Η ισορροπία του ποδηλάτου

Δημήτρης Τσαούσης

Περίληψη

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ερμηνεία της ισορροπίας του ποδηλάτου. Κάποιοι έχουν στηρίξει την ερμηνεία τους στο γυροσκοπικό φαινόμενο. Άλλοι απέδωσαν την ισορροπία του στον παράγοντα εκείνο της γεωμετρίας που είναι γνωστός με το όνομα ίχνος ή τρέιλ. Το 2011, ο Τζιμ Παπαδόπουλος, καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Northeastern στη Βοστώνη των Ηνωμένων Πολιτειών και οι συνεργάτες του ανακοίνωσαν σε μια αποκαλυπτική έρευνα, ότι όλες οι μελέτες που έχουν γίνει μέχρι τώρα από σοβαρούς μελετητές δεν έχουν λύσει το πρόβλημα. Οπότε μετά από ενάμιση αιώνα βρισκόμαστε πάλι μπροστά στο αναπάντητο αρχικό ερώτημα: «Τί είναι αυτό που μας κάνει να ισορροπούμε με ευκολία πάνω στο ποδήλατο όταν κινούμαστε;» Η δική μας απάντηση στο διαχρονικό ερώτημα είναι ότι το ποδήλατο όταν κινείται με μικρές ταχύτητες ισορροπεί με τον ίδιο τρόπο που ισορροπεί ένα μακρύ κατακόρυφο καλάμι που στηρίζεται στην άκρη από το δάκτυλό μας, ενώ όταν τρέχει με μεγάλη ταχύτητα στην ισορροπία του συμβάλει και η 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. Συγκρίναμε την κίνηση και την ευστάθεια του ποδηλάτου με την κίνηση και την ευστάθεια του αθλητή που κάνει πατινάζ στον πάγο με ένα μόνο μαχαίρι. Ο αθλητής του πατινάζ θεωρούμε ότι κινείται ανάλογα με τον ποδηλάτη, αλλά χωρίς ρόδες και άρα όταν τρέχει δεν έχει στροφορμή. Όταν είναι ακίνητος, όπως και ο ποδηλάτης, δεν μπορεί να ισορροπεί στο ένα πόδι, ενώ είναι εύκολο να το πραγματοποιήσει όταν κινείται με κάποια ταχύτητα. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του αθλητή του πατινάζ, τόσο μεγαλύτερη η ευστάθειά του. Όμως αυτές οι ιδιότητες χαρακτηρίζουν την ορμή ενός σώματος και εκεί αποδίδουμε την ισορροπία του ποδηλάτου όταν τρέχει με μεγάλη ταχύτητα.

Λέξεις κλειδιά: Ποδήλατο, ισορροπία ποδηλάτου, καλλιτεχνικό πατινάζ.

Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο πρωτότυπο ποδήλατο ήταν η «Draisine» που εφευρέθηκε από τον Γερμανό βαρόνο Καρλ Φον Ντράις (Karl von Drais) το 1817. Είναι γνωστό και ως Laufmaschine (μηχανή που τρέχει). Αποτελούνταν από δύο ξύλινους τροχούς άμαξας, ένα ξύλινο κάθισμα πάνω στο οποίο καβαλούσε ο αναβάτης και ένα στοιχειώδες σύστημα πηδαλιούχησης. Δεν υπήρχαν πεντάλ. Για να κινήσεις το μηχάνημα έσπρωχνες με τα πόδια ή αλλιώς τα έσερνες στο έδαφος όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Κάτι σαν περπατούρα για μεγάλα παιδιά. Στην κατηφόρα η Draisine έτρεχε με μεγάλη ταχύτητα και σήκωνες και τα δυο σου πόδια πάνω από το έδαφος.

Ήταν πρωτότυπο. Κανείς πριν απ' αυτό δεν είχε συνδέσει μεταξύ τους δύο τροχούς τον ένα μπροστά από τον άλλο, πάνω σ' ένα σκελετό, ούτε είχε χρησιμοποιήσει τη θεμελιώδη αρχή του ποδηλάτου: ισορροπία με πηδαλιούχηση. Μέχρι τότε πίστευαν ότι αν δεν πατάς τα πόδια σου στο έδαφος, θα πέσεις. Η Draisine δίδαξε την ανθρωπότητα ότι μπορείς να ισορροπήσεις σε δύο τροχούς που συνδέονται μεταξύ τους αν και μόνο αν μπορείς να κατευθύνεις τον ένα με το τιμόνι.

