

Ποδήλατο και Φυσική

Ποδήλατο ονομάζεται το δίτροχο όχημα, που κινείται καθώς ο αναβάτης του χρησιμοποιεί τη μυϊκή δύναμη των ποδιών του.

Στην κλασική του μορφή, το ποδήλατο αποτελείται από δύο τροχούς, οι οποίοι βρίσκονται ο ένας πίσω από τον άλλο και συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικό σκελετό. Βασικά επίσης μέρη ενός τυπικού ποδηλάτου αποτελούν το τιμόνι, η σέλα, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης και τα φρένα.

Το ποδήλατο αποτελεί ένα καλό εργαλείο, προκειμένου να αναδειχθούν ορισμένες αρχές της φυσικής

Οι δυνάμεις στις οποίες οφείλεται η ισορροπία του ποδηλάτου και η δίτροχη σταθερότητα

Οι πρώτες μαθηματικές αναλύσεις της δυναμικής του ποδηλάτου εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1890, ενώ η πρώτη απόπειρα να εξηγηθεί η «αυτοσταθερότητά» του μέσω της Φυσικής έγινε το 1910, από τον Αρνολντ Ζόμερφελντ, τον φυσικό που είχε προταθεί 81 φορές για το βραβείο Νομπέλ, και τον Φέλιξ Κλάιν, τον μαθηματικό της μη Ευκλείδειας Γεωμετρίας.

Σε μια εργασία που αποτέλεσε έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της «ποδηλατικής επιστήμης» οι δυο κορυφαίοι γερμανοί επιστήμονες την είχαν αποδώσει στο γυροσκοπικό φαινόμενο την τάση που έχει ένα περιστρεφόμενο σώμα (στην περίπτωση αυτή οι ρόδες του ποδηλάτου) να διατηρεί τον προσανατολισμό του αλλάζοντας την κατεύθυνση του άξονά του όταν κάποιες δυνάμεις το αναγκάζουν να γείρει. Η ερμηνεία των Ζόμερφελντ και Κλάιν διατήρησε την απόλυτη πρωτοκαθεδρία για περισσότερο από μισό αιώνα.

Στη δεκαετία του 1970 όμως ο βρετανός χημικός **Ντέιβιντ Τζόουνς** ήρθε να συμπληρώσει τις γενικές αρχές της ποδηλατικής ισορροπίας. Με μια μελέτη που δημοσιεύθηκε δύο φορές στην επιθεώρηση «Physics Today», επανέφερε στο παιχνίδι τον ξεχασμένο παράγοντα της γεωμετρίας με το ίχνος ή τρέιλ. Αυτό συνίσταται στην απόσταση που χωρίζει το σημείο όπου η νοητή προέκταση του άξονα του τιμονιού τέμνει το έδαφος από το σημείο επαφής της μπροστινής ρόδας με το έδαφος. Για να είναι ένα δίτροχο σταθερό, συμπέραινε ο Τζόουνς, το ίχνος του θα πρέπει να έχει οπωσδήποτε θετική τιμή - το οποίο με απλά λόγια σημαίνει ότι ο άξονας του τιμονιού θα πρέπει να «πέφτει» μπροστά από το σημείο επαφής της ρόδας με το έδαφος.

Αναθεώρηση του προβλήματος της ισορροπίας του ποδηλάτου

Ο κ. Παπαδόπουλος, φανατικός της δυναμικής του ποδηλάτου από τα πρώτα επιστημονικά του βήματα, δεν ήταν ικανοποιημένος με αυτές τις ερμηνείες. Είχε την αίσθηση ότι τα πράγματα ήταν «λειψά». Γι' αυτό και βάλθηκε να τα συμπληρώσει. «Τα συμπεράσματα αυτά δεν εξηγούσαν, απλώς ανέλυαν και στις περισσότερες περιπτώσεις είχαν λάθη» λέει. «Εμείς επιλέξαμε μια διαφορετική προσέγγιση. Θεωρήσαμε ότι μπορούσαμε να μάθουμε

