

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Ο ΜΠΕΡΔΕΜΕΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ I: ΕΡΓΟ

John W. Jewett Jr., California State Polytechnic University, Pomona, CA

Η ενέργεια είναι μια κρίσιμη έννοια που χρησιμοποιείται στην ανάλυση φυσικών φαινομένων και συχνά αποτελεί ουσιαστικό σημείο εκκίνησης για την επίλυση προβλημάτων φυσικής. Είναι μια καθολική (*global*) έννοια που εμφανίζεται στα αναλυτικά προγράμματα φυσικής στη μηχανική, θερμοδυναμική, ηλεκτρομαγνητισμό και μοντέρνα φυσική. Η ενέργεια βρίσκεται επίσης στην καρδιά της περιγραφής διαδικασιών στη βιολογία, χημεία, αστρονομία και γεωλογία. Έτσι, είναι σημαντικό να συζητιέται το ζήτημα της ενέργειας ξεκάθαρα και αποτελεσματικά στα βιβλία διδασκαλίας και τις παρουσιάσεις. Δυστυχώς το θέμα αυτό είναι πολύ πιθανό να δημιουργήσει σύγχυση στους σπουδαστές, εάν ο συγγραφέας ή ο καθηγητής που διδάσκει δεν το χειριστεί επιδέξια. Υπάρχουν ωστόσο, συγκεκριμένα βήματα που μπορούν να γίνουν στη διδασκαλία της ενέργειας, τα οποία μειώνουν ή εξαλείφουν τις πηγές σύγχυσης για τους σπουδαστές.

Αυτό είναι το πρώτο μιας σειράς πέντε άρθρων που προσφέρουν μια προσέγγιση για τη βελτίωση της διαπραγμάτευσης της έννοιας της ενέργειας στα σχολικά εγχειρίδια αλλά και στα μαθήματα στη σχολική αίθουσα, ενισχύοντας έτσι την επακόλουθη κατανόηση της ενέργειας από τους σπουδαστές και τη χρήση από τη μεριά τους της κατανόησης αυτής στην επίλυση προβλημάτων. Ξεκινάμε συζητώντας την έννοια του *έργου*. Η προσέγγιση σε κάποια σχολικά βιβλία και την επίλυση μερικών πιο σύνθετων προβλημάτων είναι ο ορισμός του έργου και στη συνέχεια η εισαγωγή ενός αριθμού ποσοτήτων που μοιάζουν με έργο (όπως το «ψευδοέργο» ή το «έργο στο κέντρο μάζας»), καθώς και μια ποικιλία «ενεργειακού τύπου» εξισώσεων (όπως το θεώρημα «ψευδοέργου – ενέργειας» ή η «εξίσωση του κέντρου μάζας»). Η εισαγωγή αυτών των πολλαπλών ποσοτήτων και εξισώσεων μπορεί να προκαλέσει σύγχυση στους σπουδαστές. Αυτή η σειρά των άρθρων ισχυρίζεται ότι πολύπλοκα προβλήματα μπορούν να λυθούν με *έναν μόνο* ορισμό του έργου και *μία* εξίσωση ενέργειας, χωρίς να υπάρχει λόγος για την εισαγωγή άλλων «εργοειδών» ποσοτήτων ή «ενεργοειδών» εξισώσεων.

Προσδιορίζοντας τη μετατόπιση στον ορισμό του έργου

Η διδασκαλία του έργου έχει προκαλέσει αρκετές συζητήσεις στη βιβλιογραφία¹⁻¹². Η εισαγωγή του έργου σε συνηθισμένα σχολικά βιβλία περιλαμβάνει τη θεώρηση μιας δύναμης $\mathbf{F}$ που ασκείται σε ένα αντικείμενο, το οποίο στη συνέχεια μετακινείται κατά μία απόσταση $\Delta \mathbf{r}$. Ακολουθεί η παρουσίαση της παρακάτω εξίσωσης ή μιας παραλλαγής της:

$$W = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της δύναμης και της μετατόπισης. Σε αρκετά βιβλία¹³ η ποσότητα $\Delta \mathbf{r}$ προσδιορίζεται ως «η μετατόπιση του αντικειμένου» ή απλώς «η μετατόπιση» χωρίς να προσδιορίζεται τι ακριβώς μετατοπίζεται. Αυτή η αοριστία οδηγεί αργότερα, στη μελέτη της μηχανικής, σε εννοιακές δυσκολίες όταν ο σπουδαστής αντιμετωπίζει δυνάμεις τριβής ή δυνάμεις που ασκούνται σε παραμορφώσιμα ή περιστρεφόμενα αντικείμενα.