Ένα από τα μεγάλα αναπάντητα ερωτήματα στην ιστορία του ποδηλάτου είναι: γιατί η Draisine άργησε τόσο να επινοηθεί, ενώ η τεχνολογία την είχε κάνει εφικτή εδώ και 3.500 χρόνια; Μια υπόθεση είναι πως κανείς δεν πίστευε ότι θα μπορούσες πραγματικά να ισορροπήσεις πάνω σε δύο τροχούς, τον ένα μπροστά από τον άλλο. Μπορεί μάλιστα ο Ντράις να έκανε την εφεύρεσή του τυχαία. Ίσως να είχε προβλέψει ότι το μηχάνημα θα ισορροπεί με σχεδόν διαρκή χρήση των ποδιών. Μόνο όταν το έφτιαξε και κατέβηκε μ' αυτό μια κατηφόρα, σήκωσε τα πόδια του από το έδαφος και τότε συνειδητοποίησε ότι μπορούσε να κρατήσει σε ισορροπία το μηχάνημα με τη χρήση του τιμονιού.

Σχήμα 1. Draisine. Το πρώτο πρωτότυπο ποδήλατο.

Σήμερα η ικανότητα να κάνει κανείς ποδήλατο θεωρείται αυτονόητη. Αυτό συμβαίνει εν μέρει επειδή πιστεύουμε ότι είναι εύκολο -άμα μάθεις, δεν το ξεχνάς ποτέ- και εν μέρει επειδή οι περισσότεροι από μας μαθαίνουμε ποδήλατο όταν είμαστε παιδιά.

Σχήμα 2. Το Velocipede είναι μια Draisine που στον μπροστινό τροχό της προστέθηκαν μανιβέλες και πεντάλ.

Το επόμενο μεγάλο επαναστατικό άλμα για το ποδήλατο έγινε στο Παρίσι τη δεκαετία του 1860. Στον μπροστινό τροχό της Draisine προστέθηκαν μανιβέλες και πεντάλ και έτσι γεννήθηκε το velocipede όπως φαίνεται στο σχήμα 2, που διαδόθηκε την περίοδο 1868-70 ως η νέα τρέλα του συρμού «velocipede-mania» και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Η προσθήκη πεντάλ σήμαινε ότι τα πόδια του ποδηλάτη δεν άγγιζαν πια το έδαφος. Το 1869, ένα άρθρο στο περιοδικό *Scientific American* κατέληγε με θαυμασμό: «Η όρθια στάση που διατηρεί ένα velocipede είναι ένα από τα πιο εκπληκτικά επιτεύγματα της πρακτικής μηχανικής».

Είναι χρήσιμο εδώ να σημειωθεί ότι αυτή την εποχή αλλάζουν οι ρόδες του ποδηλάτου. Ο Γάλλος Εζέν Μεγέ[1] το 1869 έφτιαξε τον πρώτο τροχό με ακτίνες συρμάτινες και άλλαξε η φιλοσοφία του τροχού. Από τον ξύλινο τροχό που οι ακτίνες συμπιέζονται, πήγαμε στον μεταλλικό τροχό με συρμάτινες ακτίνες τάνυσης. Πριν, ο άξονας ακουμπούσε στις ακτίνες, ενώ τώρα ο άξονας κρέμεται από τις ακτίνες. Το πρώτο velocipede με συρμάτινες ακτίνες κατασκευάστηκε από τον Βρετανό Τζέιμς Στάρλι (James Starley) το 1870 όταν έφτιαξε το Ariel, που έγινε ορόσημο για τα μεταλλικά υψηλότροχα ποδήλατα όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Το βάρος των ποδηλάτων μειώθηκε σημαντικά. Η εξέλιξη της Draisine οδήγησε στο velocipede και αυτό στο υψηλότροχο. Όμως εξαιτίας των ατυχημάτων που προκάλεσε, το υψηλότροχο εξελίχτηκε στο ποδήλατο ασφαλείας (σχήμα 3), που είναι η μορφή που έχει το ποδήλατο σήμερα.

Σχήμα 3. Το Υψηλότροχο του 1870, ένα υψηλότροχο δικής μας κατασκευής και το ασφαλές ποδήλατο.