κάτι κοιτάζοντας προσεκτικά για να βρούμε πού ακριβώς βρίσκονται οι σωστές εξισώσεις ώστε να φτιάξουμε ένα πραγματικό μαθηματικό μοντέλο». Συνεργαζόμενος με τον Αντι Ρουίνα στο Πανεπιστήμιο Κορνέλ στη Νέα Υόρκη, κατέληξε σε μια εξίσωση ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ορισμένες προβλέψεις της όμως ήταν μάλλον «απίστευτες» αφού κατέρριπταν και τις δύο γενικώς αποδεκτές βασικές αρχές της ποδηλατικής δυναμικής υποδεικνύοντας ότι ένα ποδήλατο μπορεί να εξακολουθεί να είναι σταθερό χωρίς γυροσκοπικό φαινόμενο και χωρίς θετικό ίχνος ακόμη και χωρίς τον ποδηλάτη.

Ένα τόσο αιρετικό συμπέρασμα θέλει πολλή δουλειά για να επιβεβαιωθεί και, καθώς αυτή ήταν μια ενασχόληση στην οποία οι δυο επιστήμονες εντρυφούσαν κυρίως στον ελεύθερο χρόνο τους, η λύση έμενε πίσω. Το 2002 όμως η τύχη έφερε στον δρόμο τους τον Αρεντ Σβαμπ, καθηγητή στο Πολυτεχνείο του Ντελφτ στην Ολλανδία και επίσης φανατικό της δυναμικής των ποδηλάτων. Με τη βοήθεια του κ. Σβαμπ και ενός ακόμη συναδέλφου τους, του Γιάαπ Μάγιαρντ από το Πανεπιστήμιο του Νότιγχαμ στη Βρετανία, οι εργασίες επιταχύνθηκαν. Οι προηγούμενες μελέτες πέρασαν από το κόσκινο της ανάλυσης και όπως αποδείχθηκε ακόμη και οι αυθεντίες Ζόμερφελντ και Κλάιν, και πριν από αυτούς ο Γουίπλ, είχαν σφάλει: είχαν στηρίξει τα συμπεράσματά τους σε μεμονωμένες περιπτώσεις και... λανθασμένα μαθηματικά!

Από αυτή τη συνεργασία προέκυψε μια μελέτη με το λεγόμενο «Two-Mass-Skate Bicycle» ή TMS, του οποίου η πλήρης ανάπτυξη δημοσιεύθηκε το 2011 στο «Science». Το TMS αποδεικνύει και στην πράξη, ότι ένα ποδήλατο δεν χρειάζεται απαραίτητα τη «βοήθεια» του γυροσκοπικού φαινομένου ή του ίχνους για να είναι σταθερό.

Οι δυνάμεις στις οποίες οφείλεται η ισορροπία του ποδηλάτου και η δίτροχη σταθερότητα

Οι επιστήμονες έφτασαν σε αυτό το συμπέρασμα αφού διεξήγαγαν ένα πείραμα:

α) κατασκεύασαν ένα ποδήλατο με δύο μικρούς τροχούς, που ο καθένας ήταν συνδυσασμένος με έναν δίσκο αντίθετης περιστροφής για την εξάλειψη των αποτελεσμάτων του γυροσκοπικού φαινομένου και με τον άξονα του τιμονιού να βρίσκεται πίσω από το σημείο του μπροστινού τροχού επαφής, δίνοντας στο ποδήλατο ένα ελαφρώς αρνητικό ίχνος.

β) στη συνέχεια έδωσαν στο ποδήλατο ώθηση και παρατήρησαν ότι το ποδήλατο ισορροπούσε εφόσον είχε αναπτύξει κατάλληλη ταχύτητα.

γ) όταν έσπρωξαν το ποδήλατο προς μία πλευρά τότε εκείνο επέστρεψε πίσω σε όρθια θέση.

