οφείλονται στην πίεση και διατμητικές τάσεις, η διεύθυνση των οποίων εφάπτεται στην επιφάνεια του ρευστού, αποτέλεσμα των δυνάμεων τριβής, δηλαδή του ιξώδους του ρευστού. Το μέτρο, η διεύθυνση και η φορά των δυνάμεων δεν είναι σταθερό αλλά διαφέρει από σημείο σε σημείο της επιφάνειας. Η συνισταμένη δύναμη λόγω των πιέσεων κατά την διεύθυνση της ταχύτητας της ροής ονομάζεται αντίσταση ενώ η κάθετη προς τη διεύθυνση της ροής ονομάζεται δυναμική άνωση. Σε περίπτωση τριδιάστατου σώματος ενδέχεται να υπάρχει και μία τρίτη δύναμη κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από τις προηγούμενες δύο. Για δύο γεωμετρικά όμοιες ροές του ίδιου ή διαφορετικών ρευστών αποδεικνύεται ότι το πεδίο ροής έχει την ίδια μορφή, οπότε με μετρήσεις γύρω από ένα μικρό υπό κλίμακα ομοίωμα π.χ. μιας ατράκτου μπορούμε να μελετήσουμε τη ροή γύρω από πραγματικής ατράκτου αεροπλάνου (Serway., & Jewett, 2018).

#### 4. Περιγραφή της προσομοίωσης

Το αεροδυναμικό σχήμα μιας ατράκτου μας βοηθά στο να καταγράψουμε και να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του υγιούς ερυθρού αιμοσφαιρίου κατά την αιματική ροή, εξαιτίας του αεροδυναμικού του σχήματος. Στην άνω επιφάνεια της ατράκτου δημιουργούνται υποπίεσεις (< ατμοσφαιρικής) που προκαλούν όχι μόνο άνωση αλλά συγχρόνως και προωστική συνιστώσα με αποτέλεσμα ελάττωση της αντίστασης ενώ στην κάτω επιφάνεια επικρατούν υπερπίεσεις (>ατμοσφαιρικής). Εξαιτίας της διαφοράς πιέσεων στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της, αναπτύσσεται στην πτέρυγα η F<sub>oL</sub>. Η δυναμική άνωση οποία αναπτύσσεται σε σημείο πλησιέστερο προς το εμπρός άκρο της πτέρυγας σε απόσταση περίπου ίση με το 1/3 του πλάτους της, ενώ το μέτρο και η κατεύθυνση της εξαρτώνται από τη γωνία κλίσης  $\alpha$  (μετρήσεις σε συγκεκριμένες μοίρες). Κατά την πτήση του αεροπλάνου (άρα και της ατράκτου), ενεργούν σε αυτό πάντοτε τρεις δυνάμεις, το βάρος του αεροπλάνου η δύναμη που αναπτύσσεται από τον κινητήρα και η αεροδυναμική που αναπτύσσεται στην πτέρυγα του αεροπλάνου. Η πτήση για να είναι οριζόντια και ομαλή πρέπει η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που ενεργούν στο αεροπλάνο να είναι ίση με μηδέν. Για την άνοδο του αεροπλάνου (απογείωση), η έλξη που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι μεγαλύτερη από την έλξη που αναπτύσσεται κατά την οριζόντια πτήση. Όσο μεγαλύτερη είναι και η γωνία  $\alpha$  τόσο μεγαλύτερη και η έλξη. Κατά την κάθοδο (προσγείωση) του αεροπλάνου, η πτήση γίνεται χωρίς να λειτουργεί ο κινητήρας του αεροπλάνου και ονομάζεται πτήση ολίσθησης. Στο αεροπλάνο τότε ενεργούν μόνο το βάρος και η δυναμική άνωση. Για να κατέβει το αεροπλάνο με κίνηση ομαλή, να ολισθαίνει, πρέπει η αεροδυναμική να είναι ίση και αντίθετη με το βάρος του αεροπλάνου. Και να δοθεί από τον πιλότο η όπου αυτό πρέπει να ισχύσει. Η γωνία  $\alpha$  σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται γωνία ολίσθησης και η εφαπτομένη της αριθμός ολίσθησης. Ο συντελεστής άνωσης μπορεί να παίρνει θετικές τιμές ακόμη και για αρνητικές γωνίες (<6°) ενώ τη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή άνωσης επιτυγχάνουμε με γωνία 12°. Σε μεγαλύτερες τιμές αυτός ελαττώνεται εκ νέου αντίθετα όσο αυξάνεται η γωνία αυξάνεται και ο συντελεστής αντίστασης. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι για μεγάλες γωνίες  $\alpha$  η άτρακτος υφίσταται μεγάλη άνωση και μεγάλη αντίσταση για την πτήση.