Απόψεις ποδηλατών για την ισορροπία

Το δοκίμιο του Τουέιν (Mark Twain) *Taming the bicycle*, για το πώς μαθαίνει κανείς να καβαλάει ένα υψηλότροχο, αναφέρει: Το ποδήλατο είχε αυτό που λέμε «τζόγο» και μάλιστα πολύ άγριο. Για να μένω στη θέση μου απαιτούνταν πολλά πράγματα, και σε κάθε περίσταση αυτό που απαιτούνταν ήταν αντίθετο στη φύση. Δηλαδή, όποιο κι αν ήταν το απαιτούμενο πράγμα, η φύση μου, η συνήθεια και η ανατροφή μου με έκαναν να το επιχειρώ με έναν τρόπο, ενώ κάποιος αμετακίνητος και κρυφός νόμος της Φυσικής απαιτούσε να το κάνω με τον αντίθετο ακριβώς τρόπο... Για παράδειγμα, αν έγερνα προς τα δεξιά, έβαζα δύναμη σπρώχνοντας το τιμόνι προς την αντίθετη κατεύθυνση, ωθούμενος από μια απολύτως ψυχολογική παρόρμηση, και έτσι παραβίαζα ένα νόμο της Φυσικής και συνέχιζα να πέφτω. **Ο νόμος αυτός της Φυσικής απαιτούσε το αντίθετο - έπρεπε να στρίβεις το τιμόνι προς την κατεύθυνση που έπεφτες.** Είναι δύσκολο να το πιστέψεις αυτό όταν σου το λένε... Τώρα το μυαλό πρέπει να διδάξει τα άκρα να ξεχάσουν την παλιά τους εκπαίδευση και να υιοθετήσουν την καινούργια.

Ο Α. Σ. Πέμπερτον (A. C. Pemberton) σε άρθρο του στο Complete Cyclist, που δημοσιεύτηκε το 1897, έγραψε: «Αυτό που πρέπει να θυμάται ο κάθε μαθητευόμενος είναι απλά να γυρίζει το τιμόνι προς την πλευρά που πέφτει. Όλα τα υπόλοιπα είναι εύκολα»

[1] Αναφέρεται ως εφευρέτης του τροχού με συρμάτινες ακτίνες και ο μηχανικός George Cayley το 1808. http://en.wikipedia.org/wiki/Wire_wheels

Το Bicycling science, σε ένα ακαδημαϊκό έργο για τη φυσική που κρύβεται πίσω από το μηχάνημα, εξηγεί την ισορροπία σε ένα ποδήλατο ως «το να κάνεις τις λιγότερες υποστηρικτικές κινήσεις που χρειάζονται για να εξισορροπήσεις μια πτώση αμέσως μόλις αρχίσει, επιταχύνοντας τη βάση οριζόντια προς την κατεύθυνση κατά την οποία γέρνει, ώστε η αντίδραση της επιτάχυνσης (η τάση του κέντρου της μάζας να πέφτει προς τα πίσω) να ξεπεράσει την επίδραση της ισορροπίας».

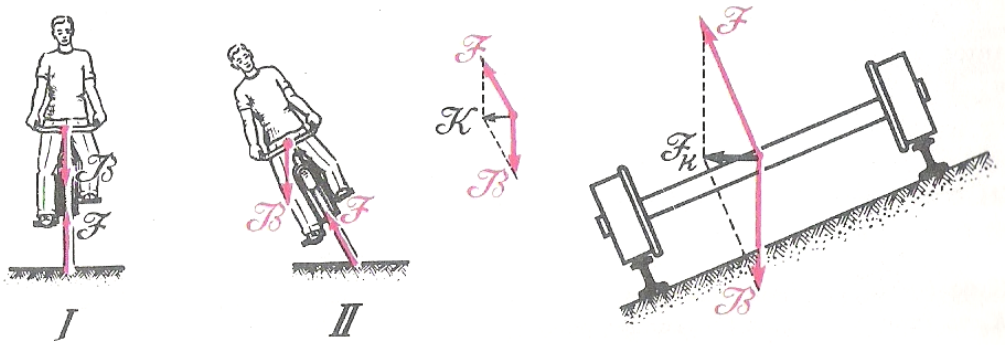
Πάντως ο Ντραις είχε καταλάβει την ουσία της ισορροπίας του ποδηλάτου έστω και αν το ανακάλυψε τυχαία, ότι το κλειδί στην ισορροπία είναι να στρίβεις το τιμόνι προς τα εκεί που γέρνει το ποδήλατο.

Το ποδήλατο ασφαλείας ή σκέτο ποδήλατο είναι τόσο καλά ισορροπημένο, ώστε δεν χρειάζεται καν αναβάτη. Αν αφήσετε ένα καλά ευθυγραμμισμένο ποδήλατο με ελεύθερο το τιμόνι, να κατέβει μια κατηφόρα χωρίς αναβάτη, το ποδήλατο θα παραμείνει σταθερό και όρθιο με μια ταχύτητα που εξαρτάται από τον σχεδιασμό του. Ένα ποδήλατο χωρίς αναβάτη μπορεί να κάνει αυτόματα ακόμη και τις μικρές κινήσεις πηδαλιούχησης που χρειάζονται για να ισιώσει έπειτα από μια σύγκρουση ή ενόχληση κάποιου είδους. Αυτό οι φυσικοί το αποκαλούν «εγγενή σταθερότητα».

