ePublishing

Open Schools Journal for Open Science

Vol 3, No 1 (2020)

Μέτρηση δύναμης ανάκρουσης μετά από πλάγια κρούση υπό μεταβλητή γωνία

Άγγελος Κονταρίνης, Κωνσταντίνος Γούδας, Μελίνα Καλλιντέρη, Καλλίνικος Κυριακουλόπουλος, Δάφνη Μανωλάκου, Λεωνίδας Παπαδόπουλος, Ιωάννης Χιωτέλλης, Γεώργιος Φύττας

doi: 10.12681/osj.22404

Copyright © 2020, Άγγελος Κονταρίνης, Κωνσταντίνος Γούδας, Μελίνα Καλλιντέρη, Καλλίνικος Κυριακουλόπουλος, Δάφνη Μανωλάκου, Λεωνίδας Παπαδόπουλος, Ιωάννης Χιωτέλλης, Γεώργιος Φύττας

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

To cite this article:

Κονταρίνης Ά., Γούδας Κ., Καλλιντέρη Μ., Κυριακουλόπουλος Κ., Μανωλάκου Δ., Παπαδόπουλος Λ., Χιωτέλλης Ι., & Φύττας Γ. (2020). Μέτρηση δύναμης ανάκρουσης μετά από πλάγια κρούση υπό μεταβλητή γωνία. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(1). https://doi.org/10.12681/osj.22404

https://epublishing.ekt.gr | **e-Publisher:** EKT | **Downloaded at:** 21/02/2026 20:37:30

Open Schools Journal for Open Science

Volume 4

Μέτρηση δύναμης ανάκρουσης μετά από πλάγια κρούση υπό μεταβλητή γωνία

Άγγελος Κονταρίνης [1], Κωνσταντίνος Γούδας[1], Μελίνα Καλλιντέρη [1], Καλλίνικος Κυριακουλόπουλος [1], Δάφνη Μανωλάκου [1], Λεωνίδας Παπαδόπουλος[1], Ιωάννης Χιωτέλλης[2], Γεώργιος Φύττας[2]

[1] Πειραματικό Λύκειο Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

[2] Φυσικός, Πειραματικό Λύκειο Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

Περίληψη

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η μέτρηση της δύναμης F που ασκείται σε σώμα όταν προσπίπτει σε αυτό ελαστική σφαίρα υπό γωνία. Η σφαίρα προσπίπτει υπό γωνία θ1 και ανακλάται υπό γωνία θ2. Κατά την επαφή με το σώμα ασκείται πάνω στη σφαίρα δύναμη F, οπότε λόγω δράσης αντίδρασης ασκείται ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς δύναμη στο σώμα. Τη δύναμη αυτή μπορούμε να την μετρήσουμε με προσαρμοσμένο δυναμόμετρο στην άκρη του σώματος. Για να εξαλείψουμε τις τριβές λόγω επαφής του σώματος με την επιφάνεια κίνησης χρησιμοποιήσαμε ιππέα που κινείται σε αεροτροχιά. Η κίνηση τόσο της σφαίρας, όσο και του ιππέα καταγράφονται από αισθητήρες κίνησης (tracker) και αναλύονται με αντίστοιχο λογισμικό. Η δύναμη F μετριέται από προσαρμοσμένο δυναμόμετρο στην άκρη του ιππέα. Οι ταχύτητες την ελαστικής σφαίρας και του ιππέα υπολογίζονται άμεσα από τα λογισμικά Vernier και VideoPhysics. Τα αναμενόμενα αποτελέσματά μας είναι μια αρμονική χρονική εξάρτηση της δύναμης με ενδιαφέρουσες περιπτώσεις την πρόσπτωση υπό μηδενική γωνία και υπό γωνία 90°.

Λέξεις κλειδιά

Κρούση υπό γωνία, ελαστική σφαίρα, ανάκρουση σωματιδίου, ιππέας, αεροτροχιά, tracker, δυναμόμετρο.

