



Πρώιμες «ανακαλύψεις», πρόδρομες ιδέες και άλλες αναχρονιστικές ιστορίες: η περίπτωση του «έργου» και των ενεργειακών εννοιών

Κανδεράκης Ν.

Σχολικός σύμβουλος ΠΕ4, nikanderakis@yahoo.gr

Το γινόμενο «δύναμη επί τη μετατόπιση» χρησιμοποιείται επί ένα αιώνα τόσο από τους μαθηματικούς και τους φιλόσοφους για τον υπολογισμό της «ζωντανής δύναμης» (*vis viva*), όσο και από τους μηχανοτεχνίτες για τον υπολογισμό των επιδόσεων των κινητήριων μηχανών. Από τη συνάντηση των δύο αυτών πρακτικών, στη Γαλλία των αρχών του 19ου αιώνα, θα προκύψει το φυσικό μέγεθος «έργο» ως μέτρο της εργασίας. Μόνο τότε το γινόμενο «δύναμη επί μετατόπιση» θεωρείται ότι συγκροτεί το φυσικό αυτό μέγεθος. Γιατί; Από μια ανασκόπηση της εξέλιξης των σχετικών ιδεών στην ιστορία των επιστημών και από μια περιήγηση στη φιλοσοφία των επιστημών σχετικά με το νόημα των επιστημονικών εννοιών, διαμορφώνεται μια σειρά από κριτήρια για το πότε μια μαθηματική παράσταση, όπως η «δύναμη επί τη μετατόπιση», θεωρείται αυτόνομο φυσικό μέγεθος εντεταγμένο σε μια θεωρία.

Εισαγωγή

Η συγκρότηση του φυσικού μεγέθους «έργο» είναι αποτέλεσμα της συνάντησης δύο διαφορετικών μεταξύ τους πρακτικών, που ασκούνται καθ' όλη τη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα. Η μία είναι θεωρητική, γίνεται από φιλόσοφους και μαθηματικούς και έχει να κάνει με θεωρητικούς υπολογισμούς σχετικούς με τις «ζωντανές δυνάμεις» (*vis viva*). Η άλλη είναι εμπειρική, γίνεται από μηχανικούς και μηχανοτεχνίτες και έχει να κάνει με πρακτικούς υπολογισμούς σχετικούς με την εργασία και τις επιδόσεις των κινητήριων μηχανών. Και στις δύο πρακτικές, χρησιμοποιούνται τα γινόμενα «βάρος επί ύψος» ή «δύναμη επί μετατόπιση», από τα οποία θα δημιουργηθεί τον 19^ο αιώνα το φυσικό μέγεθος «έργο».

Το ερώτημα που τίθεται είναι αν τα γινόμενα αυτά μπορούν να θεωρηθούν αυτόνομα φυσικά μεγέθη ή πρώτες μορφές του φυσικού μεγέθους «έργο» και αν μπορούμε να χρησιμοποιούμε τον όρο «έργο» για να τα υποδηλώνουμε. Συναφές με αυτό είναι και ένα δεύτερο ερώτημα. Στις διάφορες θεωρητικές αναδιατυπώσεις της νευτώνειας μηχανικής, που γίνονται τον 18^ο αιώνα, εμφανίζονται μαθηματικές σχέσεις οι οποίες περιγράφουν «αρχές διατήρησης των ζωντανών δυνάμεων» και οι οποίες εμφανίζουν μεγάλη συντακτική (μαθηματική) ομοιότητα με τις σημερινές ενεργειακές σχέσεις. Μπορούν οι σχέσεις αυτές να θεωρηθούν ενεργειακές σχέσεις ή πρώιμες μορφές ενεργειακών σχέσεων; Για να ερευνήσουμε τα ερωτήματα αυτά θα κάνουμε μια σύντομη ιστορική ανασκόπηση των σχετικών ιδεών και θα διαμορφώσουμε μια σειρά από κριτήρια για το πότε μια μαθηματική παράσταση μπορεί να θεωρηθεί αυτόνομο μέγεθος εντεταγμένο στη θεωρία της φυσικής.