Αυτά περίπου γράφονται για την ισορροπία του ποδηλάτου από τον Ρόμπερτ Πεν ένα δημοσιογράφο ποδηλατιστή σε ένα βιβλίο του με τίτλο, «όλα για το ποδήλατο». Εκφράζει τα πιστεύω των απλών ανθρώπων και ποδηλατιστών για την ισορροπία του ποδηλάτου από κατασκευής του μέχρι σήμερα. Δίνει πολλά στοιχεία της συμπεριφοράς του ποδηλατιστή, που ένας φυσικός πρέπει να λάβει υπόψη του, για να λύσει το πρόβλημα της ισορροπίας του ποδηλάτου. Από τις περιγραφές των ποδηλατιστών αντλούμε τα δεδομένα του προβλήματος. Αυτός είναι και ο λόγος που παραθέτουμε τις περιγραφές των ποδηλατιστών από το βιβλίο του Ρόμπερτ Πεν.

Η σημερινή πραγματικότητα

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.

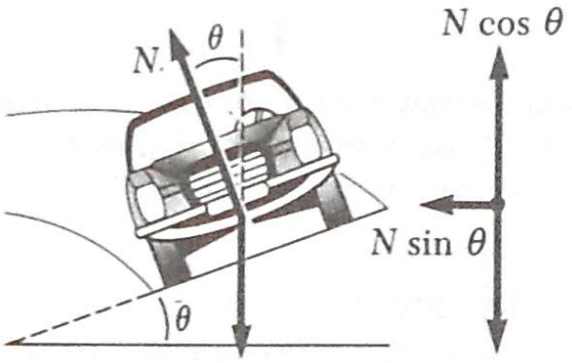


Σχήμα 4. Σε σχολικά βιβλία η κεντρομόλος δύναμη που απαιτείται για τη στροφή ενός ποδηλάτου ή ενός αυτοκινήτου ή ενός τρένου αποδίδεται στην κλίση του δρόμου και όχι στη λειτουργία του τιμονιού.

Έχουμε λοιπόν πάρα πολλά σχολικά βιβλία στα οποία η στροφή ενός ποδηλάτου ή αυτοκινήτου ή τρένου αποδίδεται στην κλίση του δρόμου και όχι στη λειτουργία του τιμονιού όπως φαίνεται στο σχήμα 4. Εφαρμόζονται σκέψεις φυσικής για την κίνηση του υλικού σημείου σε τροχοφόρα με διαστάσεις. Σε ελάχιστα βιβλία

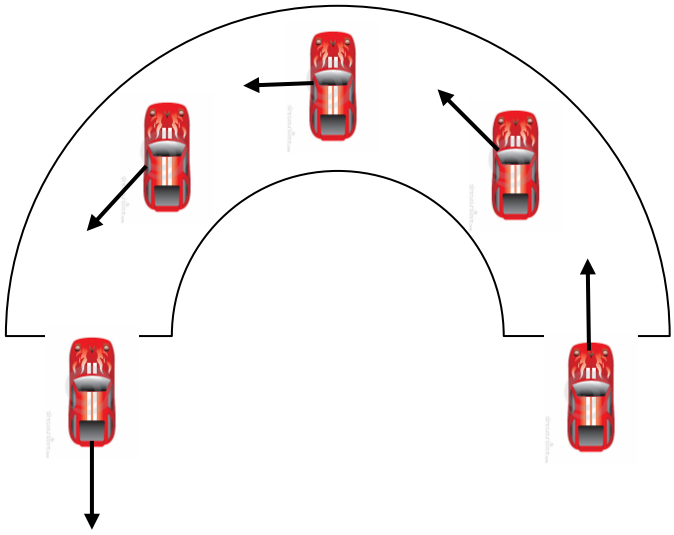
αναφέρεται ότι η κλίση του δρόμου στις στροφές χρησιμεύει μόνο για να μη ανατραπεί το όχημα.

Τα περισσότερα βιβλία θεωρούν την κεντρομόλο επιτάχυνση ως συνισταμένη του βάρους και της κάθετης αντίδρασης του κεκλιμένου επιπέδου του δρόμου στη στροφή όπως φαίνεται στο σχήμα 5. 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 και αυτό δεν σημειώνεται στα βιβλία. Ίσως αυτό να γίνεται για διδακτικούς λόγους και για απλοποίηση του προβλήματος.