Εισαγωγή

Στη παρούσα εργασία μελετήσαμε τη κίνηση μιας μπάλας που αναπηδά πλάγια και ελαστικά σε επιφάνεια. Παραδείγματα τέτοιων κρούσεων αποτελεί η σφαίρα μπιλιάρδου που ανακρούει στο πλαίσιο ενός τραπεζιού μπιλιάρδου και η αναπήδηση μιας σφαίρας αντισφαίρισης (τένις) από τη ρακέτα. Η ταχύτητα αναπήδησης της σφαίρας σε κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια εξαρτάται από το συντελεστή ανάκρουσης ey, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της κάθετης συνιστώσας της ταχύτητας ανάκρουσης προς την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας πρόσπτωσης. Ο συντελεστής ανάκρουσης ποικίλλει μεταξύ 0 και 1 και είναι ένα μέτρο της απώλειας της κινητικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Αν δεν υπάρχει απώλεια κινητικής ενέργειας, τότε ey=1. Τα πειράματα δείχνουν ότι η ey μπορεί να υπερβεί το 1 για μια πλάγια κρούση εάν η επιφάνεια παραμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακατευθύνει την μπάλα κοντύτερα στην κάθετη διεύθυνση (Louge and 2002) (Kuninaka and Hayakawa 2004). Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η αναπήδηση μιας μπάλας του τένις σε χωμάτινο γήπεδο η οποία προσκρούει στο έδαφος υπό μικρή γωνία ως προς το έδαφος, αλλά ανακρούει σχεδόν κατακόρυφα (λόγω της αλληλεπίδρασης με μάζα χώματος που παρασύρεται από τη μπάλα και συμπεριφέρεται έτσι σχεδόν ελαστικά), με αποτέλεσμα ο λόγος ey να αυξάνεται (Brody et. al., 2002).

Η ταχύτητα αναπήδησης της μπάλας σε κατεύθυνση παράλληλη προς η επιφάνεια είναι πιο δύσκολο να υπολογιστεί, καθώς εισέρχονται και νέες παράμετροι, όπως η περιστροφή της μπάλας. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη πρώτη περίπτωση η μπάλα προσπίπτει υπό μικρή γωνία ως προς την οριζόντια διεύθυνση και γλιστράει κατά μήκος της επιφάνειας καθ’ όλη τη διάρκεια της πρόσκρουσης. Στην περίπτωση αυτή, οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν τη μεταβολή στη μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα της σφαίρας είναι η γωνία πρόσπτωσης και ο συντελεστής τριβής ολίσθησης. Αν όμως η μπάλα προσκρούσει με γωνίες κοντά στην κάθετη προς την επιφάνεια, ή ακόμη και υπό γωνίες πρόσπτωσης μέχρι και 50°,τότε η μπάλα θα γλιστρήσει για ένα εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα και σχεδόν αμέσως θα χάσει επαφή με την επιφάνεια. Στην τελευταία περίπτωση η μεταβολή της οριζόντιας συνισταμένης της ταχύτητα και η μεταβολή στην περιστροφή της μπάλας μπορεί να χαρακτηριστεί από το συντελεστή ανάκρουσης ex, ο οποίος είναι ένα μέτρο της απώλεια ενέργειας που προκύπτει από τη παραμόρφωση της μπάλας και της επιφάνειας πρόσκρουσης στην παράλληλη προς την επιφάνεια κρούσης κατεύθυνση (Cross, 2002), (Cross, 2002).

Ο μηχανισμός με τον οποίο η ιδιοπεριστροφή (spin) μεταβάλλεται σε μια πλάγια κρούση δεν είναι προφανής. Η μεταβολή στην περιστροφή σφαιρών μπορεί να αποδοθεί άμεσα στη

ροπή που προκύπτει από την τριβή (ενίοτε μόνο τη στατική τριβή) μεταξύ της σφαίρας και της επιφάνειας, ωστόσο η διεύθυνση της τριβής δεν είναι πάντα εύκολο να προσδιοριστεί. Οι μετρήσεις δείχνουν ότι η δύναμη τριβής μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της αναπήδησης και μπορεί ακόμη και να αντιστρέψει την κατεύθυνση της5. Η αντιστροφή της κατεύθυνσης της τριβής προκύπτει από το γεγονός ότι η σφαίρα συμπιέζει την επιφάνεια κατά τη διάρκεια της αναπήδησης, και η τριβή ολίσθησης δίνει τη θέση της στη στατική τριβή. Το μέγεθος και η κατεύθυνση της στατικής τριβής εξαρτώνται αντίστοιχα από το μέγεθος και την κατεύθυνση της ελαστικής παραμόρφωσης της σφαίρας και της επιφάνειας κρούσης.