Σε κάποιες προσεγγίσεις, η μετατόπιση στην εξίσωση (1) σκόπιμα αφήνεται αυθαίρετη ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί διαφορετικά, ανάλογα με την «εργοειδή» ποσότητα που συζητιέται. Για παράδειγμα μια «εργοειδής» ποσότητα κάποιες φορές ορίζεται ως «ψευδοέργο»²⁻⁴ ή «έργο του κέντρου μάζας»¹². Γι' αυτές τις ποσότητες που μοιάζουν με έργο, η μετατόπιση είναι αυτή του κέντρου μάζας του αντικειμένου ή του συστήματος πάνω στο οποίο παράγεται το έργο. Σε μια κατοπινή προσέγγιση των Chabay και Sherwood⁶, μια ενεργειακή αρχή εφαρμόζεται σε «σύστημα υλικού σημείου» το οποίο αναπαριστάνεται ως μοντέλο ενός συστήματος όλη η μάζα του οποίου είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο μάζας του.

Στη δικιά μου μέθοδο προσέγγισης για την επίλυση προβλημάτων, η μετατόπιση Δr ορίζεται **πάντα** ως η **μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης**. Για ένα σύστημα που αποτελείται από ένα μοναδικό σωματίδιο ή ένα μη παραμορφώσιμο αντικείμενο το οποίο δεν περιστρέφεται, η μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης είναι ίδια με τη μετατόπιση του αντικειμένου ή του συστήματος. Συνεπώς, προσδιορίζοντας την ποσότητα Δr σαν τη μετατόπιση του αντικειμένου, δεν προκαλούνται άμεσα προβλήματα γι' αυτά τα συστήματα. Ωστόσο, για ένα παραμορφώσιμο ή περιστρεφόμενο σύστημα, η μετατόπιση του κέντρου μάζας του συστήματος μπορεί να είναι διαφορετική από τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης. Στην περίπτωση αυτή, το εγχειρίδιο, είναι πιθανό να εισάγει το «ψευδοέργο» ή το «έργο του κέντρου μάζας». Σ' αυτή τη σειρά των άρθρων ισχυρίζομαι ότι αυτή η καινούργια «εργοειδής» ποσότητα δεν είναι απαραίτητη, και θα συζητήσω μια ενεργειακή προσέγγιση που δεν τη χρειάζεται.

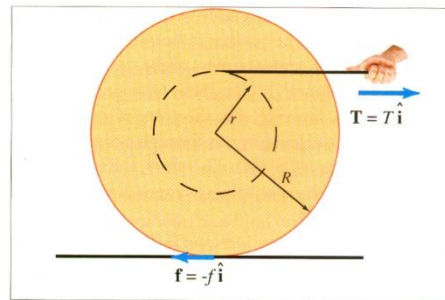
Είναι απολύτως **δυνατό**, να διδάξει κανείς μηχανική χωρίς να προχωρήσει σε έναν μοναδικό προσδιορισμό της μετατόπισης στην εξίσωση (1). Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