##### 4.1 Πειραματική Διάταξη – Ρευστοδυναμική

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Φυσικής του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης, του Πανεπιστημίου Πατρών, τον Φεβρουάριο του 2020. Η ρευστοδυναμική ασχολείται με τις κινήσεις αερίων και υγρών, καθώς και με το πώς αυτές οι κινήσεις σχετίζονται με δυνάμεις. Για να αντιμετωπίσουμε ένα πρόβλημα ρευστοδυναμικής, αντιμετωπίζουμε το ρευστό ως συνεχές μέσο και μεταχειριζόμαστε τις ιδιότητες της ύλης ως συνεχείς συναρτήσεις του χώρου. Αντικαθιστούμε το πραγματικό ρευστό με ένα «φυσικό μοντέλο», το οποίο δεν έχει μόρια, ούτε δομή και έχει μέσες ιδιότητες που αντιπροσωπεύουν την στατιστική συμπεριφορά του πραγματικού ρευστού. Ιδιότητες, όπως η πυκνότητα  $\rho$ , η ταχύτητα  $u$ , η πίεση  $p$  και η θερμοκρασία  $T$  θεωρούνται συνεχείς σε οποιοδήποτε όγκο ρευστού  $dV$ , όσο μικρός κι αν είναι, και αγνοούμε το γεγονός ότι το ρευστό αποτελείται από διακριτά μόρια (Χρόνης Ν., Μηχανική Ρευστών). Με βάση το πείραμα της ρευστοδυναμικής καταγράψαμε την συμπεριφορά μιας ατράκτου μέσα σε αεροθάλαμο ως προσομοίωση της συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Για την μελέτη της συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων

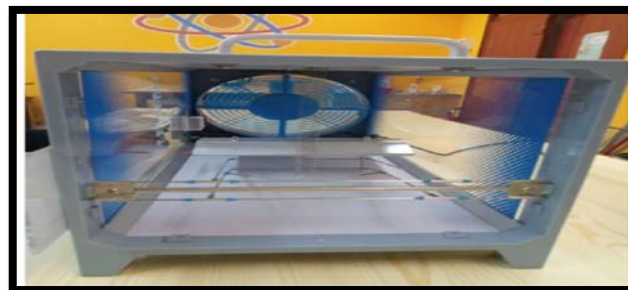
κατά την αιματική ροή, επιλέχθηκε να καταγραφεί η κίνηση μιας ατράκτου μέσα σε συσκευή αεροσωλήνα μεταβλητής ροής αέρα με δυνατότητα μεταβλητής γωνίας κλίσεως της ατράκτου (εικόνες 4, 5, 6). Η άτρακτος διαθέτει το ιδανικότερο αεροδυναμικό σχήμα, βάση του σχήματος ενός φυσιολογικού ερυθρού αιμοσφαιρίου και της δυναμικής άνωσης.



Εικόνα 4 Μοντέλο προσομοίωσης ατράκτου σε αεροσωλήνα



Εικόνα 5 Πλάγια άποψη αεροσωλήνα προσομοίωσης.



Εικόνα 6. Πλάγια άποψη αεροσωλήνα προσομοίωσης.

Για τις ανάγκες του πειράματος, η δυναμική άνωση μεταφράζεται σε cm, αντί της κανονικής μονάδας μέτρησης που είναι Newton (N). Υπάρχει βαθμονομημένος πίνακας πάνω στη συσκευή αεροσωλήνα, από 0 έως 16 cm. Η συσκευή κατασκευαστικά δεν είχε βαθμονομήσεις στην ροή αέρα, οπότε ορίσαμε 5 σημεία (1: χαμηλή ροή αέρα, 2: ήπια, 3: μέτρια, 4: υψηλή, 5: δυνατή) από την χαμηλότερη έως και την υψηλότερη ροή αέρα που εμείς μελετήσαμε (εικ. 7). Προστέθηκε η άτρακτος και καταγράψαμε την δυναμική άνωση της ατράκτου σε συγκεκριμένες μοίρες γωνίας κλίσεως  $\alpha$  και για τα 5 επίπεδα ροής αέρα (εικ. 8). Οι γωνίες που μελετήσαμε είναι οι : -10°, 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου και το λαμβάνουμε υπόψη διότι από αυτή εξαρτάται ο συντελεστής αντίστασης και άνωσης.