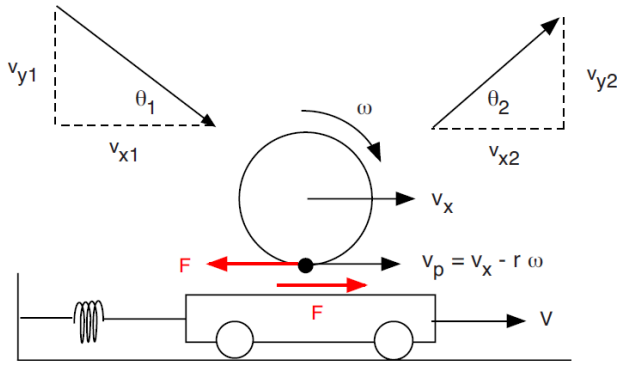
Οι τενίστες θέλουν να παράγουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ιδοπεριστροφή σε ορισμένες βολές και ενδιαφέρονται να γνωρίζουν τι είδους νήμα, στις ρακέτες τους, είναι καλύτερο για αυτό το σκοπό. Η Φυσική αυτών των βολών δείχνει ότι το καλύτερο είδος νήματος (χορδής) είναι αυτή που μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει στη συνέχεια όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ελαστική ενέργεια σε κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της ρακέτας. Οι χορδές με τραχιά υφή ασκούν μεγάλη τριβή ολίσθησης στην μπάλα και δεν επιστρέφουν αμέσως στην αρχική τους θέση μετά την πρόσκρουση, λόγω της μεγάλης δύναμης πρόσφυσης μεταξύ των αλληλεπικαλυπτόμενων χορδών. Οι χορδές με λεπτή υφή και άρα μικρή τριβή ολίσθησης τείνουν να επανέρχονται αμέσως στην αρχική τους θέση αποδίδοντας το μεγαλύτερο μέρος της ελαστικής ενέργειας στην μπάλα που ανακρούει (Brody et. al., 2002).

Στην παρούσα εργασία για να διερευνήσουμε την κίνηση των νημάτων σε μια ρακέτα θεωρήσαμε πλάγια βολή σε άκαμπτη επιφάνεια που συνδέεται με ελατήρια στην οριζόντια διεύθυνση. Ουσιαστικά τοποθετήσαμε έναν ιππέα πάνω σε μια αεροτροχιά και τον συνδέσαμε στα δύο άκρα του με ελατήρια προσαρμοσμένα σε αισθητήρες δύναμης. Πάνω στον ιππέα προσέκρουε σφαίρα που κατευθύνονταν από ορισμένο ύψος μέσω σωλήνωσης. Για να απλοποιήσουμε λοιπόν το πρόβλημα μας, θεωρήσαμε την επιφάνεια άκαμπτη και την ελαστική ενέργεια να αποθηκεύεται σε ένα εξωτερικό ελατήριο που συνδέεται με την επιφάνεια.

Μεθοδολογία

Απλοποιημένο Μαθηματικό Μοντέλο Ανάκρουσης

Ένα απλοποιημένο μοντέλο αλληλεπίδρασης μεταξύ μιας μπάλας του τένις και μιας ρακέτας απεικονίζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1 Πλάγια κρούση σφαίρας σε αμαξίδιο. Εάν η ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται στο προσαρτημένο ελατήριο επιστρέφει στη σφαίρα μέσα από τη δράση της δύναμης τριβής, η σφαίρα θα αναπήδηση με αυξανόμενη γωνιακή ταχύτητα.

Μια μπάλα μάζας m και ακτίνας r προσκρούει πλάγια υπό γωνία θ1 σε ένα αμαξίδιο μάζας M που μπορεί να κινείται ελεύθερα στην κατεύθυνση x, και είναι στερεωμένο σε άκαμπτο τοίχο μέσω ενός ελατηρίου που έχει σταθερά ελατηρίου k. Η κάθετη αντίδραση N που ασκείται πάνω στην μπάλα δίνεται από τη σχέση N=N0 sin(πt /T) με 0<t<T και T η χρονική διάρκεια της πρόσκρουσης. Αν η σφαίρα (μπάλα) προσκρούσει χωρίς να περιστρέφεται, θα ολισθήσει στην πάνω επιφάνεια του αμαξιδίου, ενώ θα ασκηθεί πάνω του οριζόντια δύναμη τριβής που δίνεται από τη σχέση F=μN, προς τα αρνητικά του άξονα x και μ ο συντελεστής τριβής ολίσθησης. Το αμαξίδιο δέχεται μια ίση και αντίθετη δύναμη τριβής προς τα θετικά του άξονα x. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, η οριζόντια ταχύτητα u_x του κέντρου μάζας της μπάλας μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση $m\frac{du_x}{dt} = -F$, και ως εκ τούτου θα έχουμε:

