

# Η Παράξενη Συμπεριφορά κάποιων Μη Νευτώνειων Ρευστών

Θεοχαροπούλου Ηλιάνα<sup>1</sup>, Μπακιριτζή Δέσποινα<sup>2</sup>, Οικονόμου Ευαγγελία,  
Σαμαρά Κατερίνα<sup>3</sup>, Τζάμου Βασιλική<sup>4</sup>

1<sup>ο</sup> Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

<sup>1</sup>, <sup>2</sup>euageliaoikonomou@gmail.com, mpa.despina@gmail.com, <sup>3</sup>katsam14@gmail.com,

<sup>4</sup>vassotz@gmail.com

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Κλαίρη Αχιλλέως, Φυσικός

1<sup>ο</sup> Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

cachilleosa@gmail.com

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

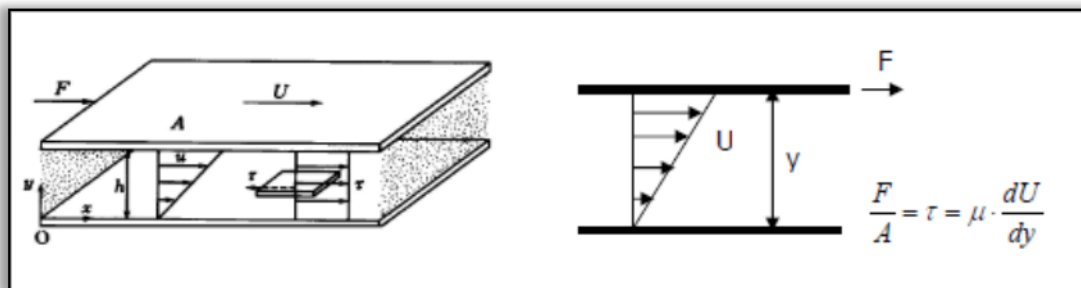
Στην καθημερινότητα μας χρησιμοποιούμε πολλά νευτώνεια αλλά και μη νευτώνεια ρευστά. Νευτώνεια ρευστά ονομάζονται τα ρευστά τα οποία μπορούν να συμπεστούν ενώ στη διάρκεια της ροής τους αναπτύσσονται δυνάμεις εσωτερικής τριβής μεταξύ των μορίων τους και δυνάμεις συνάφειας μεταξύ των μορίων και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται. Αντίθετα ένα μη-Νευτώνειο είναι ένα ρευστό το οποίο παρουσιάζει μικρότερης κλίμακας ιδιότητες από αυτές των αντίστοιχων Νευτώνειων ρευστών. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες μη νευτώνειων υγρών με διαφορετική συμπεριφορά.. Ωστόσο στην εργασία αυτή μελετούμε τα πλαστικά Bingham όπως είναι η μαγιονέζα, η μουστάρδα και η κέτσαπ και τα shear thickening, όπως το διάλυμα νερού-αμύλου. Προσπαθούμε να διαπιστώσουμε αν η ύπαρξη μη νευτώνειων υγρών ανάμεσα σε δύο ξύλινες πλάκες μεταβάλλει την δύναμη της τριβής και με ποιο τρόπο. Έχει διαπιστωθεί πως, η ύπαρξη μη νευτώνειων υγρών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τριβή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μη-Νευτώνεια συμπεριφορά ρευστού είναι τόσο διαδεδομένη στη φύση και την τεχνολογία που δεν θα ήταν υπερβολή να πούμε ότι η Νευτώνεια συμπεριφορά ρευστού αποτελεί εξαίρεση παρά κανόνα.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** non-Newtonian fluids, shear stress, shear rate, viscosity

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Νευτώνεια ρευστά ονομάζονται τα ρευστά τα οποία μπορούν να συμπεστούν ενώ στη διάρκεια της ροής τους αναπτύσσονται δυνάμεις εσωτερικής τριβής μεταξύ των μορίων τους και δυνάμεις συνάφειας μεταξύ αυτών και των τοιχωμάτων των δοχείων ή αγωγών που περιέχονται (el.wikipedia.org). Αντίθετα ένα μη-Νευτώνειο ρευστό είναι ένα ρευστό το οποίο παρουσιάζει μικρότερης κλίμακας ιδιότητες από αυτές των αντίστοιχων Νευτώνειων ρευστών. Συνηθέστερα το ιξώδες ,η αντίσταση σε παραμόρφωση ή άλλες δυνάμεις στα μη-Νευτώνεια ρευστά εξαρτώνται από την τάση ολίσθησης. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μη-Νευτώνεια ρευστά με ιξώδες που δεν επηρεάζεται από την τάση ολίσθησης.