**Εικόνα 7.** Βαθμονόμηση – Επίπεδα ροής αέρα συσκευής



**Εικόνα 8.** Τιμές γωνίας α.

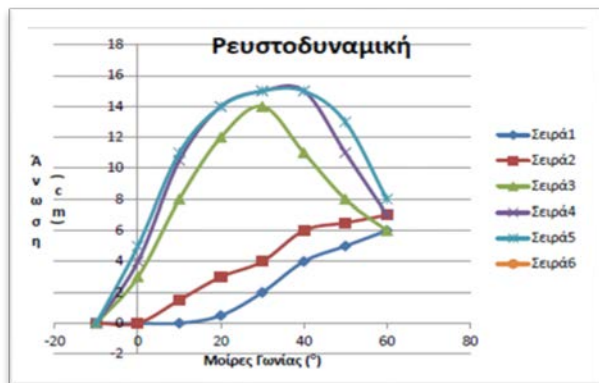
### 5. Ανάλυση- Μετρήσεις

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι μετρήσεις της δυναμικής άνωσης σε cm, στις συγκεκριμένες μοίρες γωνίας κλίσεως α.

**Πίνακας 1. Καταγραφή μετρήσεων**

Μοίρες (°)		-10	0	10	20	30	40	50	60
Δυναμική Άνωση (cm)	Ροή 1 (χαμηλή)	0	0	0	0,5	2	4	5	6
	Ροή 2 (ήπια)	0	0	1,5	3	4	6	6,5	7
	Ροή 3 (μέτρια)	0	3	8	12	14	11	8	6
	Ροή 4 (υψηλή)	0	4	10,5	14	15	15	11	7
	Ροή 5 (δυνατή)	0	5	11	14	15	15	13	8

Διαγραμματικά, τα παραπάνω αποτελέσματα, με τη βοήθεια του προγράμματος Microsoft Office Excel 2017, εμφανίζονται ως εξής:



**Διάγραμμα 1.** Σχηματική αναπαράσταση μετρήσεων

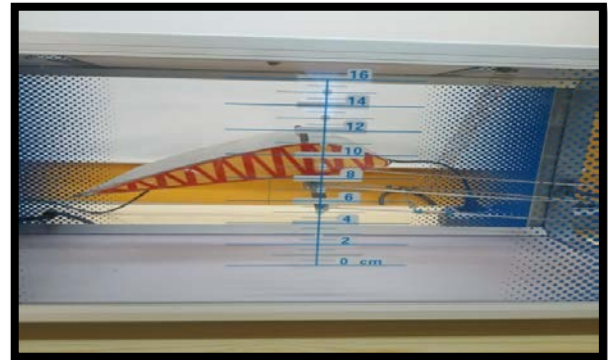
Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 1:

Σειρά 1 = Ροή αέρα επίπεδο 1, Σειρά 2 = Ροή αέρα επίπεδο 2, Σειρά 3 = Ροή αέρα επίπεδο 3, Σειρά 4 = Ροή αέρα επίπεδο 4 και Σειρά 5 = Ροή αέρα επίπεδο 5. Παρατηρείται ότι η τιμή της δυναμικής άνωσης αυξάνει καθώς αυξάνει το επίπεδο ροής από ήπια σε δυνατή, σε συνάρτηση και με την αύξηση της γωνίας α μέχρι και τις 40 ενώ στην πορεία ξεκινά μια τάση πτώσης της δυναμικής άνωσης μετά τις 50. Οι μεγαλύτερες τιμές δυναμικής άνωσης σημειώθηκαν στις 20, 30, 40 στα επίπεδα ροής από μέτρια έως δυνατή ενώ από τις 50 στα ίδια επίπεδα λόγω των αντιστάσεων εξαιτίας της μετωπιαίας στροφής της ατράκτου σημειώθηκε σημαντική μείωση.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται εικόνες (εικ. 9, 10) από την διάρκεια του πειράματος, οι οποίες δείχνουν την δυναμική άνωση της ατράκτου σε διάφορα επίπεδα ροής αέρα και διαφορετικές γωνίες α.