$$u_x = u_{x1} - \frac{\mu N_0 T}{m\pi}\left(1 - cos\frac{\pi t}{T}\right) \qquad (1)$$

Όπου u_{x1} είναι η αρχική οριζόντια ταχύτητα της μπάλας. Όπως φαίνεται καις το Σχήμα 1, ο δείκτης 1 χρησιμοποιείται για την περιγραφή των φυσικών μεγεθών πριν από την πλάγια κρούση και ο δείκτης 2 χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις αντίστοιχες παραμέτρους μετά την αναπήδηση. Με u_x και ω είναι συνιστώσα της μεταφορικής ταχύτητα της μπάλας στη διεύθυνση του άξονα X και της γωνιακής ταχύτητάς αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της αναπήδησης. Η γωνιακή ταχύτητα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση $Fr = I_{cm}\frac{d\omega}{dt}$, με Icm η ροπή αδράνειας της σφαίρας (μπάλας) ως προς άξονα που διέρχεται από το κέντρο μάζας της. Ως εκ τούτου θα έχουμε:

$$\omega = \omega_1 + \frac{\mu N_0 T r}{\pi I_{cm}}\left(1 - cos\frac{\pi t}{T}\right) \qquad (2)$$

όπου ω1 είναι η αρχική γωνιακή ταχύτητα της μπάλας. Το κατώτατα σημείο της μπάλας (σφαίρας) κινείται στην κατεύθυνση x με ταχύτητα ίση με u_p= u_x −rω. Η εξίσωση της κίνησης του αμαξιδίου κατά τη διάρκεια της ολίσθησης δίνεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$M\frac{d^2x}{dt^2} = \mu N_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) - kx \qquad (3)$$

Όπου x είναι η οριζόντια μετατόπιση του αμαξιδίου από το αρχική του θέση. Η εξίσωση (3) μπορεί να επιλυθεί πλήρως και θα έχουμε έτσι την ταχύτητα του αμαξιδίου: $V = \frac{dx}{dt}$. Κατά τη διάρκεια της αναπήδησης, η u_x ελαττώνεται, η ω αυξάνεται, η u_p μειώνεται, και η V αυξάνεται (υποθέτουμε: V=0 όταν t=0). Αν η μπάλα προσκρούσει υπό εξαιρετικά μικρή γωνία, θα ολισθήσει καθ' όλη τη διάρκεια της κρούσης και θα αναπηδήσει με u_p >V στο τέλος της πλάγιας κρούσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση που η γωνία θ1 είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε η σφαίρα (μπάλα) να προσπίπτει σχεδόν παράλληλα με την επιφάνεια το αμαξιδίου και ουσιαστικά για πεπερασμένο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της πλάγιας κρούσης να ισχύει: u_p=V. Εάν υποθέσουμε ότι η δύναμη F δε μεταβάλλεται με ασυνεχή τρόπο σε αυτό το χρονικό διάστημα, τότε η u_p μπορεί να γίνει μικρότερη από τη V και ως εκ τούτου να αντιστραφεί η κατεύθυνση της τριβής που βέβαια δε συμφωνεί με την αρχική μας υπόθεση ότι η δύναμη F δε μεταβάλλεται. Εναλλακτικά, εάν υποθέσουμε ότι η μπάλα περιστρέφεται με μηδενική δύναμη F= 0, τότε η ταχύτητα u_p δε μεταβάλλεται, αλλά η V θα μειωθεί λόγω της δύναμης που ασκείται πάνω στο αμαξίδιο από το ελατήριο. Στη περίπτωση όμως αυτή η σφαίρα (μπάλα) θα αρχίσει να ολισθαίνει πάνω στο αμαξίδιο οπότε τελικά θα εμφανιστεί δύναμη F. Κατά συνέπεια η δύναμη F πρέπει να μεταβληθεί ασυνεχώς προς μια τιμή που να επιτρέπει τη u_p να γίνει και να παραμείνει ίση με την ταχύτητα V. Η μπάλα θα συνεχίσει να περιστρέφεται, αλλά το κατώτατο σημείο της θα παραμείνει συνεχώς ακίνητο σε επαφή με το αμαξίδιο. Η μπάλα και το αμαξίδιο ουσιαστικά συμπλέκονται σαν δύο γρανάζια, επιτρέποντας την μπάλα να περιστρέφεται γρηγορότερα από ότι εάν περιστρεφόταν σε μια ακίνητη επιφάνεια (Cross, 2010). Η τελευταία συνθήκη μπορεί να επιτευχθεί αρκεί η απαιτούμενη στατική τριβή Fs να παραμένει πάντα μικρότερη από το γινόμενο μN, αλλιώς η μπάλα θα αρχίσει να ολισθαίνει.