Θεωρητικοί υπολογισμοί

Τα γινόμενα βάρος (ή δύναμη) επί ύψος (ή μετατόπιση) εμφανίζονται στις διαμάχες για τη «δύναμη» των κινούμενων σωμάτων, κατά τους 17^ο και 18^ο αιώνα, και χρησιμοποιούνται για να υπολογισθεί το μέτρο της «δύναμης» αυτής. Ο όρος «δύναμη» των κινούμενων σωμάτων χρησιμοποιείται από τον Καρτέσιο και τους οπαδούς του, αναφέρεται στα αποτελέσματά των κρούσεων και υποδηλώνει μια ποσότητα ανάλογη με την «ποσότητα κίνησης» (*mv*). Η



συνολική «δύναμη»-ποσότητα κίνησης στο Σύμπαν διατηρείται σταθερή (Descartes 1996 vol IX, Principia Philosophiae §36-40). Ο Leibniz θα υποστηρίξει ότι η «δύναμη» των κινούμενων σωμάτων πρέπει να μετρείται με τη «ζωντανή δύναμη»· μια ποσότητα ανάλογη με τη μάζα και το τετράγωνο της ταχύτητας (📊), η οποία επίσης διατηρείται σταθερή. Οι «ζωντανές δυνάμεις» παράγονται από τις δράσεις των «νεκρών δυνάμεων», δηλαδή των δυνάμεων της στατικής (Leibniz 1971, 1989a, 1989b). Στις θέσεις του Leibniz επιτίθενται οι καρτεσιανοί, οι οποίοι αντιτείνουν ότι η «δύναμη» ως διατηρούμενο μέγεθος στο Σύμπαν είναι ανάλογη με την «ποσότητα κίνησης» 📊, και οι νευτωνιστές, οι οποίοι αρνούνται ολωσδιόλου τη «δύναμη» ως διατηρούμενο μέγεθος. Οι οπαδοί του Leibniz χάνουν τη μάχη και οι «ζωντανές δυνάμεις» τίθενται στο περιθώριο της φυσικής φιλοσοφίας σχεδόν μέχρι τα τέλη του 18^{ου} αιώνα (Itis 1970 σ. 140, Κανδεράκης 2007 σελ. 46-49). Ο Leibniz και οι οπαδοί του υπολογίζουν την αιτία ή τα αποτελέσματα της «δύναμης» αυτής από τα γινόμενα του βάρους επί το ύψος ή της «πίεσης» [δύναμης] επί τη μετατόπιση¹. Τα γινόμενα όμως αυτά δεν έχουν ξεχωριστή οντότητα και δεν χρησιμοποιούνται παρά ως βοηθητικά εργαλεία για υπολογισμούς.

Οι μαθηματικοί του 18^{ου} αιώνα (d' Alembert, Euler, Lagrange κ.α.), οι οποίοι δημιουργούν τις μεγάλες θεωρητικές αναδιατυπώσεις της νευτώνειας μηχανικής, χρησιμοποιούν μαθηματικές παραστάσεις και σχέσεις μαθηματικά όμοιες με τις σημερινές αναπαραστάσεις των ενεργειακών εννοιών (Κανδεράκης 2007). Ο Lagrange π.χ., στην *Αναλυτική Μηχανική*, εισάγει τη συνάρτηση T , η οποία είναι το μισό της «ζωντανής δύναμης» ενός συστήματος σωμάτων, και τη συνάρτηση V , η οποία ισοδυναμεί με το άθροισμα των γινομένων των δυνάμεων επί τις μετατοπίσεις για όλα τα σώματα του συστήματος. Με βάση τις συναρτήσεις αυτές είναι σε θέση να διατυπώσει με κομψό τρόπο τις εξισώσεις κίνησης του συστήματος και να αναπαραστήσει τη «διατήρηση των ζωντανών δυνάμεων» με μια σχέση που ισοδυναμεί με $T + V = \text{σταθ.}$ (Lagrange 1788 σ. 206-227). Η ομοιότητα των παραστάσεων και των σχέσεων αυτών με τις μεταγενέστερες μαθηματικές αναπαραστάσεις των ενεργειακών εννοιών («έργου», «δυναμικής ενέργειας» κ.α.) και των ενεργειακών σχέσεων (διατήρηση μηχανικής ενέργειας κ.α.) ώθησε αρκετούς (κυρίως παλιότερους) ιστορικούς της επιστήμης, όπως τους Jourdain (1913), Lindsay (1975) κ.α., να τις θεωρήσουν ως προδρόμους των ενεργειακών εννοιών και σχέσεων και να τις περιγράψουν ως τέτοιες. Η μαθηματική ομοιότητα όμως είναι απατηλή· το περιεχόμενο είναι διαφορετικό. Η «ζωντανή δύναμη» ουσιαστικά δεν διατηρείται, αφού, στις μη ελαστικές κρούσεις, μπορεί να χαθεί. Στον Lagrange, οι συναρτήσεις T και V είναι απλώς κάποιες μαθηματικές συναρτήσεις που δεν έχουν εμπειρικό ή οντολογικό περιεχόμενο. Δε συνδέονται άμεσα με την εμπειρία ούτε θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν κάποια οντότητα (όπως γίνεται π.χ. αργότερα με την «ενέργεια»). Αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Εποχή	Ιστορικοί πρωταγωνιστές	Μαθηματική παράσταση ή σχέση	Αναχρονιστική ερμηνεία	Ερμηνεία στο πλαίσιο της εποχής
17 ^{ος} αιώνας	Γαλιλαίος, Descartes κ.α. (Στατική)	Δύναμη επί μετατόπιση	Πρώιμη μορφή του «έργου»	Υπολογιστική τεχνική
17 ^{ος} και 18 ^{ος} αιώνας	Leibniz (Δυναμική)	Δύναμη επί μετατόπιση	Πρώιμη μορφή του «έργου»	Υπολογιστική τεχνική
18 ^{ος} αιώνας	Lagrange (Δυναμική)	$T+V = \text{σταθ.}$	Πρώιμη μορφή της διατήρησης της ενέργειας	Μαθηματικές συναρτήσεις χωρίς εμπειρικό ή οντολογικό περιεχόμενο