1. Να αποφύγει να θίξει στη μηχανική προβλήματα που περιλαμβάνουν οτιδήποτε άλλο εκτός από σωματίδια και να επανορίσει τη μετατόπιση Δr όταν διδάξει θερμοδυναμική. Αλλά γιατί να βάλουμε τους σπουδαστές στη μειονεκτική θέση να βραχύνουν τη μελέτη της μηχανικής και στη συνέχεια να τους αναγκάσουμε να ξεχάσουν τον ορισμό της μετατόπισης που έμαθαν νωρίτερα και να τον αντικαταστήσουν με κάτι διαφορετικό στη θερμοδυναμική; Πράγματι, όπως υποδεικνύουν οι Chabay και Sherwood⁶ « συχνά σε παραδοσιακά μαθήματα η έννοια της ενέργειας που εισάγεται για να βοηθήσει στην επίλυση προβλημάτων μηχανικής φαίνεται να είναι διαφορετική από τις ενεργειακές έννοιες που συζητούνται (χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύμβολα) στη θερμοδυναμική.»
2. Να εισάγει το «ψευδοέργο» ή άλλες «εργοειδείς» ποσότητες μαζί με «ενεργειακού τύπου» εξισώσεις όπως για παράδειγμα πολλαπλές εκδοχές του «θεωρήματος έργου- κινητικής ενέργειας». Ενώ η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την επίλυση προβλημάτων που συμπεριλαμβάνουν παραμορφώσιμα ή περιστρεφόμενα συστήματα, είναι επιζήμια για την κατανόηση των εννοιών από τους σπουδαστές. Πιο συγκεκριμένα, οι σπουδαστές θα έχουν δυσκολία να κατανοήσουν τι είναι πραγματικό έργο και τι ψευδοέργο, όπως και ποια είναι πράγματι ενεργειακή εξίσωση και ποια μοιάζει μεν, αλλά δεν είναι ενεργειακή εξίσωση.

Σ' αυτή τη σειρά άρθρων, συζητείται μια εναλλακτική προσέγγιση που επιτρέπει στους σπουδαστές να λύνουν προβλήματα μηχανικής που

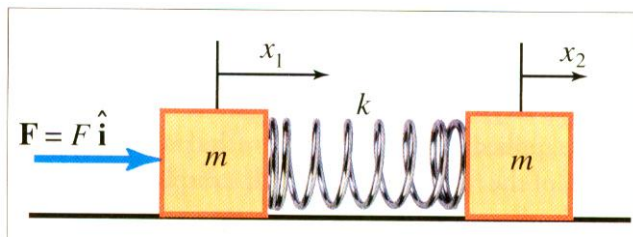
συμπεριλαμβάνουν παραμορφώσιμα ή περιστρεφόμενα συστήματα με καλώς ορισμένες έννοιες και να δουν ότι η θερμοδυναμική είναι συνεπής με τη μηχανική.

Σαν παραδείγματα περιπτώσεων στις οποίες η μετατόπιση του κέντρου μάζας είναι διαφορετική από τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης θεωρείστε δύο περιπτώσεις που προτείνονται από τον Mungan.¹² Στο σχήμα 1 ένα χέρι τραβάει με δύναμη μέτρου T ένα νήμα που είναι τυλιγμένο γύρω από τον άξονα ενός καρουλιού. Το καρούλι ξεκινά από την ηρεμία πάνω σε τραπέζι με τριβή και χωρίς να ολισθαίνει. Ο άξονας έχει ακτίνα r και το καρούλι έχει ακτίνα R . Το κέντρο μάζας του καρουλιού πραγματοποιεί οριζόντια μετατόπιση μέτρου L . Είναι εύκολο, ωστόσο, να δείξουμε ότι το σημείο εφαρμογής της δύναμης που ασκεί το χέρι στο νήμα υπόκειται σε μετατόπιση μέτρου $L(1+r/R)$. Έτσι, το έργο που παράγεται από το χέρι πάνω στο σύστημα καρουλιού-νήματος **δεν είναι** $T \cdot L$ αλλά $T \cdot L(1+r/R)$.



Σχ. 1. Ένα καρούλι ακτίνας R έλκεται με δύναμη T μέτρου T η οποία ασκείται σε νήμα τυλιγμένο στον άξονα του καρουλιού ακτίνας r . Το καρούλι είναι σε επαφή με οριζόντιο τραπέζι που ασκεί δύναμης τριβής f μέτρου f . Το καρούλι κυλιέται χωρίς να ολισθαίνει.