Σχήμα 5. Η κεντρομόλος επιτάχυνση ενός αυτοκινήτου ως συνισταμένη του βάρους και της κάθετης αντίδρασης του κεκλιμένου επιπέδου του δρόμου στη στροφή.

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, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



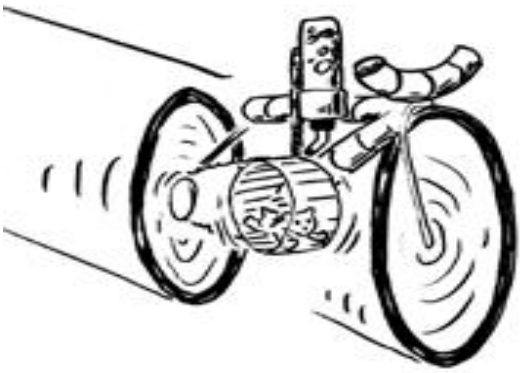
Σχήμα 6. Αν η κεντρομόλος οφείλεται μόνο στην κλίση του δρόμου, ένα αυτοκίνητο που εισέρχεται σε ένα πέταλο θα κινείται κυκλικά και παράλληλα με τον εαυτό του οπότε, θα εξέρχεται από το πέταλο με την όπισθεν.

Στην πραγματικότητα το αυτοκίνητο σε στροφή περιστρέφεται και γύρω από τον εαυτό του, ώστε στο προηγούμενο παράδειγμα να μη βγαίνει από το πέταλο ανάποδα. Αποτέλεσμα της απλοποιημένης προσέγγισης είναι η λάθος αντιμετώπιση του προβλήματος της κίνησης ενός τροχοφόρου. Με τον τρόπο αυτό δίνουμε στο κοινό 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. Η σωστότερη αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων θα μειώσει τα τροχαία ατυχήματα και θα βελτιώσει την ασφάλεια του πολίτη. Όταν λοιπόν αντιμετωπίζουμε λάθος την κίνηση του ποδηλάτου, δεν είναι δυνατόν να βρούμε γιατί ισορροπεί στις δυο του ρόδες όταν τρέχει. Αυτός είναι και ο λόγος που κάναμε την ιστορική αναδρομή στο παρελθόν και σημειώσαμε σε μεγάλη έκταση τις εμπειρίες των ποδηλατών ώστε να γνωρίσουμε όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση του ποδηλάτου.

Θεωρίες για την ισορροπία του ποδηλάτου

Κατά καιρούς πολλοί επιστήμονες έχουν αποπειραθεί να εξηγήσουν το πρόβλημα της ισορροπίας του ποδηλάτου. Γιατί όταν το ποδήλατο τρέχει, ισορροπεί όπως φαίνεται στο σχήμα 7;. Αρχικά είχε αποδοθεί στο γυροσκοπικό φαινόμενο από την κίνηση των τροχών. Αργότερα σε αυτόν τον παράγοντα προστέθηκε το λεγόμενο ίχνος ή τρέιλ (trail), η θέση του σημείου επαφής της μπροστινής ρόδας με το έδαφος, σε σχέση με τον άξονα του τιμονιού.

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 ή να αλλάζει την κατεύθυνση του άξονά του όταν κάποιες δυνάμεις το αναγκάζουν να γείρει[2].



Σχήμα 7. Το ποδήλατο ασφαλείας. Μόνον όταν έχει κάποια ταχύτητα μπορεί να ισορροπεί. Όταν η ταχύτητά του μηδενιστεί πέφτει κάτω.

Η ερμηνεία των Ζόμερφελντ και Κλάιν διατήρησε την απόλυτη πρωτοκαθεδρία για περισσότερο από μισό αιώνα. Στη δεκαετία του 1970 όμως, ο βρετανός χημικός

[2] http://www.tovima.gr/science/article/?aid=431905

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 Τζιμ Παπαδόπουλος**,** καθηγητής στο Πανεπιστήμιο Northeastern στη Βοστώνη των Ηνωμένων Πολιτειών, βασικός εμπνευστής σχετικής μελέτης για την ισορροπία του ποδηλάτου, 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. Το 2002 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 Σβαμπ και ενός ακόμη συναδέλφου τους, του Γιάαπ Μάγιαρντ από το Πανεπιστήμιο του Νότιγχαμ στη Βρετανία, οι εργασίες επιταχύνθηκαν.