¹ Χωρίς να δηλώνονται ρητά ως γινόμενα. Ο πολλαπλασιασμός δύο ποσοτήτων που δεν είναι καθαροί αριθμοί είναι ακόμα μαθηματικά απαγορευμένος.

Εμπειρικοί υπολογισμοί

Η δεύτερη ομάδα των δραστηριοτήτων των σχετικών με τα γινόμενα «δύναμη επί μετατόπιση» γίνεται στο χώρο της μηχανοτεχνίας (engineering) και έχει να κάνει με τις κινητήριες μηχανές (κυρίως υδρόμυλους και ατμομηχανές) και τις προσπάθειες των μηχανικών να τις αναλύσουν. Μια συστηματική ανάλυση των υδροτροχών, που γίνεται το 1704 από τον Γάλλο μηχανικό Parent, εστιάζεται στην κρούση του νερού πάνω στα φτερά και αγνοεί ή υποτιμά τη δράση του βάρους του νερού (Parent 1704 σ. 325-333). Παρόμοιες αναλύσεις, οι οποίες θα κυριαρχήσουν σε όλο σχεδόν τον 18^ο αιώνα, εξετάζουν τους υδροτροχούς στατικά, εστιάζονται στις στιγμιαίες δράσεις των δυνάμεων και δεν υπολογίζουν το συσσωρευμένο αποτέλεσμα τους σε βάθος χρόνου. Οι μηχανικοί Smeaton και Borda θα χρησιμοποιήσουν τα γινόμενα «βάρος επί ύψος» και θα υπολογίσουν το συσσωρευμένο αυτό αποτέλεσμα (Smeaton 1759, Borda 1770), οι αναλύσεις τους όμως θα τεθούν στο περιθώριο, κυρίως λόγω της σύνδεσής τους με τις «ζωντανές δυνάμεις» που είναι ουσιαστικά εξοστρακισμένες (Reynolds 1973 σ. 487-505, 515-520).

Μια άλλη ομάδα κινητήριων μηχανών είναι οι ατμομηχανές. Αυτές θα κυριαρχήσουν στη Βρετανία του 18^{ου} αιώνα, ενώ τον 19^ο αιώνα θα απλωθούν σε ολόκληρη την Ευρώπη. Οι ατμομηχανές αρχικά κατασκευάζονται για να κινούν τις υδραντλίες που αποστραγγίζουν τα ορυχεία και οι μηχανικοί τις βλέπουν κυρίως ως ισχυρές αντλίες. Η «επίδοσή» τους (duty) μετρείται από την ποσότητα του νερού που μπορούν να σηκώσουν σε ορισμένο ύψος, μέσα σε ορισμένο χρόνο ή με την κατανάλωση ορισμένης ποσότητας κάρβουνου. Πιο συγκεκριμένα, οι ατμομηχανές εκτιμώνται με τις λίβρες (pounds) νερού που μπορούν να σηκώσουν 1 πόδι ψηλά, μέσα σε 1 λεπτό ή όταν καταναλώνουν 1 «μπούσελ» (bushel)² κάρβουνου. Η εκτίμηση αυτή είναι βασική για τον προσδιορισμό των επιδόσεων των μηχανών σε «άλογα» (horses). Ένα «άλογο», σύμφωνα με την τιμή που θα δώσει ο Watt, ισοδυναμεί με 33.000 λίβρες σηκωμένες 1 πόδι ψηλά μέσα σε ένα λεπτό (Cardwell 1967 σ. 214-216, Cardwell 1971 σ. 33, Hills & Pacey 1972 σ. 28-31, Hills 1989 σ. 88-94).