Η δεύτερη περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 2. Μια σταθερή οριζόντια δύναμη μέτρου F σπρώχνει ένα σώμα μάζας m , μετακινώντας το κατά μία απόσταση x_1 . Το σώμα είναι συνδεδεμένο με δεύτερο όμοιο σώμα μέσω ελατηρίου σταθεράς k . Καθώς το πρώτο σώμα μετατοπίζεται κατά x_1 , το δεύτερο σώμα μετακινείται προς τα δεξιά κατά απόσταση x_2 . Στη χρονική αυτή διάρκεια, το κέντρο μάζας του συστήματος έχει υποστεί μετατόπιση μέτρου $\frac{1}{2}(x_1+x_2)$. Το έργο που παράγεται από την ασκούμενη δύναμη ωστόσο, **δεν είναι** $\frac{1}{2} F \cdot (x_1+x_2)$. Το έργο είναι $F \cdot x_1$ γιατί το σημείο εφαρμογής της δύναμης μετακινείται για μετατόπιση¹⁴ μέτρου x_1 .



Σχ. 2. Δύο σώματα μάζας m συνδέονται μέσω ελατηρίου σταθεράς k . Το σύστημα ηρεμεί, με το ελατήριο να έχει το φυσικό του μήκος, πάνω σε λείο τραπέζι. Μια σταθερή δύναμη F μέτρου F ασκείται στο αριστερό σώμα, μετακινώντας το κατά απόσταση x_1 . Στο χρονικό διάστημα αυτό, το ελατήριο αναγκάζει το δεξί σώμα να μετακινηθεί προς τα δεξιά κατά μια απόσταση x_2 .

Συνολικό έργο

Συχνά πάνω σ' ένα σύστημα ασκούνται πολλές δυνάμεις. Στην περίπτωση αυτή, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε το συνολικό έργο που παράγεται από τις δυνάμεις πάνω στο σύστημα. Δυστυχώς, ένας περιορισμένος ορισμός του συνολικού έργου, συχνά παρουσιάζεται από συγγραφείς και καθηγητές σαν να έχει γενική ισχύ :

Το συνολικό έργο που παράγεται από πολλές δυνάμεις πάνω σ' ένα αντικείμενο, είναι ίσο με το γινόμενο της συνισταμένης δύναμης που ασκείται στο αντικείμενο επί τη μετατόπιση του αντικειμένου.

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως υποδεικνύεται στην πρόταση, το έργο συζητείται με όρους που σχετίζονται με το αποτέλεσμα που επιφέρει σ' ένα αντικείμενο. Ένα από τα στοιχεία στα οποία δίνεται έμφαση σ' αυτή τη σειρά των άρθρων είναι ότι είναι πιο γόνιμο να σκεφτόμαστε για *συστήματα* παρά για *αντικείμενα*, όπως συζητείται με λεπτομέρεια στο δεύτερο άρθρο¹⁵ αυτής της σειράς. Παρ' ότι ένα σύστημα μπορεί πράγματι να είναι ένα μοναδικό αντικείμενο, η έμφαση στα συστήματα θα επιτρέψει στον σπουδαστή να κατανοήσει μια ευρύτερη ποικιλία προβλημάτων. Η πρόταση που αναφέρθηκε πιο πάνω, είναι σωστή μόνο αν το σύστημα είναι ιδανικά άκαμπτο και μη παραμορφώσιμο. Εάν το σύστημα είναι παραμορφώσιμο, ***διαφορετικές δυνάμεις πάνω στο σύστημα είναι δυνατόν να δρουν για διαφορετικές μετατοπίσεις***. Έτσι, η πρόταση που προσδιορίζει το σωστό έργο που παράγεται από τις δυνάμεις πάνω στο σύστημα είναι:

Το συνολικό έργο που παράγεται από πολλές δυνάμεις πάνω σ' ένα αντικείμενο, είναι ίσο με το άθροισμα των έργων που παράγονται από κάθε μία δύναμη ξεχωριστά πάνω στο σύστημα.