**Σχήμα 1:** Συμπεριφορά υγρού, που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο επιφάνειες, όταν εφαρμόζεται δύναμη στην πάνω επιφάνεια.



## Τα νευτώνεια ρευστά

Σε ένα Νευτώνειο ρευστό, η σχέση μεταξύ της τάσης ολίσθησης (shear stress) και της ταχύτητας ολίσθησης (shear rate) είναι γραμμική και η ευθεία περνάει από την αρχή των αξόνων (en.wikipedia.org). Ακόμη όσο πιο «λεπτόρρευστο» είναι το ρευστό, τόσο πιο χαμηλό ιξώδες έχει, και τόσο πιο μικρή κλίση θα έχει η ευθεία με τον άξονα των  $x$  (ταχύτητα ολίσθησης). Ένα τέτοιο ρευστό μπορεί και «ρέει» πιο εύκολα, δηλαδή παρουσιάζει μεγάλη παραμόρφωση με μικρή τάση. Αντίθετα όσο πιο παχύρρευστο είναι, τόσο πιο μεγάλη κλίση έχει η ευθεία στο διάγραμμα τάση ολίσθησης-ταχύτητα ολίσθησης.

## Τα μη νευτώνεια ρευστά

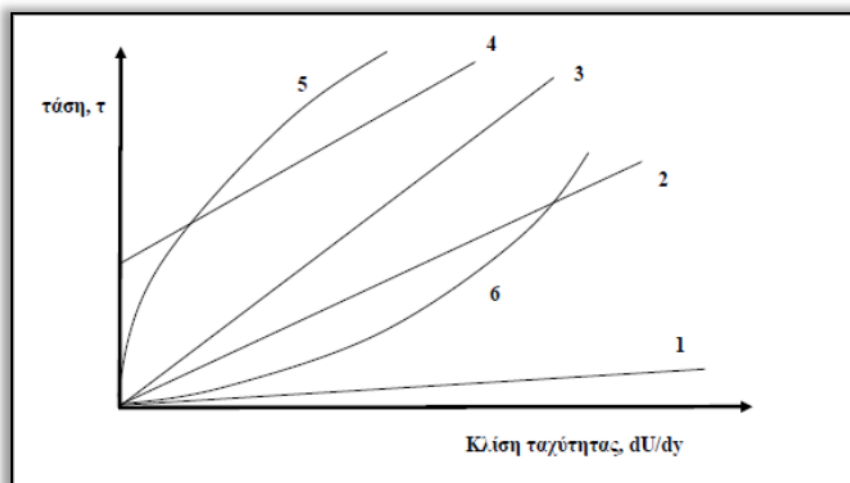
Σε ένα μη-Νευτώνειο ρευστό, η σχέση μεταξύ της τάσης ολίσθησης και της ταχύτητας ολίσθησης είναι διαφορετική, μερικές φορές εξαρτάται και από τον χρόνο. Το διάγραμμα είναι είτε ευθεία που δεν περνά από την αρχή των αξόνων, είτε καμπύλη. Επομένως, ένας σταθερός συντελεστής ιξώδους δεν μπορεί να οριστεί (blogs.sch.gr/geoparaevan/files/2009).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες μη νευτώνειας συμπεριφοράς: α. η κατηγορία στην οποία το ιξώδες είναι ανεξάρτητο του χρόνου (Time-independent viscosity) και β. η κατηγορία των ιξωδοελαστικών (Viscoelastic).