**Εικόνα 9.** Κίνηση ατράκτου



**Εικόνα 10.** Κίνηση ατράκτου

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε, έδειξαν αρχικά ότι σε χαμηλή ροή αέρα η δυναμική άνωση της ατράκτου πριν τις 30° ήταν αμελητέα, ενώ μετά τις 30° σημειώθηκε αύξηση της δυναμικής άνωσης. Σε ήπια ροή αέρα σημειώθηκε αύξηση της δυναμικής άνωσης της ατράκτου μετά τις 20°. Στη συνέχεια και αφού αυξήσαμε την ροή αέρα σε μέτριο επίπεδο, καταγράψαμε αύξηση της δυναμικής άνωσης της ατράκτου στις 0° με αυξητική πορεία στις μεταβολές της γωνίας κλίσης, με τις πιο υψηλές τιμές δυναμικής άνωσης να καταγράφονται στις 20° και 30° ενώ μετά τις 30° παρουσιάστηκε φθίνουσα πορεία στις τιμές της δυναμικής άνωσης. Όταν αυξήσαμε την ροή αέρα σε υψηλή, η δυναμική άνωση της ατράκτου αυξήθηκε στις 10° έως τις 40°, με την μεγαλύτερη τιμή της να καταγράφεται στις 40° ενώ μετά τις 40° παρατηρήθηκε μείωση της δυναμικής άνωσης. Τέλος, στο επίπεδο δυνατής ροής αέρα η αύξηση της δυναμικής άνωσης της ατράκτου σημειώθηκε στις 0° έως τις 40°, σε σχεδόν παρόμοιες τιμές με το προηγούμενο επίπεδο ροής αέρα, ενώ και εδώ παρουσιάστηκε μείωση μετά τις 40°, μικρότερη όμως από αυτήν του προηγούμενου



επιπέδου). Κατά την διάρκεια των μετρήσεων και ειδικά στο υψηλό και στο δυνατό επίπεδο ροής αέρα, η άτρακτος παρουσίασε μικρή στροφή και μεταβολή ερχόμενη σχεδόν όρθια, αυξάνοντας έτσι την γωνία κλίσης της, με αποτέλεσμα η μετωπιαία επιφάνεια της να αυξάνει την αντίσταση κατά την ροή αέρα και άρα να υπάρχει δυσκολία κατά την δυναμική άνωση της ατράκτου. Οπότε παρουσιάστηκε μεγαλύτερη αντίσταση κατά την προσπάθεια της ατράκτου να ανυψωθεί και άρα σημειώθηκε μείωση στις τιμές της δυναμικής άνωσης.

## 6. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα του πειράματος που πραγματοποιήσαμε, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ροή αέρα επηρεάζει καθοριστικά την δυναμική άνωση της ατράκτου σε συγκεκριμένες γωνίες κλίσης της ατράκτου. Για την καταγραφή της συμπεριφοράς των ερυθρών αιμοσφαιρίων κατά την αιματική ροή, εξαιτίας και του αεροδυναμικού σχήματος της ατράκτου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όταν η ροή του αίματος είναι χαμηλή, όπως για παράδειγμα σε κατάσταση ηρεμίας ή χαμηλής αρτηριακής πίεσης, η κυκλοφορία των ερυθρών αιμοσφαιρίων γίνεται με αργούς ρυθμούς, με ελάχιστη δυναμική άνωση μέσα στα αγγεία και προφανώς δεν έχουμε μεγάλες τριβές των κυττάρων στα τοιχώματα των αγγείων, αλλά και μεταξύ τους. Βάση των ρεολογικών ιδιοτήτων των ερυθρών αιμοσφαιρίων και της ρευστοδυναμικής που προαναφέραμε, εφόσον η ροή είναι ήπια τα ερυθρά αντιδρούν ήπια με τη τάση «επιπέδωσης» – «πτώσης» της επιφάνειάς τους και παρατηρείται ήπια σταθερή κίνηση της ατράκτου οριζόντια στο 0, που σημαίνει ότι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στην επιφάνεια των ερυθρών είναι ίση με το 0. Η άτρακτος ανυψώνεται ελάχιστα στις 20° και συνεχίζει ελαφρώς έως τις 60°, επειδή αυξάνεται η γωνία α σημειώνεται μικρή αύξηση της δυναμικής άνωσης και φαίνεται ότι έχουν και τα ερυθρά την τάση μικρής ανύψωσης μέσα στα αγγεία. Η τιμή της δυναμικής άνωσης καταγράφει ανοδική σταθερή μικρή πορεία, χωρίς να μειώνεται όσο αυξάνει η γωνία α, εξαιτίας της ήπιας ταχύτητας ροής αέρα στον θάλαμο, η οποία δεν επιτρέπει αυξημένη τριβή αέρα. Οπότε σε ήπια αιματική ροή η κυκλοφορία των RBCs είναι σταθερή και ομαλή μέσα στα τοιχώματα των αγγείων και η δυναμική τους άνωση, όση ακριβώς χρειάζεται για την ροή τους, χωρίς να εμφανίζεται παραμόρφωση ή διαφορετική κίνηση των επιφανειών τους (Memmoio, et. al. 2019).