Το έργο που παράγεται από κάθε ξεχωριστή δύναμη πρέπει να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της συγκεκριμένης δύναμης. Η δεύτερη πρόταση είναι γενικώς σωστή και είναι ισοδύναμη με την πρώτη στην ειδική περίπτωση ενός μη παραμορφώσιμου συστήματος. Αντί να προσθέσουμε τις δυνάμεις και στη συνέχεια να υπολογίσουμε το έργο, η γενικότερη προσέγγιση είναι να υπολογίσουμε τα ξεχωριστά έργα και στη συνέχεια να τα προσθέσουμε.

Η κατάσταση παρουσία τριβής

Μια άλλη περιοχή της μηχανικής στην οποία προκύπτουν δυσκολίες είναι αυτή του έργου των δυνάμεων τριβής. Εάν η ποσότητα $\Delta \mathbf{r}$ στον ορισμό του έργου οριστεί ως «η μετατόπιση του αντικειμένου», συχνά ακολουθεί στα βιβλία και τη διδασκαλία ότι το έργο που παράγεται από την τριβή σ' ένα σώμα που ολισθαίνει πάνω σε μία επιφάνεια είναι $W = -f_k d$ όπου f_k είναι η δύναμη τριβής ολίσθησης πάνω στο σώμα και d η απόσταση κατά την οποία το σώμα μετακινείται σε σχέση με την επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η δύναμη τριβής έχει κατεύθυνση αντίθετη από τη μετατόπιση. Αυτή η έκφραση για το έργο ενσωματώνεται στη συνέχεια στο θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας για το σώμα.

Αυτή η προσέγγιση παραβλέπει το γεγονός ότι η μετατόπιση του σώματος δεν είναι ίδια με τις πάμπολλες μετατοπίσεις των δυνάμεων τριβής σε ένα μεγάλο αριθμό σημείων επαφής. Οι τελευταίες αυτές μετατοπίσεις είναι πολύπλοκες και συμπεριλαμβάνουν παραμορφώσεις της κατώτερης επιφάνειας του σώματος. Το ζήτημα αυτό έχει μελετηθεί στη βιβλιογραφία.^{16,17}

Ένας σπουδαστής που γνωρίζει ολοκληρωτικό λογισμό, δεν θα έχει μεγάλη δυσκολία με τη σχέση $W = -f_k d$, βασιζόμενος στη δυνατότητά του να υπολογίσει το έργο που εκτελεί μια δύναμη υπολογίζοντας το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα πάνω στην τροχιά που ακολουθεί το αντικείμενο. Στην περίπτωση ενός σώματος που ολισθαίνει πάνω σε μια ακίνητη επιφάνεια, η δύναμη τριβής έχει πάντα αντίθετη κατεύθυνση από οποιαδήποτε απειροστή μετατόπιση του σώματος. Για μια

σταθερή δύναμη τριβής, το παραπάνω ολοκλήρωμα ανάγεται στο γινόμενο της δύναμης επί το μήκος της τροχιάς.

Τι γίνεται όμως με έναν σπουδαστή που δεν γνωρίζει ολοκληρωτικό λογισμό; Ο σπουδαστής αυτός δεν βλέπει τον ορισμό του έργου μέσω του επικαμπύλιου ολοκληρώματος. Ένας άριστος σπουδαστής θα σκεφτεί $W = -f_k \cdot d$ και θα αναρωτηθεί γιατί σ' αυτή την περίπτωση το έργο ορίζεται χρησιμοποιώντας την **απόσταση** και όχι τη **μετατόπιση**. Μια τέτοια εξίσωση δημιουργεί ενοχλητική αποσύνδεση με προηγούμενες αναφορές στην έννοια του έργου, όπου το έργο υπολογιζόταν με χρήση της μετατόπισης. Επιπλέον, ο σπουδαστής που δεν γνωρίζει ολοκληρωτικό λογισμό, ίσως δεν είναι σε θέση να θεωρήσει απειροστές μεταβολές, και μπορεί να γενικεύσει το Δr στον ορισμό του έργου ώστε να δηλώνει μόνο μακροσκοπικές μετατοπίσεις. Για ένα αντικείμενο που κινείται σε καμπύλη τροχιά, d είναι το μήκος της τροχιάς, και μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικό από το μέτρο της μετατόπισης του αντικειμένου.