Η ποσότητα «επίδοσης» (duty) είναι αρχικά στενά συνδεδεμένη με το παραγόμενο από τη μηχανή προϊόν (την άντληση του νερού) και δεν είναι ένα γενικό μέτρο για τη μέτρηση όλων των μηχανών. Η ποσότητα αυτή (και οι αντίστοιχες μονάδες) θα διατηρηθεί ως μέτρο των δυνατοτήτων των ατμομηχανών ακόμα και όταν οι ατμομηχανές αλλάζουν χρήση και από αντλίες γίνονται κινητήρες άλλων μηχανών. Για πολλά χρόνια όμως θα παραμείνει ένα εμπειρικό εργαλείο, αυστηρά περιορισμένο στο χώρο των πρακτικών μηχανικών, χωρίς να συνδέεται με άλλες ποσότητες (όπως π.χ. τη «ζωντανή δύναμη») ή με μια γενικότερη θεωρία (Κανδεράκης 2007 σ. 53).

Η γενική θεωρία των μηχανών και η δημιουργία του φυσικού μεγέθους «έργο»

Η συγκρότηση του «έργου» ως φυσικού μεγέθους εντεταγμένου στη θεωρία της μηχανικής θα γίνει με τη συνάντηση των δύο πρακτικών που παρουσιάστηκαν και με τη δημιουργία μιας γενικής θεωρίας των κινητήριων μηχανών, κεντρική έννοια της οποίας είναι το «έργο». Η συνάντηση θα πραγματοποιηθεί στη Γαλλία των αρχών του 19ου αιώνα, στο χώρο της ανώτερης τεχνικής εκπαίδευσης, με καθοριστικά πρόσωπα τους Navier, Coriolis και Poncelet, μηχανικούς με υψηλή θεωρητική κατάρτιση και καθηγητές σε ανώτατες τεχνικές σχολές.

Το 1819, ο Navier, στις υποσημειώσεις και τις προσθήκες που γράφει για την *Υδραυλική Αρχιτεκτονική* του Bellidor, χρησιμοποιεί ως κεντρικά μεγέθη για τη θεωρία μηχανών τις «ζωντανές δυνάμεις» και την «ποσότητα δράσης», η οποία ισούται με το γινόμενο της δύναμης

2 Το «μπούσελ» είναι μονάδα χωρητικότητας (όγκου) για ξηρό φορτίο (Hutton 1796 λήμμα *MEASURE*).



(ή «πίεσης» ή «προσπάθειας») που ασκεί η μηχανή επί το διάστημα που διανύει το σημείο εφαρμογής της στην κατεύθυνσή της και μετρά την «εργασία» ή το «αποτέλεσμα» της μηχανής (Bellidor 1819 σ. 103-122, 376-395). Το 1829, ο Coriolis, στο εγχειρίδιο *Για τον υπολογισμό του αποτελέσματος των μηχανών*, εισάγει δύο καινοτομίες: το όνομα «έργο» (travail) για το βασικό μέγεθος της μέτρησης των μηχανών και την τροποποίηση του μεγέθους της «ζωντανής δύναμης» στο $\frac{1}{2}$ του mv^2 , ώστε να είναι ακριβώς ισοδύναμη με το «έργο» και όχι απλώς ανάλογη. Το «έργο» ορίζεται ως το ολοκλήρωμα $\int Pds$ της δύναμης P που ασκείται στη διεύθυνση της στοιχειώδους μετατόπισης ds επί τη μετατόπιση αυτή. Το όνομα «έργο» επιλέγεται για να συνδέεται το μέγεθος αυτό με τη χρήση του όρου «εργασία» στην καθημερινή γλώσσα και χρησιμοποιείται για να μετρήσει την εργασία των κινητήριων μηχανών, των ανθρώπων και των ζώων (Coriolis 1829 σ. 11-20, 33-35). Μια ανάλογη γενική θεωρία των μηχανών, αλλά περισσότερο εκλαϊκευμένη και προσαρμοσμένη στο επίπεδο των μηχανοτεχνιτών, παρουσιάζει το 1826 και ο Poncelet σε μια σειρά από λιθογραφημένες σημειώσεις με τίτλο *Μαθήματα μηχανικής εφαρμοσμένης στις μηχανές* (Poncelet 1870 σ. 64-85, 116-120, 217-222). Εν τέλει, τα μαθήματα που παραδίδουν οι Navier, Coriolis, Poncelet καθώς και τα εγχειρίδιά τους, διαδίδουν τις νέες ιδέες στον κόσμο των μηχανικών και τελικά στο χώρο της θεωρητικής μηχανικής (Κανδεράκης 2007 σελ. 58).