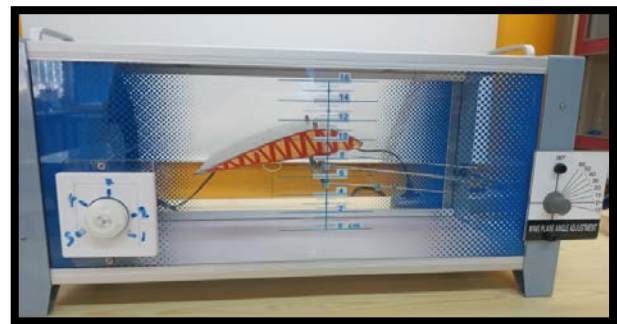
Στην κατάσταση ήπιας αιματικής ροής η δυναμική άνωση των ερυθρών φαίνεται να αυξάνεται στις 10° πλέον. Παρατηρείται μικρή αύξηση της δυναμικής άνωσης όσο αυξάνεται η γωνία α, μικρότερη όμως αναλογικά με αυτή στο προηγούμενο επίπεδο ροής αέρα κ αυτό γιατί αυξήσαμε από χαμηλή σε ήπια την ροή. Άρα αυξήθηκε και η τριβή αέρα όχι όμως τόσο ώστε να δυσκολέψει την αύξηση της δυναμικής άνωσης αλλά τόσο ώστε με την αύξηση της ταχύτητας ροής να αυξηθεί ανάλογα ελάχιστα και η αντίσταση αλλά και η έλξη όσο αυξάνεται η γωνία. Συνεχίζει όμως εδώ η άτρακτος να κινείται σε κατάσταση «επιπέδωσης», σταθερά και οριζόντια. Βάση αυτών συμπεραίνουμε ότι τα RBCs ανυψώνονται κατά τον ίδιο τρόπο με αυτό της προηγούμενης περιπτώσεως, προς τα τοιχώματα των αγγείων, αλλά ασκούνται δυνάμεις και τριβές οι οποίες όμως δεν είναι ικανές να επιφέρουν παραμορφώσεις και μεγάλες κινήσεις και άρα κινούνται ήπια ακόμη με τάση «επιπέδωσης» της επιφάνειάς τους.

Όταν αυξήσαμε την ταχύτητα ροής αέρα στο επίπεδο 3, σημειώθηκε στις 0° η τριπλάσια δυναμική άνωση σε σχέση με αυτή του επιπέδου 2. Η άτρακτος ανυψώθηκε αμέσως ενώ ταυτόχρονα παρουσίασε μικρή κλίση προς το εμπρός τμήμα της (εικ.11) και σημειώθηκε αύξηση

της τιμής της δυναμικής άνωσης σχεδόν στο τριπλάσιο μέχρι και για τις 30°, συγκεκριμένα καταγράφηκε η μεγαλύτερη της τιμή 14cm. Η άτρακτος συνέχισε να ανυψώνεται με πρόσθια κλίση αυξάνοντας έτσι τις δυνάμεις αντίστασης και των πλευρικών στροβίλων. Από τις 40° παρατηρήσαμε την σταδιακή κάθοδο της ατράκτου και άρα την μείωση της δυναμικής άνωσης (εικ.12). Αυτό συνέβη εξαιτίας της αύξησης της ταχύτητας ροής, άρα της αύξησης της τριβής αέρα, της έλξης και της αντίστασης και λόγω του ότι η Fολ αεροδύναμη είναι μικρότερη από το βάρος της ατράκτου. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι κατ' αυτό τον τρόπο κινούνται και τα RBCs μέσα στα αγγεία. Με την αύξηση της ταχύτητας ροής του αίματος αναγκάζονται να φέρουν την επιφάνειά τους με κλίση σε σχήμα πώματος δεξαμενής όπως περιγράφεται στις μελέτες, ξεφεύγοντας πλέον από την «επιπέδωση», με σκοπό να διαπεράσουν τις διαμέτρους των αγγείων. Η συμπεριφορά τους αυτή φαίνεται να οφείλεται και στην ανάπτυξη του συνόλου των δυνάμεων που προαναφέραμε (Xiao, et. al. 2016).