Από αυτή τη συνεργασία προέκυψε μια μελέτη με το λεγόμενο «Two-Mass-Skate Bicycle» ή TMS[3], 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. 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;»

Τελικά γατί ισορροπεί το ποδήλατο;

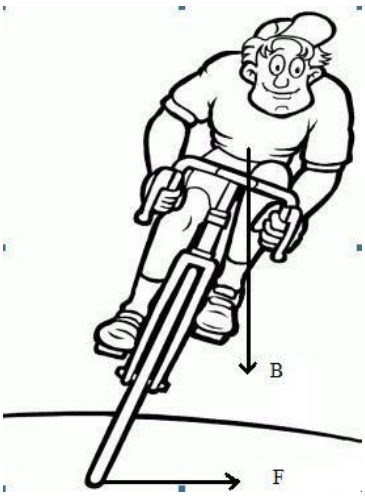
Το 1998 είχαμε δημοσιεύσει στο τεύχος 151 του Φυσικού Κόσμου ένα άρθρο με τίτλο «Ο τροχός και η συμπεριφορά του στο δρόμο[4]». Τότε είχαμε ασχοληθεί με το ερώτημα πώς στρίβει το ποδήλατο, το αυτοκίνητο και το τρένο.

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

[3] http://bicycle.tudelft.nl/stablebicycle
[4] http://users.sch.gr/dtsaousis/arthra/20troxos.doc

αναβάτης του ποδηλάτου από εμπειρία, γέρνει προς το εσωτερικό μέρος της στροφής, προς τα αριστερά, ώστε το βάρος του Β να προκαλέσει στο σύστημα μια ροπή Μ′ αντίθετη της προηγουμένης ροπής Μ, οπότε αποφεύγει την ανατροπή (Σχ. 8). 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.



Σχήμα 8. Ο αναβάτης του ποδηλάτου από εμπειρία, γέρνει προς το εσωτερικό μέρος της στροφής για να αποφύγει την ανατροπή. Η ιστορική φωτογραφία του Einstein είναι αποκαλυπτική.

Η κίνηση αυτή γίνεται από ένστικτο και την παρατηρούμε και στα ζώα. Είναι χαρακτηριστική η φωτογραφία του σχήματος 9 όπου φαίνονται ένα άλογο και ένας σκύλος να τρέχουν σε στροφή με την χαρακτηριστική κλίση του σώματος ώστε να αποφύγουν την ανατροπή.

Σχήμα 9. Το άλογο και ο σκύλος επειδή τρέχουν με μεγάλη ταχύτητα γέρνουν προς το εσωτερικό της στροφής για να αποφύγουν την ανατροπή.

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 όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 10.

Σχήμα 10. Κατακόρυφη ισορροπία μιας ράβδου σε ένα δάκτυλο.

Με το ίδιο τρόπο που ισορροπεί μια ράβδος κατακόρυφα στο δάκτυλό μας ισορροπεί και το ποδήλατο επάνω σε κυλιόμενο ποδηλατόδρομο (bicycle roller) όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 11. 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.

Σχήμα 11 . Ισορροπία ποδηλάτου σε κύλινδρο κυλιόμενο ποδηλατόδρομο

Επειδή τα ποδήλατα έχουν τροχούς τύπου Β[5], για κάποια ταχύτητα, όταν το ποδήλατο γέρνει, πιθανόν να μη χρειάζεται να στρίψουμε το τιμόνι, αφού οι τροχοί τύπου Β, δίνουν μόνοι τους την απαραίτητη κεντρομόλο δύναμη. Αυτή είναι και η αιτία που το ποδήλατο μπορεί να διορθώσει μόνο του την πορεία του και έτσι ερμηνεύουμε την «αυτοσταθερότητά» του.

Παρά την μελέτη και τα συμπεράσματα του Αντι Ρουίνα και των συνεργατών του, πολλοί πιστεύουν ακόμη και σήμερα ότι το ποδήλατο ισορροπεί όταν τρέχει όπως στο σχήμα 7 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.

Η δική μας 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 ό ένας να γυρίζει αντίστροφα από τον άλλο, οπότε μηδενίζεται η συνολική στροφορμή.

[5] http://users.sch.gr/dtsaousis/arthra/20troxos.doc Οι τροχοί διακρίνονται σε τύπου Α και τύπου Β. Οι τύπου Α έχουν σχήμα κυλίνδρου, ενώ οι τύπου Β έχουν σχήμα κόλουρου κώνου. Όταν ο τροχός τύπου Α κυλίεται η τροχιά του είναι ευθεία. Όταν ο τροχός τύπου Β κυλίεται η τροχιά του είναι κύκλος.