Πότε μια μαθηματική παράσταση γίνεται φυσικό μέγεθος;

Όπως είδαμε, μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, τα γινόμενα «βάρος επί ύψος» ή «δύναμη επί μετατόπιση» χρησιμοποιούνται κυρίως ως υπολογιστικές τεχνικές και δεν μπορούν να θεωρηθούν αυτόνομα φυσικά μεγέθη. Οι σύγχρονοι ιστορικοί θεωρούν ότι το «έργο» συγκροτείται ως φυσικό μέγεθος μόνο στις αρχές του 19^{ου} αιώνα με τις εργασίες των Navier, Coriolis και Poncelet (Chatzis 1997, Darrigol 2001). Γιατί; Ποια είναι τα κριτήρια ώστε να μπορεί μια μαθηματική παράσταση να θεωρηθεί αυτόνομο φυσικό μέγεθος, εντεταγμένο σε μια θεωρία ή σε ένα κλάδο της φυσικής; Τα κριτήρια αυτά θεωρούμε ότι είναι τα εξής:

1. Αν η παράσταση αυτή έχει όνομα και αν ορίζεται με σχετικά ακριβή τρόπο στο πλαίσιο μιας θεωρίας. Όπως επισημαίνει και ο Roche «η δημιουργία ενός διακριτού και αποδεκτού τεχνικού όρου είναι ένα σημαντικό βήμα στην καθιέρωση μιας ανεξάρτητης γενικής έννοιας» (Roche 1998 σ. 96-98).
2. Αν έχει μονάδες με ξεχωριστό όνομα, όπως π.χ. το χιλιόγραμμα επί μέτρο ή $kg \times m$, που είναι μια από τις μονάδες που δίνει στο «έργο» ο Poncelet.
3. Αν έχει γενικότητα ή παγκοσμιότητα, αν μπορεί δηλαδή να χρησιμοποιηθεί σε κάθε τόπο και χρόνο και όχι μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Ένα παράδειγμα τοπικότητας (μη-παγκοσμιότητας) είναι π.χ. η χρήση του εκάστοτε παραγόμενου προϊόντος μιας (σύνθετης) μηχανής ως μέτρου της εργασίας της μηχανής. Η ποσότητα των παραγόμενων αλεύρων π.χ. χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της εργασίας των αλευρόμυλων, η ποσότητα των έτοιμων σανίδων για τη μέτρηση της εργασίας των πριονιστηρίων κ.ο.κ. Τελικά, ένα συγκεκριμένο παραγόμενο προϊόν, το ανέβασμα του νερού σε ορισμένο ύψος, αποτέλεσμα της εργασίας των ατμοκίνητων αντλιών, έγινε το αποτέλεσμα-πρότυπο για τη μέτρηση όλων των εργασιών.
4. Αν χρησιμοποιείται για υπολογισμούς σε συγκεκριμένες πειραματικές καταστάσεις ή πρακτικές εφαρμογές. Αν έχει επομένως εμπειρικό περιεχόμενο ή εμπειρικό νόημα (Achinstein 1964 σ. 501-502, Hempel 1966 σ. 85-92, Baltas 1990, σ. 295-296). Σύμφωνα με τον Achinstein, ένα μέρος του εμπειρικού νοήματος ενός επιστημονικού όρου είναι «να ξέρει κανείς το εύρος των εφαρμογών του όρου, δηλαδή τα είδη των




καταστάσεων στις οποίες αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί» (Achinstein 1964 σ. 502). Σύμφωνα με τον Μπαλτά οι έννοιες της φυσικής (ή οποιασδήποτε άλλης ώριμης φυσικής επιστήμης) «ντύνουν» απαραίτητα τα φαινόμενα που αυτή εξετάζει, προκειμένου να γίνουν κατανοητά ως φαινόμενα της φυσικής (και όχι απλώς ως φαινόμενα της φύσης) και για να μπορούμε να συζητάμε γι' αυτά. Επομένως οι έννοιες αυτές είναι εξ' υπαρχής «αγκυρωμένες» στα φαινόμενα και έχουν εμπειρικό νόημα. (Baltas 1988 σ. 211-215, Baltas 1990 σ. 295-296).

5. Αν συνδέεται με άλλα μεγέθη της θεωρίας μέσω μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες εκφράζουν αρχές ή εμπειρικούς νόμους. Αν επομένως έχει συστημικό νόημα (Hempel 1966 σ. 93-94, Hempel 1970 σ. 142-149, Baltas 1990 σ. 296-298). Η ιδέα του συστημικού νοήματος υπάρχει εν σπέρματι σε πολλούς λογικούς εμπειριστές. Ο Achinstein π.χ. υποστηρίζει ότι ένα μέρος του νοήματος ενός επιστημονικού όρου είναι «να ξέρει κανείς το ρόλο που ο όρος αυτός παίζει στη θεωρία» (Achinstein 1964 σ. 501). Ένα είδος συστημικού νοήματος βρίσκεται επίσης στις απόψεις της λεγόμενης ιστορικιστικής σχολής (Kuhn, Feyerabend κ.α.). Όπως γράφει ο Feyerabend, «το νόημα ενός όρου δεν είναι εσωτερική ιδιότητα του όρου, αλλά εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο ο όρος εμπλέκεται μέσα στη θεωρία» (Feyerabend 1981 σ. 74).