Στην πρώτη κατηγορία το ιξώδες των υλικών καθορίζεται αποκλειστικά από τον ρυθμό παραμόρφωσης που τους επιβάλλεται τη στιγμή που τα μελετάμε. Αυτά κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την καμπύλη του ρυθμού παραμόρφωσης- τάσης ολίσθησης. Διακρίνονται σε λεπτόρρευστα (shear thinning/pseudoplastic) τα οποία σε μικρούς ρυθμούς παραμόρφωσης εμφανίζουν μεγάλες τιμές ιξώδους, σε παχύρρευστα (shear thickening/dilatants) τα οποία έχουν ακριβώς την αντίστροφη συμπεριφορά από τα λεπτόρρευστα, δηλαδή το ιξώδες τους αυξάνει καθώς αυξάνει ο ρυθμός παραμόρφωσης τους και τέλος σε ιξωδοπλαστικά στα οποία πρέπει να ασκηθεί τάση ολίσθησης μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή ώστε να ξεκινήσει η ροή τους. Ξεπερνώντας αυτό το όριο συνήθως συμπεριφέρονται όπως τα λεπτόρρευστα.

Η δεύτερη κατηγορία, τα ιξωδοελαστικά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ρευστών, εμφανίζοντας επαναφορά στην κατάσταση ισορροπίας τους μετά από κάποια παραμόρφωσή τους, ενώ πρέπει να ασκηθεί τάση ολίσθησης μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή, ώστε να ξεκινήσει η ροή τους. Διακρίνονται σε: α) θιξοτροπικά (thixotropic), στα οποία το ιξώδες μειώνεται με το χρόνο καθώς ασκείται δύναμη σε αυτά. Αν αυτή η δύναμη σταματήσει να δρα το ρευστό καθυστερεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. β) rheopectic, τα οποία συμπεριφέρονται αντίστροφα από τα προηγούμενα.

Η έρευνά μας ασχολείται με τα ρευστά που γίνονται λεπτόρρευστα όταν ασκηθεί σε αυτά κατάλληλη δύναμη. Ανήκουν στην κατηγορία πλαστικά Bingham και είναι η μαγιονέζα, η ketchup, και η μουστάρδα. Επίσης η έρευνα μας ασχολείται με διάλυμα νερού-αμύλου το οποίο γίνεται παχύρρευστο (shear thickening) όταν ασκηθεί σε αυτό δύναμη (dSPACE.lib.ntua.gr/bitstream).



**Σχήμα 1:** Συμπεριφορά σωμάτων σε διάτμηση: 1-αέριο, πολύ μικρό ιξώδες, 2- λεπτόρρευστο υγρό (shear thinning), 3- παχύρρευστο υγρό (shear thickening), 4-πλαστικό Bingham, 5-ψευδοπλαστικό υγρό (pseudoplastic), 6-διασταλτικό υγρό. Τα 4,5 και 6 είναι μη-νευτώνεια.

Η πειραματική μας εργασία εστιάζεται στην μέτρηση της τριβής και του συντελεστή τριβής με την προσθήκη μη-νευτώνειων υγρών ανάμεσα σε δύο επιφάνειες. Με τα πειράματά μας, έγινε προσπάθεια να απαντηθούν κάποια δικά μας ερωτήματα.

Η παρουσία μη-νευτώνειων υγρών επηρεάζει την τιμή της τριβής και του συντελεστή τριβής;

Μεταβάλλεται η τιμή της τριβής και του συντελεστή τριβής αν αυξήσουμε τη μάζα της πάνω επιφάνειας;

Η τιμή της τριβής των επιφανειών με παρουσία μη-νευτώνειων υγρών εξαρτάται από την επιφάνεια των τριβόμενων επιφανειών;

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Αρχικά ανάμεσα σε μια στερεωμένη σταθερή ξύλινη πλάκα 40cm και μια κινούμενη ξύλινη πλάκα 15cm τοποθετήσαμε διάφορα μη νευτώνεια ρευστά όπως κέτσαπ, μουστάρδα, μαγιονέζα, διάλυμα νερού-αμύλου καθώς και ένα Νευτώνειο υγρό, το λάδι.

Δέσαμε με νήμα την πλάκα των 15cm και περάσαμε το νήμα μέσα από μια τροχαλία που ήταν στερεωμένη στο πάγκο εργασίας. Δένοντας βαρίδια στο νήμα μετρήσαμε την ελάχιστη μάζα των βαριδίων που έπρεπε να προσθέσουμε και τον χρόνο ώστε η ξύλινη πλάκα να διανύσει την απόσταση των 32cm.