Οι επιστήμονες απέδωσαν την αυτοσταθερότητα του ποδηλάτου βασιζόμενοι στο πείραμά τους. Κατέληξαν ότι οφείλεται στο γεγονός ότι το κέντρο μάζας του μπροστινού τροχού του ποδηλάτου είναι χαμηλότερο από εκείνο του οπίσθιου τροχού

Συμπέρασμα για την αυτοσταθερότητα του ποδηλάτου

Ποιος είναι τότε λοιπόν ο παράγοντας που του χαρίζει την ισορροπία του;

Η απάντηση και των τριών ειδικών είναι ομόφωνη: δεν ξέρουμε. «Το παράδοξο με την ιστορία μας» λέει ο Αντι Ρουίνα «είναι ότι τελικά δεν λύσαμε το πρόβλημα. Απλώς δείξαμε ότι οι άλλοι δεν είχαν λύσει το πρόβλημα. Και αυτό όμως είναι χρήσιμο γιατί μάθαμε ότι δεν ξέραμε πολλά πράγματα».

Οπότε μετά από ενάμιση αιώνα βρισκόμαστε πάλι μπροστά στο αρχικό ερώτημα χωρίς απάντηση: «Τί είναι αυτό που μας κάνει να ισορροπούμε με ευκολία πάνω στο ποδήλατο όταν κινούμαστε;»

Ο ρόλος του τιμονιού στην ισορροπία του ποδήλατου

Στα διάφορα σχολικά βιβλία φυσικής διεθνώς, οι συγγραφείς δεν έχουν λάβει υπόψη την εμπειρία των ποδηλατιστών και η αντιμετώπιση του ποδηλάτου δεν γίνεται με την δέουσα προσοχή. Όταν αναφέρονται στα ποδήλατα και στα αυτοκίνητα παραλείπουν το τιμόνι τους και την επίδρασή του στην κίνηση του οχήματος. Αντιμετωπίζουν το όχημα σαν ένα κουτί χωρίς ρόδες επάνω στο δρόμο.

Υπάρχουν πολλά βιβλία στα οποία η στροφή ενός ποδηλάτου ή αυτοκινήτου ή τρένου αποδίδεται στην κλίση του δρόμου και όχι στη λειτουργία του τιμονιού. Εφαρμόζονται σκέψεις φυσικής για την κίνηση του υλικού σημείου σε τροχοφόρα με διαστάσεις. Σε ελάχιστα βιβλία αναφέρεται ότι η κλίση του δρόμου στις στροφές χρησιμεύει μόνο για να μη ανατραπεί το όχημα.

Τα περισσότερα βιβλία θεωρούν την κεντρομόλο επιτάχυνση ως συνισταμένη του βάρους και της κάθετης αντίδρασης του κεκλιμένου επιπέδου του δρόμου στη στροφή. Τα τροχοφόρα όμως συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά και οι δυνάμεις που εξασκούνται επάνω τους δεν εφαρμόζονται όλες στο κέντρο βάρους του τροχοφόρου. Οι δυνάμεις που εξασκούνται στα οχήματα δεν τα μετατοπίζουν μόνο, αλλά όταν χρειάζεται συγχρόνως τα περιστρέφουν.

Αυτή η απλοποίηση όμως δίνει λάθος μοντέλα και οι λύσεις που προτείνονται για την κίνηση των οχημάτων δεν είναι πραγματικές. Με τέτοια απλοποιημένη θεώρηση, ένα αυτοκίνητο που μπαίνει σε ένα πέταλο (στροφή 180°) με κάποια ταχύτητα, στην έξοδο του πετάλου το αυτοκίνητο θα πηγαίνει με την όπισθεν ή για στροφή 90° θα πηγαίνει με τα πλάγια.

Στην πραγματικότητα το αυτοκίνητο σε στροφή περιστρέφεται και γύρω από τον εαυτό του. Αποτέλεσμα της απλοποιημένης προσέγγισης είναι η λάθος αντιμετώπιση του προβλήματος της κίνησης ενός τροχοφόρου. Με τον τρόπο αυτό δίνουμε λανθασμένη εξήγηση για τη λειτουργία της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί για τη μετακίνησή του. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί έχει άμεση επίδραση στον τρόπο που οδηγούμε.

Ισορροπία του ποδηλάτου στις στροφές

Το 1998 είχαμε δημοσιεύσει στο τεύχος 151 του Φυσικού Κόσμου ένα άρθρο με τίτλο «Ο τροχός και η συμπεριφορά του στο δρόμο». Τότε είχαμε ασχοληθεί με το ερώτημα πώς στρίβει το ποδήλατο, το αυτοκίνητο και το τρένο.