Περισσότερο αναλυτικός σχετικά με το συστημικό νόημα είναι ο Μπαλτάς. Σύμφωνα με αυτόν, οι έννοιες της φυσικής (και οποιασδήποτε άλλης φυσικής επιστήμης) γίνονται αισθητές (δηλαδή χρησιμοποιούνται σε επιστημονικές εξηγήσεις, στο σχεδιασμό πειραμάτων, στην ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων κ.λ.π.) μόνο ως μέρη ενός εννοιολογικού συστήματος και η γνωσιακή τους λειτουργία (δηλαδή το νόημά τους στη θεωρία) εξαρτάται πάντα και από τις άλλες έννοιες του συστήματος, που εξ αρχής αλληλοσυνδέονται. Το νόημα μιας έννοιας επομένως έχει και ένα ολιστικό χαρακτήρα: μια συστημική συνιστώσα, η οποία προσδιορίζεται από τη θέση της έννοιας στο εννοιολογικό σύστημα και τις (μαθηματικές) σχέσεις της με τις άλλες έννοιες του συστήματος (Baltas 1990 σ. 296-298).

6. Αν τα ίδια τα ιστορικά πρόσωπα, τα οποία δημιουργούν τη νέα έννοια, την αντιμετωπίζουν ως σημαντική και αυτοδύναμη ποσότητα.

Οι παραστάσεις $F \cdot s$ ή  ικανοποιούν σε γενικές γραμμές τα κριτήρια αυτά μόνο στις εργασίες των Navier, Coriolis και Poncelet. Τότε το μέγεθος «έργο»: i. Αποκτά όνομα και ορίζεται με ακρίβεια, τόσο στο πλαίσιο της θεωρίας των μηχανών όσο και στο πλαίσιο της θεωρητικής μηχανικής εν γένει. ii. Αποκτά σαφώς προσδιορισμένες μονάδες με ξεχωριστό όνομα. iii. Έχει ένα γενικό και παγκόσμιο χαρακτήρα. Όχι μόνο αφορά όλα τα είδη των μηχανών, αλλά χρησιμοποιείται και σε περιοχές της μηχανικής πέρα από τις μηχανές. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και σε υπολογισμούς που ξεπερνούν τη μηχανική. iv. Είναι κεντρικό μέγεθος σε υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με τις μηχανές και την εργασία των ανθρώπων και των ζώων. Αυτό του δίνει μια στενή σχέση με την εμπειρία ή αλλιώς ένα εμπειρικό νόημα. v. Σχετίζεται μαθηματικά και με άλλα μεγέθη της μηχανικής, όπως π.χ. με τη «ζωντανή δύναμη» στην «εξίσωση της ζωντανής δύναμης», με τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανικής των ρευστών (Poncelet 1874 σ. 217-222) κ.α. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι έχει και συστημικό νόημα. vi. Τα ίδια τα ιστορικά πρόσωπα που το δημιουργούν φαίνεται ότι θεωρούν το «έργο» σημαντικό και αυτοδύναμο μέγεθος. Συνεπώς, μόνο τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το «έργο» συγκροτείται ως μέγεθος της μηχανικής, εντεταγμένο στο εννοιολογικό της σύστημα.



Συμπεράσματα και διδακτικές προεκτάσεις

Όπως είδαμε, το γινόμενο «βάρος επί ύψος» ή «δύναμη επί μετατόπιση» χρησιμοποιείται για περισσότερο από εκατό χρόνια σε δύο διαφορετικού είδους πρακτικές: στους θεωρητικούς υπολογισμούς τους σχετικούς με τη «ζωντανή δύναμη» (*vis viva*) – μια θεωρητική πρακτική – και στους πρακτικούς υπολογισμούς τους σχετικούς με την εργασία και την επίδοση των κινητήριων μηχανών – μια εμπειρική πρακτική. Και στις δύο αυτές δραστηριότητες, το γινόμενο αυτό εξυπηρετεί μόνο υπολογιστικούς σκοπούς, δεν αποκτά ποτέ αυτοδύναμη οντότητα και δεν μπορεί να θεωρηθεί συγκροτημένο φυσικό μέγεθος. Η συγκρότηση του «έργου» ως μεγέθους της μηχανικής θα γίνει με τη συνάντηση των δύο πρακτικών, στο πλαίσιο της δημιουργίας μιας γενικής θεωρίας των μηχανών, που θα γίνει στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, στον κόσμο της ανώτερης γαλλικής τεχνικής εκπαίδευσης. Μόνο τότε το «έργο» ικανοποιεί μια σειρά από κριτήρια τα οποία θεωρούμε ότι προσδιορίζουν τότε μια μαθηματική παράσταση (όπως η «δύναμη επί τη μετατόπιση») συνιστά αυτοδύναμο φυσικό μέγεθος, ενταταγμένο στη θεωρία.