Εικόνα 11 Ροή 3, γωνία 10°, δυναμική άνωση 8cm



Εικόνα 12 Ροή 3, γωνία 60°, δυναμική άνωση 6cm

Σε αρκετές καταστάσεις της ζωής μας, για παράδειγμα μετά από άσκηση, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας της αιματικής ροής στο σώμα μας και όχι απαραίτητα εξαιτίας παθολογίας. Για αυτό το λόγο αυξήσαμε το επίπεδο ροής αέρα αλλά δύο επίπεδα (4: υψηλό και 5: δυνατό), με σκοπό να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της ατράκτου και άρα των ερυθρών και υπό αυτές τις συνθήκες. Φάνηκε πώς από τις 0° κιάλας ανύψωση της ατράκτου, οπότε αύξηση της δυναμικής άνωσης με την μεγαλύτερη της τιμή να καταγράφεται στις 30° και στις 40° επίσης στα 15 cm, με μεγαλύτερη κλίση της επιφάνειας της εμπρός, ενώ αμέσως μετά στις 50° ξεκινά η πτώση της, η κάθοδος της ατράκτου και η μείωση της κλίσης προς «επιπέδωση». Ξεκάθαρα λοιπόν παρατηρούμε την σταθερότητα της ατράκτου στις 30° και 40° και αμέσως μετά την αδυναμία να ανυψωθεί όσο αυξάνει η γωνία α, εξαιτίας του ότι η Fολ αεροδύναμη είναι μεγαλύτερη του βάρους της, έχουν αυξηθεί οι τριβές, έχει αυξηθεί η δύναμη αντίστασης και αναλόγως και η έλξη εξαιτίας της υψηλής πια ταχύτητας. Οπότε όσο αυξάνει η γωνία α τόσο αυξάνει και αντίσταση της πτήσης της ατράκτου. Συνεπώς σε μια τέτοια ταχύτητα αιματικής ροής τα RBCs αναμένεται να αλλάξουν την

κίνηση της επιφάνειας τους, σε πλέον σχεδόν μετωπιαία, με την ιδιότητά τους να στοιβάζονται ως νομίσματα αυξάνουν οι αντιστάσεις, οι τριβές και οι δυνάμεις, με αποτέλεσμα να πρέπει αναγκαστικά να συμβεί αυτό για να επιτευχθεί η ροή τους στα αγγεία. Μετά και τις 60° γωνίας και εξαιτίας της μνήμης σχήματος που διαθέτουν επιστρέφουν σταδιακά στην προηγούμενη κατάσταση τους (Ye, & Peng, 2019).

Στην τελευταία συνθήκη που μελετήθηκε, με δυνατή πλέον ταχύτητα ροής αέρα σημειώθηκε έως τις 20° η ίδια σχεδόν αύξηση δυναμικής άνωσης με το προηγούμενο επίπεδο και η ίδια συμπεριφορά της ατράκτου όσον αφορά στην κλίση προς τα εμπρός της επιφάνειάς της. Στις 30° και στις 40° πλέον καταγράφηκε η μεγαλύτερη σταθερή ανύψωση της και άρα η μεγαλύτερη τιμή δυναμικής άνωσης (15cm) με την άτρακτο να έρχεται σχεδόν όρθια με όλη την μετωπιαία επιφάνεια της ενάντια στον αέρα. Στις 50° ξεκίνησε η μείωση με την άτρακτο να παραμένει με την μετωπιαία επιφάνεια σχεδόν όρθια ενώ στις 60° μειώθηκε αισθητά (8cm). Εξαιτίας της πολύ δυνατής ταχύτητας και όσων δυνάμεων αναφέραμε και στο προηγούμενο επίπεδο η άτρακτος διατήρησε την πτήση στις 30° και 40° ενώ αμέσως μετά άρχισε την κάθοδο και την σταδιακή «επιπέδωση» της επιφάνειάς της. Περιμένουμε δηλαδή ότι η συμπεριφορά των ερυθρών θα είναι ανάλογη της ατράκτου. Συνεπώς τα ερυθρά στην έντονη αιματική ροή, προκειμένου να διαπεράσουν τα αγγεία θα αναγκαστούν να παραμορφώσουν την επιφάνειά τους. Τείνουν δηλαδή να αντιμετωπίσουν τις αντιστάσεις, τους στροβίλους και τις τριβές που αναπτύσσονται λαμβάνοντας σταδιακά στο σχήμα πώματος δεξαμενής και αργότερα της «επιπέδωσης». Ο

σκοπός τους, δεν είναι άλλος από το να καταφέρουν να διέλθουν από τις στενές διατομές των αγγείων του κυκλοφορικού (Skalak, & Branemark, 1969).