Η απάντηση στο διαχρονικό ερώτημα της ισορροπίας του ποδηλάτου όταν τρέχει με αρκετή ταχύτητα είναι ότι η ισορροπία του ποδηλάτου οφείλεται στην ορμή του. Βέβαια αν υπάρχει και στροφορμή δεν θα το βλάψει, θα ισορροπεί καλύτερα, αλλά θεωρούμε ότι δεν είναι απαραίτητη και αν λείπει, το ποδήλατο πάλι θα ισορροπεί εφόσον κινείται. Την άποψή μας αυτή την στηρίζουμε στην παρατήρηση ότι αν φτιάξουμε ένα ποδήλατο με ρόδες αμελητέου βάρους ή πολύ μικρής ακτίνας πάλι ο ποδηλάτης θα ισορροπεί με την ίδια ευκολία, παρά το ότι τώρα πλέον η στροφορμή του ποδηλάτου είναι αμελητέα. Την άποψή μας αυτή την επιβεβαιώνουν τα πειράματα του Αντι Ρουίνα και των συνεργατών του, που φτιάξανε ποδήλατο με διπλό τροχό, ώστε ο ένας να γυρίζει αντίστροφα από τον άλλο, οπότε μηδενίζεται η συνολική στροφορμή.

Η κίνηση του ποδηλάτου στη στροφή με στρίψιμο του τιμονιού και ταυτόχρονη κλίση του αναβάτη είναι συνθήκες που απαιτούνται για την ισορροπία του ποδηλάτου. Αν στρίψουμε το τιμόνι πρέπει αμέσως να γείρουμε προς την ίδια κατεύθυνση. Και αντίστροφα, αν το ποδήλατο για κάποιο λόγο γύρει προς τα δεξιά, πρέπει αμέσως να στρίψουμε και το τιμόνι προς τα δεξιά για να ανακτήσουμε πάλι την ισορροπία του ποδηλάτου. Σωστά λοιπόν στις διάφορες οδηγίες για την οδήγηση του ποδηλάτου, όπως είδαμε οι έμπειροι ποδηλάτες προτείνουν να στρίβουμε το τιμόνι προς την κατεύθυνση που γέρνει το ποδήλατο. Σε όρους φυσικής με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε μηδενικό άθροισμα ροπών, που είναι απαραίτητη συνθήκη για την ισορροπία κάθε στερεού σώματος.

Την ίδια τεχνική χρησιμοποιούμε όταν ισορροπούμε μια ράβδο κατακόρυφα με το ένα μας δάκτυλο. Σπρώχνουμε το δάχτυλό μας στην την κατεύθυνση που πάει να γύρει η ράβδος.

Με το ίδιο τρόπο που ισορροπεί μια ράβδος κατακόρυφα στο δάκτυλό μας ισορροπεί και το ποδήλατο επάνω σε κυλιόμενο ποδηλατόδρομο (bicycle roller). Το ποδήλατο δεν κινείται αλλά οι ρόδες περιστρέφονται σε περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Όταν γείρουμε αριστερά, για να ισορροπήσουμε στρίβουμε το τιμόνι αριστερά και η μπροστινή ρόδα εκτρέπεται αριστερά, οπότε η ροπή που δημιουργείται αναιρεί την ροπή του βάρους μας και το ποδήλατο ισορροπεί.

Παρά την μελέτη και τα συμπεράσματα του Αντι Ρουίνα και των συνεργατών του, πολλοί πιστεύουν ακόμη και σήμερα ότι το ποδήλατο ισορροπεί όταν τρέχει λόγω στροφορμής. Αυτό συμβαίνει διότι η έρευνα του Αντι Ρουίνα και των συνεργατών του δεν έγινε ευρέως γνωστή, αλλά και διότι η ίδια η έρευνα δεν δίνει απάντηση στο αρχικό ερώτημα.