Καθώς : u_p=V έχουμε $\frac{du_x}{dt} - r\frac{d\omega}{dt} = \frac{dV}{dt}$ ή $-\frac{F_s}{m} - \frac{F_s r^2}{I_{cm}} = \frac{F_s - kx}{M}$ (4)

Οπότε θα έχουμε: $F_s = \frac{mkx}{M(1+\frac{m}{M}+\frac{mr^2}{I_{cm}})}$

Η στατική τριβή κάθε στιγμή είναι ανάλογη της δύναμης επαναφοράς του ελατηρίου αλλά με αντίθετη κατεύθυνση. Η στατική τριβή που επενεργεί στη μπάλα μεταβάλλει τη μεταφορική και τη περιστροφή της ταχύτητα σύμφωνα με τις σχέσεις: $m\frac{du_x}{dt} = -F_s$ και $F_s r = I_{cm}\frac{d\omega}{dt}$. Η εξίσωση κίνησης του αμαξιδίου κατά τη διάρκεια της αναπήδησης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -F_s\left(\frac{1}{m} + \frac{r^2}{I_{cm}}\right) = -\frac{kx}{M+\frac{ma}{1+a}} \qquad (5)$$

όπου η ροπή αδράνειας Icm δίνεται από τη σχέση Icm =αmr2 (για την περίπτωση της μπάλας του τένις θετουμε α=0.555). Το αμαξίδιο επομένως εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση κατά τη διάρκεια της πλάγιας κρούσης και η συχνότητα της ταλάντωσης καθορίζεται από το συντελεστή επαναφοράς k (σκληρότητα του ελατηρίου) και από τη μάζα του συσσωματώματος αμαξιδίου-μπάλας. (M + m). Βεβαία, το κατώτατο σημείο της σφαίρας (μπάλας) έχει την ίδια ταχύτητα με το αμαξίδιο, ενώ τα υπόλοιπα σημεία της σφαίρας διαφορετικές από αυτήν ταχύτητες λόγω και της περιστροφικής κίνησης της σφαίρας.(Σχήμα 1).

Πριν την ολοκλήρωση της πλάγιας κρούσης η κάθετη δύναμη αντίδρασης στη σφαίρα μηδενίζεται και η σφαίρα χάνει την επαφή της με το αμαξίδιο. Εάν η στατική τριβή που δίνεται από την Εξίσωση 5 υπερβεί την τιμή μN, η μπάλα θα ολισθήσει πάνω στο αμαξίδιο. Δεν υπάρχει καμία μεταβολή στο μέγεθος ή την κατεύθυνση της τριβής εάν η σφαίρα αρχίσει να ολισθαίνει πάνω στο αμαξίδιο, αλλά τότε πλέον η τριβή είναι ανάλογη προς την κάθετη αντίδραση από το αμαξίδιο στη μπάλα και όχι ανάλογη της μετατόπισης του αμαξιδίου (που ουσιαστικά είναι ανάλογη με την ελαστική δύναμη επαναφοράς από το ελατήριο). Ωστόσο, εάν το αμαξίδιο επιστρέψει στην αρχική του θέση (θέση ισορροπίας) στο τέλος μιας περιόδου η Fs και η κάθετη αντίδραση N, προσεγγίζουν τη τιμή μηδέν.