Αρχικά μετρήσαμε το χρόνο χωρίς να υπάρχει κάτι ανάμεσα στις δύο πλάκες. Μετά επαναλάβαμε τη διαδικασία με τα παραπάνω ρευστά ανάμεσα στις ξύλινες πλάκες.

Από τις τιμές της μάζας των βαριδίων που βρήκαμε και γνωρίζοντας τη μάζα της ξύλινης πλάκας που χρησιμοποιήσαμε υπολογίσαμε την τριβή (T) και το συντελεστή τριβής (μ) σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

$$\Sigma F_y = 0 \text{ ή } B - N = 0 \text{ ή } B = N = m_1 g$$

$$\Sigma F_x = m_1 a \text{ ή } F - T = m_1 a \text{ ή } m_2 g - \mu N = m_1 a \text{ ή } \mu = \frac{-m_1 a + m_2 g}{N} \text{ ή } \mu = \frac{m_2 g - m_1 a}{m_1 g} \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{2} a t^2 \text{ ή } a = \frac{2x}{t^2} \quad (2)$$

Οπότε η (1) :

$$\mu = \frac{m_2 g - m_1 \frac{2x}{t^2}}{m_1 g}$$

$$T = \mu N \text{ ή } T = \mu m_1 g$$

Όπου :  $g=10\text{m/s}^2$

$m_1$ : η μάζα του ξύλου ή το άθροισμα της μάζας του ξύλου και της μάζας που προσθέτουμε πάνω του

$m_2$ : η μάζα των βαριδίων

B: το συνολικό βάρος της άνω ξύλινης πλάκας

N: η κάθετη αντίδραση στην άνω ξύλινη πλάκα

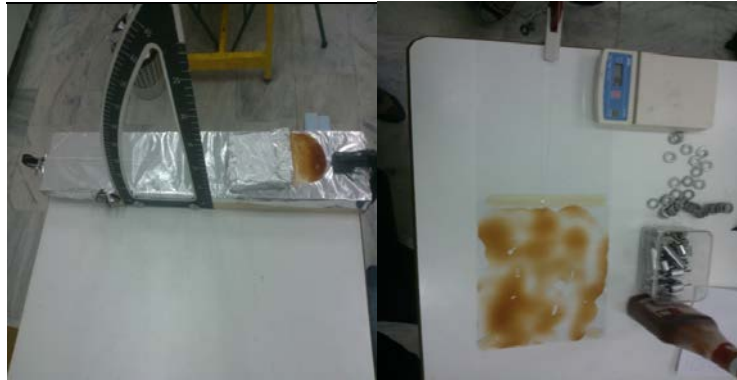
F: η οριζόντια δύναμη που ασκείται από τα βαρίδια στην ξύλινη πλάκα

a: η επιτάχυνση που αποκτά η ξύλινη πλάκα και

x: η μετατόπιση της ξύλινης πλάκας.

Στην συνέχεια επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία όμως αντί για ξύλινες πλάκες χρησιμοποιήσαμε διαφάνειες εμβαδού  $630\text{cm}^2$  για τις οποίες πραγματοποιήσαμε μετρήσεις για ολόκληρες διαφάνειες, διαφάνειες κομμένες στο μισό και στα τέσσερα.