Όλα τα παραπάνω, βασικό είναι να αναφέρουμε πως εξαρτώνται βέβαια και από το ποσοστό του αιματοκρίτη και της αιμοσφαιρίνης στο αίμα και γι αυτό το λόγο εξετάζονται, ιδανικά, κατά περίπτωση και εξατομικευμένα από άνθρωπο σε άνθρωπο.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι τα ερυθρά αιμοσφαίρια χάρη του σχήματός τους, την ανατομίας τους και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της κυτταρικής τους μεμβράνης έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζονται, υπό φυσιολογικές συνθήκες για τον ανθρώπινο οργανισμό, με σκοπό να φέρουν εις πέρας τις βασικές τους λειτουργίες. Ιδιαίτερα, οι λειτουργίες τους είναι ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο και η συμπεριφορά τους κατά την αιματική ροή αποτελεί παράγοντα της σωστής λειτουργίας του κυκλοφορικού συστήματος.

Η ραγδαία εξέλιξη των Νέων Τεχνολογιών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων εκπαιδευτικών εφαρμογών και μεθόδων οι οποίες αναμένεται να επηρεάσουν καθοριστικά τις εκπαιδευτικές συνθήκες και τις διδακτικές πρακτικές (Φραγκούλης κ.α, 2017). Οι προσομοιώσεις μέσω πειραμάτων μπορούν να χρησιμεύσουν και ως βοηθητικά μέσα για τη διδασκαλία όλων των μαθημάτων, ενώ θεωρούν την ενσωμάτωση τους χρήσιμη και ενδιαφέρουσα αφού θα βελτιώσουν την ποιότητα της εκπαίδευσης. Η συστηματική επιμόρφωση επομένως των εκπαιδευτικών και ο επαρκής εξοπλισμός πρέπει να αποτελούν θέματα πρωταρχικής σημασίας στην εκπαιδευτική συζήτηση της επιστημονικής κοινότητας.

## 7. Βιβλιογραφία

Αρμακόλας, Σ., (2009). Οι απόψεις των σπουδαστών της ΑΣΠΑΙΤΕ σε σχέση με την χρήση των βιωματικών τεχνικών στη διδασκαλία των μαθημάτων στο εργαστήριο Φυσικής. *Πρακτικά 1ου Συνεδρίου ΑΣΠΑΙΤΕ*, σ.109.

Artemieva, E. (2016). The application of projects methods in training students in secondary vocational education. *Proceedings: Conference Olympiada techniky Plzeň*, pp. 153-155. Západočeská Univerzita v Plzni.

Behbahani M., Behr M., Hormes M., Steinseifer U., Arora D., Coronado O., & Pasquali M. (2009). A review of computational fluid dynamics analysis of blood pumps. *European Journal of Applied Mathematics*, 20(4), 363-397.

Cameron, J. R., Skofronick, J. G., & Grant, R. M. (2001). *Φυσική του ανθρώπινου σώματος*. Επιμέλεια ελληνικής έκδοσης Γεωργίου Ε., Γιακουμέκης Ε., Κότπου Σ., Ντάλλες Κ., Σερέφογλου Α., Σκυλλάκου-Λουίζη Α., Επιστημονικές εκδόσεις Παρισιάνου ΑΕ, Αθήνα.

Chang H. Y., Li X., & Karniadakis G. E. (2017). Modeling of biomechanics and biorheology of red blood cells in type 2 diabetes mellitus. *Biophysical journal*, 113(2):481-490.

Dupire J., Socol M., & Viallat, A. (2012). Full dynamics of a red blood cell in shear flow. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(51), 20808-20813.

Fedosov D. A., Caswell B., & Karniadakis G. E. (2010). A multiscale red blood cell model with accurate mechanics, rheology, and dynamics. *Biophysical journal*, 98(10), 2215-2225.

Fischer T. M. (2004). Shape memory of human red blood cells. *Biophysical journal*, 86(5):3304-3313.

Halliday D. & Resnick R., (1966), *Φυσική Μέρος Α*, Αθήνα, Εκδόσεις Γ.Α Πνευματικός επιστημονικές & τεχνικές εκδόσεις.

Hüttner, A. (2008). *Διδακτική τεχνολογικών μαθημάτων*. Εκδόσεις Ίων

Καμαρινού, Δ. (2012). *Η μέθοδος project στη πράξη*. Εκδόσεις Paregraph.