Είχαμε καταλήξει ότι αν στρίψουμε το τιμόνι του ποδηλάτου προς τα αριστερά ο δρόμος θα ασκήσει μια κεντρομόλο δύναμη F στο ποδήλατο ώστε αυτό να διαγράψει τμήμα κυκλικής τροχιάς. Αν αυτή η δύναμη είχε σημείο εφαρμογής το κέντρο βάρους του

συστήματος ποδηλάτου - αναβάτη τότε το σύστημα θα έστριβε όμορφα χωρίς κανένα πρόβλημα. Όμως ο δρόμος εξασκεί τη δύναμη αυτή F στο κάτω άκρο του ποδηλάτου (σημείο επαφής τροχού - δρόμου) με αποτέλεσμα την εμφάνιση ροπής M στο σύστημα που τείνει να το περιστρέψει προς το εξωτερικό μέρος της στροφής. Ο αναβάτης του ποδηλάτου από εμπειρία, γέρνει προς το εσωτερικό μέρος της στροφής, προς τα αριστερά, ώστε το βάρος του B να προκαλέσει στο σύστημα μια ροπή M' αντίθετη της προηγούμενης ροπής M , οπότε αποφεύγει την ανατροπή. Αντίστοιχα συμβαίνει όταν στρίβουμε δεξιά.

Η κλίση του σώματος προς το εσωτερικό της στροφής δεν είναι αποκλειστική κίνηση του ποδηλάτη. Οι απλοί δρομείς όταν τρέχουν με μεγάλη ταχύτητα, στη στροφή γέρνουν το κορμί τους για να αποφύγουν την ανατροπή.

Η κίνηση αυτή γίνεται από ένστικτο και την παρατηρούμε και στα ζώα. Ένα άλογο και ένας σκύλος τρέχουν σε στροφή με την χαρακτηριστική κλίση του σώματος ώστε να αποφύγουν την ανατροπή.

Η απάντηση στο διαχρονικό ερώτημα της ισορροπίας του ποδηλάτου όταν τρέχει με αρκετή ταχύτητα είναι ότι η ισορροπία του ποδηλάτου οφείλεται στην ορμή του. Βέβαια αν υπάρχει και στροφορμή δεν θα το βλάψει, θα ισορροπεί καλύτερα, αλλά θεωρούμε ότι δεν είναι απαραίτητη και αν λείπει, το ποδήλατο πάλι θα ισορροπεί εφόσον κινείται. Την άποψή μας αυτή την στηρίζουμε στην παρατήρηση ότι αν φτιάξουμε ένα ποδήλατο με ρόδες αμελητέου βάρους ή πολύ μικρής ακτίνας πάλι ο ποδηλάτης θα ισορροπεί με την ίδια ευκολία, παρά το ότι τώρα πλέον η στροφορμή του ποδηλάτου είναι αμελητέα. Την άποψή μας αυτή την επιβεβαιώνουν τα πειράματα του Αντι Ρουίνα και των συνεργατών του, που φτιάξαν ποδήλατο με διπλό τροχό, ώστε ό ένας να γυρίζει αντίστροφα από τον άλλο, οπότε μηδενίζεται η συνολική στροφορμή.

Συμπέρασμα

Ο Τζιμ Παπαδόπουλος, καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Northeastern στη Βοστώνη των Ηνωμένων Πολιτειών, και οι συνεργάτες του με την μελέτη τους για την ισορροπία του ποδηλάτου που δημοσίευσαν το 2011, κατέληξαν ότι ένα ποδήλατο δεν χρειάζεται απαραίτητα τη «βοήθεια» του γυροσκοπικού φαινομένου ή του ίχνους για να είναι σταθερό. Έτσι αποδείξανε ότι το πρόβλημα της ισορροπίας του ποδηλάτου δεν έχει λυθεί. Ποιος είναι τότε λοιπόν ο παράγοντας που του χαρίζει την ισορροπία του; Για μικρές ταχύτητες ή για την ισορροπία του ποδηλάτου σε κυλιόμενο ποδηλατόδρομο το ποδήλατο ισορροπεί όπως μια κατακόρυφη ράβδος στο δάκτυλό μας. Για μεγάλη ταχύτητα, οι ομοιότητες που βρήκαμε στην κίνηση του ποδηλάτου και στην κίνηση του αθλητή στο καλλιτεχνικού πατινάζ μας ώθησε να ερμηνεύουμε την «αυτοσταθερότητά» του με την αρχή της διατήρησης της ορμής.