Κατά τη γνώμη μου, μια γονιμότερη εννοιακή προσέγγιση για μια περίπτωση όπως αυτή ενός σώματος που ολισθαίνει πάνω σε μια επιφάνεια, είναι **(1)** να εγκαταλείψουμε τη χρήση της φράσης «έργο που εκτελείται από την τριβή», **(2) να μην** επικαλούμαστε το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας, **(3)** να ταυτοποιήσουμε τον συνδυασμό $-f_k \cdot d$ με τη μεταβολή στη μηχανική ενέργεια $E_{μηχ}$ του συστήματος που συμπεριλαμβάνει το σώμα και την επιφάνεια με την οποία αυτό είναι σε επαφή:¹⁸

$$-f_k \cdot d = \Delta E_{μηχ} \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) αναπαριστάει μόνο το μέρος εκείνο της μεταβολής στη μηχανική ενέργεια του συστήματος που οφείλεται σε δυνάμεις τριβής. Εάν βέβαια ασκούνται και άλλες δυνάμεις, όπως μια δύναμη από ένα χέρι που σπρώχνει το σώμα ή μια βαρυτική δύναμη που τραβάει προς τα κάτω το σώμα σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο, η μηχανική ενέργεια του συστήματος θα υποστεί μεταβολές λόγω **και** αυτών των δυνάμεων. Στην περίπτωση της ολίσθησης του σώματος κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου, το σύστημα θα μπορούσε να επεκταθεί έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει και τη Γη, οπότε η μηχανική ενέργεια του συστήματος θα περιλάμβανε τόσο την κινητική ενέργεια όσο και τη βαρυτική δυναμική ενέργεια.

Ανεξάρτητα από το αν άλλες δυνάμεις, πέραν της τριβής, δρουν πάνω στο σώμα, η ελάττωση της μηχανικής ενέργειας που περιγράφει η εξίσωση (2) αντιστοιχεί σε αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος:

$$+f_k \cdot d = \Delta E_{εσ} \quad (3)$$

όπου η εσωτερική ενέργεια κατανέμεται στο σώμα και την επιφάνεια. Ενώ η προσέγγιση αυτή καταλήγει στα ίδια μαθηματικά βήματα σε ενεργειακά προβλήματα που συμπεριλαμβάνουν τριβή με την προσέγγιση που υιοθετεί $W = -f_k \cdot d$, εξαλείφει τις εννοιακές δυσκολίες και ασυμβατότητες για τον σπουδαστή.

Από την παραπάνω διαπραγμάτευση προκύπτει ένα σημαντικό σημείο που δεν θα πρέπει να παραβλεφθεί. Στην ενεργειακή προσέγγιση που προτείνεται σ' αυτή τη σειρά των άρθρων, **το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας δεν αποτελεί το σημείο εκκίνησης για την επίλυση προβλημάτων**. Παρ' ότι το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στην επίλυση κάποιων προβλημάτων, δεν χρησιμοποιείται από τους σπουδαστές ως θεμελιώδης αρχή για να ξεκινήσουν ένα ενεργειακό πρόβλημα. Αυτή η σημαντική διαφοροποίηση από

τις περισσότερες παραδοσιακές προσεγγίσεις, θα συζητηθεί πιο αναλυτικά στο τέταρτο άρθρο¹⁹ αυτής της σειράς.

Ερωτήσεις

Υπό το φως των όσων συζητήθηκαν, σκεφτείτε τις παρακάτω ερωτήσεις του τύπου Σωστό – Λάθος :

- (1) Σωστό ή λάθος; Ένα αγόρι πηδάει προς τα πάνω στον αέρα εξασκώντας μια προς τα κάτω δύναμη στο έδαφος. Μπορούμε να εφαρμόσουμε το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας, $W=\Delta K$, για το αγόρι, προκειμένου να υπολογίσουμε την ταχύτητα με την οποία εγκαταλείπει το έδαφος.
- (2) Σωστό ή λάθος; Ένα μπαλόνι συμπιέζεται ομοιόμορφα. Εφόσον το κέντρο μάζας του δεν μετατοπίζεται, το έργο που παράγεται πάνω στο μπαλόνι είναι μηδενικό.