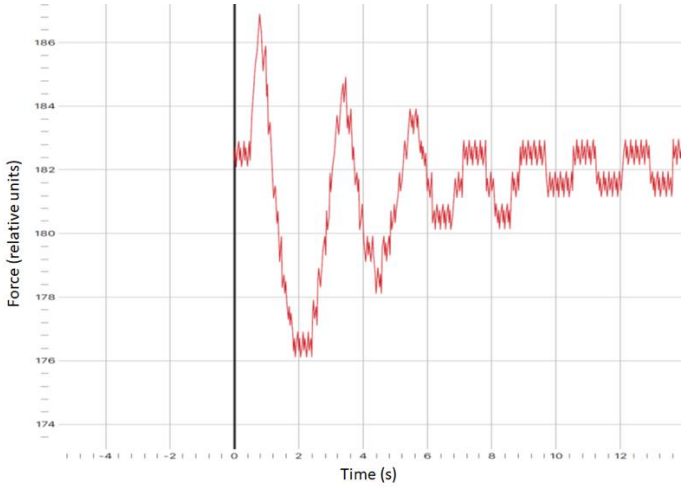
Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική μας διάταξη φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 1:

Εικόνα 1:Πειραματική διάταξη με ιππέα αεροτροχιά προσαρμοσμένο ελατήριο με συνδεδεμένο αισθητήρα δύναμης. Η σφαίρα προσπίπτει από τον προσαρμοσμένο σωλήνα, ενώ η θέση του ιππέα καταγράφεται και αναλύεται από tracker.

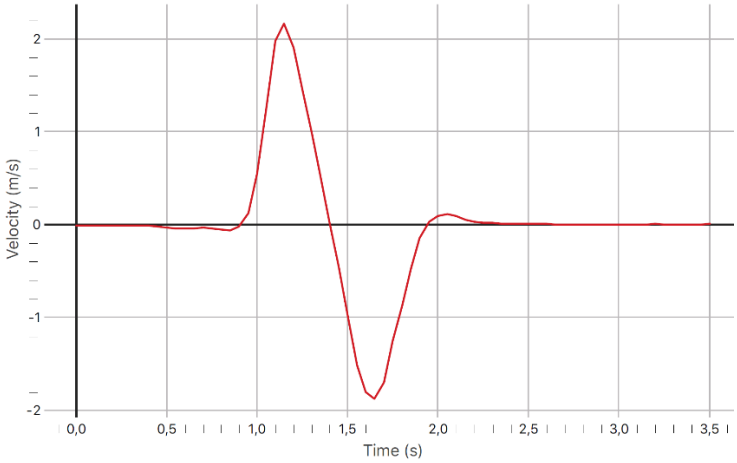
Η πειραματική μας διάταξη αποτελείται από ένα με ιππέα προσαρμοσμένο πάνω σε μια αεροτροχιά σε λειτουργία, ώστε να εξαλειφθούν οι τριβές. Στη μια άκρη του ιππέα είναι προσαρμοσμένο ελατήριο συνδεδεμένο με αισθητήρα δύναμης ώστε να καταγράφεται η ασκούμενη δύναμη. Η σφαίρα προσπίπτει από τον προσαρμοσμένο σωλήνα στο πάνω μέρος του ιππέα, στον οποίο (ιππέα) έχουμε προσαρμόσει ελαστικό πάνελ ώστε να προσομοιάζει τις επιφάνειες πρόσκρουσης. Η θέση του ιππέα καταγράφεται συνεχώς από ανιχνευτή θέσης (tracker).

Αρχικά, μελετήσαμε και αποδείξαμε ότι η δύναμη που ασκείταο πάνω στο αμαξίδιο (αντίδραση της τριβής) είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου. Αυτό προκύπτει καθώς έχουμε δεχτεί ότι $N=N0 \sin(\pi t /T)$ και $F=\mu N$. Από την καταγραφή και την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έχουμε τα ακόλουθα:



Σχήμα 2: Μεταβολή της κάθετης αντίδρασης σε σχέση με το χρόνο. Παρατηρούμε αρμονική συμπεριφορά

Από τις πειραματικές μετρήσεις παρατηρούμε την αρμονική εξάρτηση της κάθετης δύναμης (αντίδρασης) και άρα της τριβής με το χρόνο. Παράλληλα, αποδείξαμε πειραματικά ότι ισχύουν οι σχέσεις (1) και (2) για την αρμονική εξάρτηση των ταχυτήτων (μεταφορικής και περιστροφικής. Στο παρακάτω Σχήμα 3 φαίνονται οι πειραματικές μας μετρήσεις:



Εικόνα 3: Αρμονική μεταβολή της ταχύτητας πρόσκρουσης σε σχέση με το χρόνο.