Σχήμα 12. Η αθλήτρια του πατινάζ μόνον όταν έχει κάποια ταχύτητα μπορεί να ισορροπεί στη μία μόνο λεπίδα. Όταν η ταχύτητα μηδενιστεί δεν μπορεί πλέον να ισορροπεί.

Εκείνο όμως που μας έπεισε απολύτως ότι η στροφορμή δεν είναι η αιτία της ισορροπίας στο ποδήλατο, είναι το καλλιτεχνικό πατινάζ στον πάγο με ένα μόνο μαχαίρι (με το ένα πόδι) όπως φαίνεται στο σχήμα 12. Όταν ο αθλητής είναι ακίνητος, όπως και ο ποδηλάτης, δεν μπορεί να ισορροπεί στο ένα πόδι, ενώ είναι εύκολο να το πραγματοποιήσει όταν κινείται με κάποια ταχύτητα. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του αθλητή του πατινάζ, τόσο μεγαλύτερη η ευστάθειά του. Ο αθλητής του πατινάζ θεωρούμε ότι κινείται ανάλογα με τον ποδηλάτη, αλλά χωρίς ρόδες και άρα όταν τρέχει δεν έχει στροφορμή.

Σχήμα 13. Από μια σύγχρονη βολή τριών πιστολιών σε κατακόρυφη διάταξη σε χώρο με μηδενικό πεδίο βαρύτητας, οι σφαίρες θα ταξιδεύουν σε παράλληλες ευθύγραμμες τροχιές.

Σε ένα νοητικό πείραμα θεωρήσαμε τρία πιστόλια που είναι στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο να πυροβολούν ταυτόχρονα, παράλληλα προς τον ίδιο άξονα x όπως στο σχήμα 13. Αν δεν υπάρχει βαρύτητα και τριβές, οι σφαίρες θα ταξιδεύουν συνέχεια, με τροχιές παράλληλες ευθείες γραμμές που θα βρίσκονται πάντα στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο. Το ίδιο θα συμβεί αν κάνουμε το πείραμα σε πεδίο βαρύτητας

και σκεφτούμε κάποιο τρόπο να στηρίξουμε τις σφαίρες έτσι ώστε η δύναμη της στήριξης να αναιρεί το βάρος

Όμοια θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι το σώμα του αθλητή στο καλλιτεχνικό πατινάζ αποτελείται από Ν τμήματα τοποθετημένα το ένα επάνω από το άλλο όπως οι σφαίρες, που συνδέονται όμως μεταξύ τους και τρέχουν όλα με την ίδια ταχύτητα σε παράλληλες ευθείες. Έχουν επομένως όλα τα τμήματα τα διανύσματα της ορμής τους παράλληλα μεταξύ τους σε ένα κατακόρυφο επίπεδο και θέλουν να διατηρήσουν την ορμή τους σταθερή. Ο αθλητής με δική του δύναμη μπορεί να αλλάξει την ορμή ενός από τα Ν τμήματα, αλλά επειδή η δύναμη είναι εσωτερική, θα αλλάξουν και μερικά άλλα από τα Ν τμήματα την ορμή τους, έτσι ώστε η συνολική ορμή να παραμείνει αναλλοίωτη. Για να πέσει ο αθλητής θα πρέπει μια εξωτερική δύναμη να αλλάξει το διάνυσμα της ορμής του συστήματος των Ν στοιχειωδών τμημάτων. Για να στρίψει ο αθλητής αριστερά στρέφει τα μαχαίρια κατάλληλα ώστε να εξασκηθεί από τον πάγο στα πόδια του η κεντρομόλος δύναμη. Επειδή η δύναμη αυτή δεν εξασκείται στο κέντρο βάρους τείνει να ανατρέψει τον αθλητή με όμοιο τρόπου που ανατρέπεται κάποιος που θα του τραβήξουμε το χαλί κάτω από τα πόδια του. Για να μη ανατραπεί ο αθλητής προς τα δεξιά γέρνει το κορμί του προς τα αριστερά, ώστε η ροπή του βάρους του να εξουδετερώσει τη ροπή της κεντρομόλου.

Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στο ποδήλατο. Ποδήλατο και αναβάτης αποτελούν ένα ενιαίο σύνολο αποτελούμενο επίσης από Ν τμήματα, που συνδέονται μεταξύ τους και το άθροισμα των επί μέρους ορμών δίνει τη συνολική ορμή του συστήματος ποδηλάτου – αναβάτη. Εφόσον δεν εξασκείται στο σύστημα κάποια εξωτερική δύναμη, αυτό θα κινείται ευθύγραμμα και ομαλά. Όταν αρχίσουμε και προσθέτουμε τις διάφορες τριβές από τον αέρα και το δρόμο, θα αναγκαστούμε να προσθέσουμε μια προωθητική δύναμη, πιθανόν μια κεντρομόλο δύναμη με το τιμόνι και μια κλίση του συστήματος ποδηλάτου – αναβάτη από την κατακόρυφη θέση για να διατηρήσουμε την κίνηση του συστήματος χωρίς ανατροπή. Ο τελευταίος χειρισμός δεν είναι εύκολος. Χρειάζεται μια εξάσκηση ώστε ο αναβάτης να γίνει ικανός ποδηλάτης. Να αποκτήσει εμπειρία στις διορθωτικές κινήσεις. Αν οι δυνάμεις από τον αέρα και το δρόμο δεν είναι σταθερές, τότε προφανώς οι διορθωτικές κινήσεις του αναβάτη είναι συνεχείς και μεταβαλλόμενες με αποτέλεσμα το ποδήλατο να λικνίζεται δεξιά και αριστερά. Μερικοί αποδίδουν την ισορροπία του ποδηλάτου σε αυτό το λίκνισμα. Αν σταθεροποιήσουμε τις εξωτερικές δυνάμεις ή αν τις μηδενίσουμε, το ποδήλατο θα ισορροπεί χωρίς να λικνίζεται. Τελικά, ο ικανός ποδηλάτης χωρίς να ξέρει ούτε φυσική ούτε μαθηματικά, επεξεργάζεται ταχύτατα τα δεδομένα σε κάθε χρονική στιγμή και κάνει έγκαιρα τις κατάλληλες διορθώσεις στην ορμή του συστήματος, έτσι ώστε το ποδήλατο να ισορροπεί. Λύνει σωστά και εφαρμόζει όλες εκείνες τις εξισώσεις για την ισορροπία του ποδηλάτου, που κανένας φυσικός ή μαθηματικός δεν έχει γράψει ακόμη.

Αυτό είναι θαυμάσιο!

Μια ανάλογη λειτουργία εκτελεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος επίσης όταν αναγνωρίζει τη φωνή ενός γνωστού ατόμου χωρίς να έχει οπτική επαφή μαζί του. Επεξεργάζεται τη συνάρτηση της φωνής που ακούει και χωρίς τη χρήση μαθηματικών «κάνει ανάλυση Fourier» που απαιτεί προχωρημένα μαθηματικά. Βρίσκει όλες τις αρμονικές από τις οποίες αποτελείται ήχος που άκουσε. Συγκρίνει τις αρμονικές αυτές με τα δεδομένα από τις αρμονικές όλων των γνωστών του ατόμων που έχει αποθηκεύσει στη μνήμη του και εμπειρικά κάνει ταυτοποίηση του ατόμου που η χροιά της φωνής του έχει τις συγκεκριμένες αρμονικές.

Η αναγνώριση της φωνής όσο πολύπλοκη και αν είναι δεν εντυπωσιάζει τόσο πολύ διότι όλοι αναγνωρίζουν τη φωνή των γνωστών τους προσώπων με την ίδια ευκολία, δεν απαιτεί ιδιαίτερα προσόντα. Η ισορροπία του ποδηλάτου που απαιτεί ανάλογες διαδικασίες του εγκεφάλου, εντυπωσιάζει διότι δεν τα καταφέρνουν όλοι εξ ίσου καλά και οι ποδηλάτες εντυπωσιάζουν περισσότερο.

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.

Βιβλιογραφία

1. Ρόμπερτ Πεν, Όλα για το ΠΟΔΗΛΑΤΟ, Μεταίχμιο, Αθήνα 2012, Μετάφραση Γιώργος Χρυσοβιτσάνος, (Robert Penn, It's all about the bike, Penguin Books 2010)
2. J. P. Meijaard1, Jim M. Papadopoulos2, Andy Ruina3 and A. L. Schwab4, Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review, http://bicycle.tudelft.nl/schwab/Publications/06PA0459BicyclePaperv45.pdf
3. Δημήτρης Τσαούσης, Ο τροχός και η συμπεριφορά του στο δρόμο, Φυσικός Κόσμος, 151, Αθήνα 1998.
4. Mark Τουέιν *Taming the bicycle* http://www.online-literature.com/wilde/1323/
5. http://openlibrary.org/books/OL18732792M/The_complete_cyclist A. C. Pemberton
6. Bicycling science http://www.exploratorium.edu/cycling/
7. http://www.tovima.gr/science/article/?aid=431905
8. http://bicycle.tudelft.nl/stablebicycle
9. http://users.sch.gr/dtsaousis/arthra/20troxos.doc