**Εικόνα 1:** Αριστερά φαίνεται το πρώτο πείραμα και δεξιά το δεύτερο.



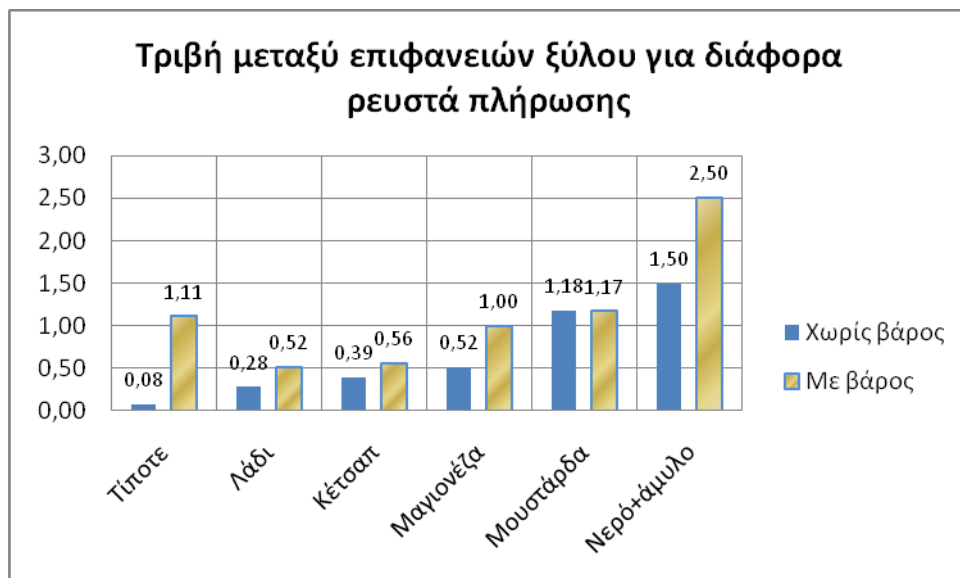
### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους πίνακες 1 και 2 φαίνονται οι τιμές που μετρήθηκαν για την τριβή και το συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο ξύλων βάζοντας ανάμεσα στα ξύλα το αντίστοιχο ρευστό. Στο διάγραμμα 1 φαίνεται η τριβή όπως υπολογίστηκε για τα διάφορα υλικά όταν η επάνω ξύλινη επιφάνεια είναι χωρίς βάρος ή με βάρος. Το βάρος που προστίθεται είναι 1,48N.

**Πίνακας 1:** Οι τιμές της τριβής και του συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο ξύλων με την προσθήκη αντίστοιχου υλικού ανάμεσά τους.

Υλικό	Τριβή T (N)	Συντελεστής Τριβής $\mu$
Κέτσαπ	0,39	$3,37 \cdot 10^{-3}$
Μουστάρδα	1,1765	$8,78 \cdot 10^{-3}$
Μαγιονέζα	0,52	$4,67 \cdot 10^{-3}$
Μείγμα νερού-αμύλου	1,499	$12,93 \cdot 10^{-3}$
Λάδι	0,28	$2,43 \cdot 10^{-3}$
Τίποτε	0,0795	$0,75 \cdot 10^{-3}$

**Διάγραμμα 1:** Οι τιμές της τριβής και του συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο ξύλων με την προσθήκη ρευστού ανάμεσά τους.



**Πίνακας 2:** Οι τιμές της τριβής και του συντελεστή τριβής μεταξύ των δύο ξύλων με την προσθήκη βάρους 1,48N στην επάνω ξύλινη επιφάνεια και με υλικό ανάμεσά τους.

Υλικό	Τριβή T (N)	Συντελεστής Τριβής $\mu$
Κέτσαπ	0,556	$0,35 \cdot 10^{-3}$
Μουστάρδα	1,171	$0,38 \cdot 10^{-3}$
Μαγιονέζα	0,999	$0,63 \cdot 10^{-3}$
Μείγμα νερού-αμύλου	2,504	$1,57 \cdot 10^{-3}$
Λάδι	0,518	$0,33 \cdot 10^{-3}$
Τίποτε	1,110	$0,70 \cdot 10^{-3}$

Στο διάγραμμα 2 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή τριβής όταν ανάμεσα στις ξύλινες επιφάνειες υπάρχει ή δεν υπάρχει ρευστό και όταν στην επάνω ξύλινη επιφάνεια υπάρχει ή δεν υπάρχει πρόσθετο βάρος .

**Διάγραμμα 2:** Οι τιμές τριβής μεταξύ των δύο ξύλων με την προσθήκη βάρους 1,48N επάνω στο ξύλο και το αντίστοιχο υλικό ανάμεσά τους.



Ο πίνακας 3 είναι συγκριτικός. Σε αυτόν φαίνονται οι τιμές του συντελεστή τριβής, για τις διαφορετικές περιπτώσεις που μελετήσαμε, όταν στο επάνω ξύλο υπάρχει ή δεν υπάρχει βάρος.