Και οι δύο ισχυρισμοί είναι λανθασμένοι. Η ερώτηση (1) αναφέρεται σε μια απλή, καθημερινή εμπειρία που δυστυχώς δεν μπορεί να αναλυθεί με τη χρήση παραδοσιακών τρόπων διδασκαλίας φυσικής χωρίς την εισαγωγή «εργοειδών» ποσοτήτων και «ενεργειακού τύπου» εξισώσεων. Η προς τα πάνω δύναμη που εκτινάσσει το αγόρι στον αέρα είναι η κάθετη δύναμη που ασκεί το έδαφος στα πόδια του. Το κέντρο μάζας του αγοριού πράγματι μετατοπίζεται κατακόρυφα. Η κάθετη δύναμη, ωστόσο, δεν μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της στο σύστημα αναφοράς του εδάφους, και έτσι δεν παράγεται έργο απ' αυτή τη δύναμη πάνω στο αγόρι. Η μεταβολή στην κινητική ενέργεια του αγοριού δεν προέρχεται από έργο που παράγεται πάνω του. Πρόκειται για μια περίπτωση παραμορφώσιμου συστήματος. Άλλες περιπτώσεις περιλαμβάνουν έναν άνθρωπο που ανεβαίνει σκαλοπάτια ή μια σκάλα, ένα κορίτσι που σπρώχνει έναν τοίχο ενώ είναι πάνω σ' ένα skateboard, και ένα κομμάτι στόκου που χτυπά σ' έναν τοίχο. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις δεν παράγεται έργο από τη δύναμη επαφής, γιατί δεν μετατοπίζεται το σημείο εφαρμογής της δύναμης στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς της επιφάνειας που την ασκεί.²⁰ Αυτές πάντως είναι συνηθισμένες περιπτώσεις και η διδασκαλία μας της φυσικής θα έπρεπε να δίνει στους σπουδαστές τη δυνατότητα να τις αναλύουν σωστά. Με τον σωστό ορισμό του έργου και μια γενικότερη θεώρηση της ενέργειας,¹⁹ ο σπουδαστής μπορεί με σωστό τρόπο να αντιληφθεί ότι σ' αυτές τις περιπτώσεις συμβαίνουν μετατροπές στην εσωτερική ενέργεια του συστήματος και όχι εφαρμογές του θεωρήματος έργου-ενέργειας.

Η ερώτηση (2) στοχεύει απευθείας στον ορισμό του έργου όταν ο σπουδαστής φτάσει στη θερμοδυναμική. Εάν το $\Delta \mathbf{r}$ έχει οριστεί ως «η μετατόπιση του αντικειμένου», θα φαίνεται ότι δεν παράγεται έργο πάνω στο μπαλόνι. Αν όμως το $\Delta \mathbf{r}$ έχει οριστεί ως «η μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της δύναμης», είναι ξεκάθαρο ότι οι δυνάμεις που συμπιέζουν το μπαλόνι στην προς τα μέσα μετακινούμενη επιφάνειά του, έχουν μετατοπίσει το σημείο εφαρμογής τους, οπότε πράγματι έχει παραχθεί έργο από τις δυνάμεις αυτές πάνω στο μπαλόνι. Στην περίπτωση αυτή το έργο προκαλεί αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του αερίου μέσα στο μπαλόνι.

Η ερώτηση (2) σχετίζεται επίσης με τη συζήτηση στο τμήμα που αφορούσε τον υπολογισμό του συνολικού έργου. Η συνισταμένη δύναμη πάνω στο μπαλόνι είναι μηδέν αφού το μπαλόνι παραμένει ακίνητο. Μια προσέγγιση που υπολογίζει το

συνολικό έργο μέσω της συνισταμένης δύναμης θα έδινε και πάλι αποτέλεσμα μηδέν για το έργο που παράγεται πάνω στο μπαλόνι, κάτι που όπως γνωρίζουμε είναι λανθασμένο.