Η ιστορικο-φιλοσοφική αυτή ιστορία έχει και σημαντικές διδακτικές προεκτάσεις:

- i. Η μακροχρόνια, δύσκολη και περίπλοκη πορεία των μηχανικών και των επιστημόνων για τη συγκρότηση του φυσικού μεγέθους «έργο» μας υποδεικνύει τη δυσκολία που είναι δυνατόν να αντιμετωπίσουν οι μαθητές στην οικοδόμηση του.
- ii. Το φυσικό μέγεθος «έργο» δημιουργήθηκε για να μετρήσει την «εργασία» στις μηχανές, στους ανθρώπους και στα ζώα: διεργασία που το συνδέει εξ υπαρχής με την εμπειρία, δηλαδή του αποδίδει εμπειρικό νόημα. Η πρωταρχική αυτή λειτουργία του «έργου» κατά κανόνα δεν εμφανίζεται στα διδακτικά εγχειρίδια με αποτέλεσμα το «έργο» να γίνεται αντιληπτό ως θεωρητική κατασκευή άσχετη με τον πραγματικό κόσμο (Κανδεράκης 2006). Συχνά η επιστήμη δημιουργεί νέες έννοιες όταν αντιμετωπίζει πρακτικά προβλήματα στη ζωή ή την τεχνολογία. Κατά τη διδασκαλία, η παρουσίαση των προβλημάτων αυτών και των συνθηκών που οδήγησαν στις νέες έννοιες (σε μια απλοποιημένη εκδοχή) μπορεί να καταδείξει την αναγκαιότητα και τη χρησιμότητα των εννοιών, κεντρίζοντας έτσι το ενδιαφέρον των μαθητών.
- iii. Η συγκρότηση του «έργου» ως φυσικού μεγέθους μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία τριών σταδίων. Αρχικά, δημιουργείται από τους μηχανοτεχνίτες το μέτρο για να μετρηθεί μια συγκεκριμένη εργασία, η ανύψωση ενός βάρους σε ορισμένο ύψος. Στη συνέχεια, η εργασία αυτή χρησιμοποιείται ως πρότυπο για τη μέτρηση και άλλων εργασιών που κάνουν οι μηχανές. Τέλος, το «έργο» ως μέτρο της εργασίας γενικεύεται σε «δύναμη επί μετατόπιση» ώστε να περιλαμβάνει κάθε είδους εργασία. Παράλληλα, συνδέεται με τις «ζωντανές δυνάμεις» και με άλλα μεγέθη, αποκτά συστημικό νόημα και εντάσσεται οργανικά στο εννοιολογικό πλέγμα της μηχανικής.

Η πορεία αυτή μας δίνει ιδέες για μια πορεία στη διδασκαλία του «έργου» περισσότερο συνδεδεμένη με τη ζωή και την τεχνολογία. Η διδασκαλία αυτή πέρα από τα γνωστά (ανάδειξη των ιδεών των μαθητών κ.λ.π.) θα μπορούσε π.χ. να περιλαμβάνει και τα εξής βήματα: 1. Εισαγωγή του «έργου» ως μέτρου της εργασίας ενός ανθρώπου (ή μια ανυψωτικής μηχανής) για το ανέβασμα βάρους σε ορισμένο ύψος. 2. Επέκταση και εφαρμογή της έννοιας σε οριζόντια μετακίνηση βάρους. 3. Επέκταση και εφαρμογή της και σε άλλου είδους εργασίες (π.χ. στη συμπίεση αερίου με έμβολο). 4. Σύνδεσή του «έργου» με άλλες θεωρητικές έννοιες (όπως π.χ. την κινητική ενέργεια) και επομένως απόδοση και συστημικού νοήματος σε αυτό.

Βιβλιογραφία

Κανδεράκης Ν. (2006). Το χαμένο νόημα του «έργου» και η διδασκαλία του. Διδασκαλία των Φυσικών επιστημών: Έρευνα και Πράξη, τεύχος 18, 72-77.

Κανδεράκης Ν. (2007). Όταν η θεωρία συναντά την πράξη: η συγκρότηση του «έργου» ως μεγέθους της μηχανικής. Νεύσις, τομ. 16, 45-64.