Συμπεράσματα

Η έρευνα που σχεδιάσαμε και είχε σκοπό να αναζητήσει απαντήσεις στα ερωτήματά μας διεξήχθη σε δύο φάσεις: η πρώτη φάση της έρευνας ήταν διαδικτυακή με την οποία αναζητήσαμε πληροφορίες σχετικές με την ποιότητα του νερού που πίνουμε καθώς και τις συνέπειες από τη χρήση του πλαστικού στο νερό, στο περιβάλλον και στην υγείας μας. Η

δεύτερη φάση ήταν μια ενδεικτική κοινωνική με την οποία αναδείξαμε την τάση των ατόμων του περίγυρου μας όσον αφορά στην προτίμησή τους στο νερό που πίνουν.

Συμπεράσματα

Υποθέτοντας αρχικά, στη θεωρητική μας μελέτη, αρμονική εξάρτηση της κάθετης αντίδρασης και επομένως και της εξαρτώμενης από την κάθετη αντίδραση Τριβής αποδείξαμε πειραματικά την ορθότητα της υπόθεσης μας. Στη συνέχεια αποδείξαμε την ορθότητα των αντίστοιχων θεωρητικά εξαγόμενων αρμονικών σχέσεων της μεταφορικής και περιστροφικής ταχύτητας ενός σώματος που εκτελεί πλάγια κρούση. Συνεπώς και σύμφωνα με τη θεωρητική μας προσέγγιση τα αποτελέσματά μας, δείχνουν ότι επιπλέον περιστροφική ταχύτητα μπορεί να αναμένεται ως αποτέλεσμα της εφαπτομενικής κίνησης των χορδών, υπό τον όρο ότι οι χορδές επιστρέφουν ταχύτατα στην αρχική θέση τους κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης με τη σφαίρα. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, διαπιστώθηκε ότι ένα μεγάλο ποσό ιδιοπεριστροφής και άρα αυξημένη περιστροφική κίνηση θα μπορούσε να μεταδοθεί σε μια μπάλα του τένις, αν οι χορδές δεν ήταν υφασμένες μεταξύ τους, όπως φαίνεται και από τις δικές μας πειραματικές μετρήσεις που επιβεβαιώνουν τη θεωρητική προσέγγιση (Cross, 2010). Η Διεθνής Ομοσπονδία Αντισφαίρισης απαγόρευσε τέτοιες πρακτικές, επιμένοντας ότι οι χορδές πρέπει να είναι υφασμένες. Ωστόσο, είναι σαφές ότι "ολισθηρές" χορδές γλιστράνε μεταξύ τους, ακόμη και όταν είναι υφασμένες, πράγμα που είναι εύκολο να αποδειχθεί απλά τραβώντας τις χορδές προς το μέρος μας με το χέρι μας και στη συνέχεια απελευθερώνοντας τες.

Βιβλιογραφία

[1] Cross, R. (2010), Enhancing the bounce of a ball. The Physics Teacher, 48(7), 450-452
Cross, R. (2010). Impact of a ball on a surface with tangential compliance. *American Journal of Physics*, *78*(7), 716-720.
[2] H. Brody, R. Cross, and C. Lindsey, The Physics and Technology of Tennis Racquet Tech, Solana Beach, 2002, pp. 348–357.
[3] H. Kuninaka and H. Hayakawa, “Anomalous behavior of the coefficient of normal restitution in oblique impact,” Phys. Rev Lett. 93, 154301-1–4 2004.
[4] M. Y. Louge and M. E. Adams, “Anomalous behavior of normal kinematic restitution in the oblique impacts of a hard sphere on an elastoplastic plate,” Phys. Rev. E 65, 021303-1–6 2002.
[5] R. Cross, “Grip-slip behavior of a bouncing ball,” Am. J. Phys. 70, 1093–1102 2002.
[6] R. Cross, “Measurements of the horizontal coefficient of restitution for a superball and a tennis ball,” Am. J. Phys. 70, 482–489 2002.