Li X., Li H., Chang H. Y., Lykotrafitis G., & Em Karniadakis G. (2017). Computational biomechanics of human red blood cells in hematological disorders. *Journal of biomechanical engineering*, 139(2).

Mach, P., Krotký, J., Αρμακόλας, Σ., Γομάτος, Λ. (2017). Εκπαιδευτικοί Τεχνολογικών μαθημάτων στην Εκπαίδευση. Μία συγκριτική προσέγγιση των εκπαιδευτικών συστημάτων Ελλάδας και Τσεχίας. *Πρακτικά εργασιών 3ου Συνεδρίου "Επαγγελματική Εξέλιξη & Ανάπτυξη του Τεχνολόγου Εκπαιδευτικού"*, σ. 178-183. Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε

Memmo, P., Miczio, L., Merola, F., Mugnano, M., & Ferraro, P. (2019). Hydrodynamic red blood cells deformation by quantitative phase microscopy and Zernike polynomials. *Frontiers in Physics*, 7, 111.

Michaloudis, A., Molohidis, A., & Hatzikraniotis, E. (2018). Tracing Students' Actions in Inquiry-Based Simulations. In *Research on e-Learning and ICT in Education* (pp. 293-313). Springer, Cham.

Roblyer, M.D. (2008). *Εκπαιδευτική Τεχνολογία και Διδασκαλία*. Εκδόσεις Έλλην.

Papadiamantopoulou, M., Papadiamantopoulou, C., Armakolas, S., Gomas, L. (2016). Pre-service and in-service teacher training: the use of technology in the greek educational system. *Proceedings: Conference Olympiada techniky Plzeň*, pp. 32-40. Západočeská Univerzita v Plzni.

Skalak, R., & Branemark, P. I. (1969). Deformation of red blood cells in capillaries. *Science*, 164(3880), 717-719.

Πλέσσας Σ. & Κανέλλος Ε, (1997) *Φυσιολογία του Ανθρώπου 1*, Αθήνα, Εκδόσεις Φάρμακον – Τύπος.



Πάντζαλης, Ν. (2017). *Μηχανική των Ρευστών*, Β Έκδοση, Εκπαιδευτικό κείμενο Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for scientists and engineers*. Cengage learning.

Xiao, L., Liu, Y., Chen, S., & Fu, B. (2016). Simulation of deformation and aggregation of two red blood cells in a stenosed microvessel by dissipative particle dynamics. *Cell biochemistry and biophysics*, 74(4), 513-525.

Ye, T., & Peng, L. (2019). Motion, deformation, and aggregation of multiple red blood cells in three-dimensional microvessel bifurcations. *Physics of Fluids*, 31(2), 021903.

Young, H. D., Freedman, R. A., Sandin, T. R., & Ford, A. L. (1996). *University physics* (Vol. 9). New York: Addison-Wesley.

Φραγκούλης, Ι., Χαλέλλη, Ε., Αρμακόλας Σ. (2017). Διερεύνηση της ενσωμάτωσης των ΤΠΕ από τους εκπαιδευτικούς στο σύγχρονο σχολείο. Στο Λ., Κυριακίδης, Γ., Ιακωβίδης, Δ., Πάντα πρακτικά διεθνούς συνεδρίου *Εκπαιδευτική Ηγεσία, Αποτελεσματική Διοίκηση και Ηθικές Αξίες*, Τόμος Γ, σελ, 370-382. Ανακτήθηκε από:

[http://www.leadership2017.uom.gr/wp-content/uploads/2018/09/Volume\\_3.pdf](http://www.leadership2017.uom.gr/wp-content/uploads/2018/09/Volume_3.pdf)

Ψυχάρης, Σ., Κοτζαμπασάκη, Ε., Καλοβρέκτης, Κ. (2018). Υπολογιστική Σκέψη, Επιστημολογία των Μηχανικών και Υπολογιστική Παιδαγωγική: Μια πρόταση εισαγωγής του STEM στην εκπαίδευση. *Εκπαίδευση & Επιστήμες*, 1, σ. 1-11. Σχολή Θετικών Επιστημών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

#### Ιστοαναφορές

<https://www.anatomynote.com/human-anatomy/cell-and-tissue/red-cell-erythrocyte-development/>

Χρόνης Ν., Εισαγωγή στη Βιοϊατρική Μηχανική, *Μηχανική Ρευστών*, Πανεπιστήμιο Κρήτης: [https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ET\\_Y494/notes/2016/Fluid%20Mechanics\\_Lectures.pdf](https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ET_Y494/notes/2016/Fluid%20Mechanics_Lectures.pdf)