Achinstein P. (1964). On the meaning of scientific terms. *The Journal of Philosophy*, 61: 17 (Sep. 17, 1964), 497- 509.

Baltas A. (1988). On the structure of Physics as a science. Batens D. & Bendegem J. P. (eds), *Theory and experiment: recent insights and new perspectives on their relation*, Dordrecht, Reidel.

Baltas A. (1990). Once again on the meaning of physical concepts. P. Nikolakopoulos (ed.), *Greek studies in the philosophy and history of science*, 293-313, Dordrecht, Kluwer.

Bellidor B. F. (1819). *Architecture hydraulique, ou l' art de conduire, d' élever, et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie*. Nouvelle édition avec des notes et additions par m. Navier. tom.1, Paris.

Borda J. C. (publ. 1770). *Mémoire sur les roues hydrauliques*. Histoire de l' Académie Royale des Sciences, année 1767, 270-287.

Cardwell D. (1967). Some factors in the early development of the concepts of power, work and energy. *British Journal for the History of Science*, 3, 209-224.

Cardwell D. (1971). *From Watt to Clausius: the rise of thermodynamics in the early industrial age*. London, Heinemann.

Chatzis K. (1997). *Économie, machines et mécanique rationnelle: la naissance du concept de travail chez les ingénieurs-savants français, entre 1819 et 1829*. Annales des Ponts et Chaussées, No 82, 10-20.

Coriolis G. G. (1829). *Du calcul de l' effet des machines, ou considérations sur l' emploi des moteurs et sur leur évaluation, pour servir d' introduction a l' étude spéciale des machines*. Paris, Carilian-Goeury.

Darrigol O. (2001). God, waterwheels, and molecules: Saint-Venant's anticipation of energy conservation. *Historical studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 31, part 2, 285-353.

Descartes R. (1996). *Œuvres*. C. Adam & P. Tannery (eds), Paris, Librairie Philosophique J. Vrin.

Feyerabend P. (1965). Explanation, reduction and empiricism. P. Feyerabend, *Realism rationalism and scientific method*, 44-96, Cambridge, Cambridge University Press.

Hempel K. (1966). *Philosophy of natural science*. Upper Saddle River N.J., Prentice Hall.

Hempel K. (1970). On the "standard conception" of scientific theories. Radner M. & Winicour S. (eds), *Analyses of theories and methods of Physics and Psychology*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. IV, Minneapolis, University of Minnesota Press.

Hills R. (1989). *Power from the steam, a history of the stationary steam engine*. Cambridge, Cambridge University Press.



Hills R. & Pacey A. J. (1972). The measurement of power in early steam- driven textile mills. *Technology and Culture*, vol. 13, 25-43.

Hutton C. (1796). *Mathematical and philosophical dictionary*. 2 vols, London.

Iltis C. (1970). D' Alembert and the vis viva controversy. *Studies in History and Philosophy of Science*, vol.1, pp. 135-144.

Jurdain P. (1913). The principle of least action. Στο Cohen I. B. (ed.), 1981, *The conservation of energy and the principle of least action*, New York, Arno press.

Lagrange J. L. (1788). *Mécanique Analytique*. Paris, Veuve Desaint, fac. sim. J. Gabay 1989.

Leibniz G. W. (1971). *Essay de dynamique*. G. W. Leibniz, *Mathematische Schriften*, ed. C. I. Gerhardt, vol. VI, 215-233, Hildesheim, Georg Olms Verlag.

Leibniz G. W. (1989a). A brief demonstration of a notable error of Descartes and others concerning a natural law. *Leibniz: Philosophical papers and letters*, ed. L. Loemker, 296-302, Dordrecht, Kluwer.

Leibniz G. W. (1989b). *Specimen dynamicum*. *Leibniz: Philosophical papers and letters*, ed. L. Loemker, 435-452, Dordrecht, Kluwer.

Lindsay R. B. (1975). *Energy: Historical development of the concept*. Stroudsburg Pen., Dowden Hutchinson & Ross.

Parent A. (1704). Sur la plus grande perfection possible des machines. *Histoire de l' Académie Royale des Sciences*, année 1704, 323-338.

Poncelet J. V. (1870 1st edition 1829). *Introduction a la mécanique industrielle physique ou expérimentale*. Paris, Gauthier-Villars.

Reynolds T. (1973). *Science and the water wheel: The development and diffusion of theoretical and experimental doctrines relating to the vertical water wheel, c. 1500 – c. 1850*. Dissertation thesis, University of Kansas.

Roche J. (1998). *The mathematics of measurement: a critical history*. London, Athlon Press.

Smeaton J. (1759). An experimental enquiry concerning the natural powers of water and wind to turn mills, and other machines, depending on a circular motion. *Philosophical Transactions*, 51, 100-174.