**Πίνακας 3:** Συγκριτικός Πίνακας για τις τιμές του συντελεστή τριβής ολίσθησης

ΥΛΙΚΟ	ΣΥΝΤΕΛ. ΤΡΙΒΗΣ $\times 10^{-3}$	
	Χωρίς Βάρος	Με Βάρος
Κέτσαπ	3,37	0,35
Μουστάρδα	8,78	0,38
Μαγιονέζα	4,67	0,63
Νερό+Άμυλο	12,93	1,57
Λάδι	0,31	0,33
Τίποτε	0,75	0,7

Στο δεύτερο πείραμα αντί ξύλινες επιφάνειες χρησιμοποιήσαμε διαφανείς πλαστικές επιφάνειες. Μελετήσαμε την εξάρτηση της τριβής από το εμβαδόν των επιφανειών που τρίβονται. Στον πίνακα 4 φαίνεται η μάζα των βαριδιών που χρειάστηκαν για να αρχίσει η άνω διαφάνεια να ολισθαίνει. Τα βαρίδια ασκούν μια οριζόντια δύναμη στη διαφάνεια που είναι ανάλογη του βάρους τους  $F = m \cdot g$ . Μετρούσαμε την μάζα των βαριδιών μόλις άρχισε η ολίσθηση της άνω διαφάνειας. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η δύναμη  $F$  είναι ίση με την τριβή ολίσθησης που ασκείται στην διαφάνεια.

**Πίνακας 4:** Οι τιμές της μάζας των βαριδιών που χρησιμοποιήθηκαν ώστε η διαφάνεια να αρχίσει να κινείται ελάχιστα.

Υλικό	Ολόκληρη διαφάνεια $Kgx10^{-3}$	Μισή Διαφάνεια $Kgx10^{-3}$	Ένα τέταρτο της διαφάνειας $Kgx10^{-3}$
Κέτσαπ	70,8	41,1	16,3
Μουστάρδα	98,4	57,4	22,7
Μαγιονέζα	260,3	63,4	30,6
Νερό + Άμυλο	12,4	0,6	0,6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την πειραματική μελέτη που κάναμε και μετά από την επεξεργασία των πειραματικών μας μετρήσεων διαπιστώσαμε ότι:

1. Η τριβή που εμφανίζεται ανάμεσα στις ξύλινες επιφάνειες καθώς και ο συντελεστής τριβής αυξάνονται όταν υπάρχει μεταξύ των επιφανειών κάποιο μη νευτώνειο ρευστό.

2. Όταν αυξάνεται η μάζα της άνω ξύλινης επιφάνειας, που κινείται, ο συντελεστής τριβής των μη νευτώνειων ρευστών που μελετούμε μειώνεται πάρα πολύ (συγκριτικός πίνακας).

Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται γνωρίζοντας ότι τα ρευστά που μελετούμε γίνονται λεπτόρρευστα όταν ασκηθεί σε αυτά δύναμη.

3. Τέλος, μελετώντας τον πίνακα 4, διαπιστώνουμε ότι, όσο μειώνεται η επιφάνεια επαφής με το μη νευτώνειο ρευστό μειώνεται και η μάζα του βαριδίου άρα και η δύναμη που πρέπει να ασκηθεί στην επιφάνεια, για να αρχίσει η ολίσθησή της. Επομένως οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση των μη νευτώνειων υγρών η τριβή εξαρτάται από το εμβαδόν των επιφανειών που τρίβονται. Γνωρίζουμε ότι στα συνήθη υλικά η τριβή είναι ανεξάρτητη του εμβαδού των επιφανειών που τρίβονται.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ, κ. Χ. Πολάτογλου, για τον πολύτιμο χρόνο που μας αφιέρωσε όποτε χρειαστήκαμε την βοήθειά του.

Ευχαριστούμε ακόμα τον διευθυντή του σχολείου μας κ. Σ. Φριλίγκο για την αμέριστη συμπαράσταση του, καθώς και για την ενθάρρυνσή του ώστε να επιμείνουμε στις προσπάθειές μας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<http://el.wikipedia.org/wiki/Ρευστό>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Non\\_Newtonian\\_fluid](http://en.wikipedia.org/wiki/Non_Newtonian_fluid)

[http://blogs.sch.gr/geopapaevan/files/2009/08/shmeioseis\\_general\\_3.pdf](http://blogs.sch.gr/geopapaevan/files/2009/08/shmeioseis_general_3.pdf)

[http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/2606/1/dimakopoulos\\_squarecylinder.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/2606/1/dimakopoulos_squarecylinder.pdf)