Συμπέρασμα

Πολλά μπορούν να γίνουν για να αποσαφηνιστεί ο ορισμός του έργου στα σχολικά εγχειρίδια και τα μαθήματα στην τάξη έτσι ώστε να αποφευχθούν εννοιακές ασυμβατότητες και να απομακρυνθεί η ανάγκη για ύστερες διορθώσεις προηγούμενων προτάσεων και ορισμών. Είναι δυνατόν να επιλύσουμε προβλήματα φυσικής χωρίς να είναι ανάγκη να εισάγουμε επιπρόσθετες «εργοειδείς» ποσότητες και «ενεργειακού τύπου» εξισώσεις. Μια απλούστερη προσέγγιση, όχι μόνο θα επιτρέψει στους σπουδαστές να κατανοήσουν πιο εκλεπτυσμένα προβλήματα στη μηχανική, αλλά θα τους βοηθήσει να κάνουν την απαραίτητα σύνδεση ανάμεσα στη μηχανική και τη θερμοδυναμική. Στη συνέχεια αυτών των άρθρων θα συζητήσουμε για τη σύγχυση που προκαλείται από την αποτυχία να προσδιοριστεί το σωστό σύστημα όταν συζητάμε για την ενέργεια.

Ευχαριστίες

Είμαι βαθιά υποχρεωμένος στα παρακάτω άτομα που προμήθευσαν με εξαιρετικά χρήσιμο υλικό την πλήρη σειρά αυτών των άρθρων: Harry Leff, John Mallinckrodt, Ralph MacGrew, Carl Mungan, Ray Serway, and Bruce Sherwood. Σας ευχαριστώ για την προσπάθεια που κάνατε να διαβάσετε τόσο πολλές λέξεις με τόση προσοχή και περίσκεψη.

Αναφορές

1. H. Erlichson, "Work and kinetic energy for an automobile coming to a stop," *Am. J. Phys.***45**, 769 (Aug. 1977).
2. C.M. Penchina, "Pseudowork-energy principle," *Am. J. Phys.***46**, 295-296 (March 1978).
3. B.A. Sherwood, "Pseudowork and real work," *Am. J. Phys.***51**, 597-602 (July 1983).
4. A.J. Mallinckrodt and H.S. Leff, "All about work," *Am. J. Phys.***60**, 356-365 (April 1992).
5. H.S. Leff and A.J. Mallinckrodt, "Stopping objects with zero external work: Mechanics meets thermodynamics," *Am. J. Phys.***61**, 121-127 (Feb. 1993).
6. R.W. Chabay and B.A. Sherwood, "Bringing atoms into first year physics," *Am. J. Phys.***67**, 1045-1050 (Dec. 1999).
7. R.G. Jordan, "Work reworked," *Phys. Teach.***40**, 526-527 (Dec. 2002).
8. J. Wetherhold, "Work reworked problem," letter to the editor, *Phys. Teach.***41**, 260 (May 2003).
9. R. Mancuso, "Work and potential energy," letter to the editor, *Phys. Teach.***41**, 260 (May 2003).
10. R.G. Jordan, "Work reworked, author response," *Phys. Teach.***41**, 260-261 (May 2003).
11. R. Weinstock, "Work reworked-reworked," letter to the editor *Phys. Teach.***41**, 316 (Sept. 2003).
12. C.E. Mungan, "A primer on work-energy relationships for introductory physics," *Phys. Teach.***43**, 10-16 (Jan. 2005).
13. Μια και ο ίδιος είμαι συγγραφέας εγχειριδίου, δεν προσδιορίζω με ακρίβεια προβληματικές προτάσεις στα εγχειρίδια άλλων συγγραφέων σ' αυτή την σειρά των άρθρων. Δεν επιθυμώ αυτή η σειρά να φανεί σαν διαφημιστικό εργαλείο αλλά περισσότερο ως επαγγελματική επικοινωνία που προσφέρει ένα σύνολο προτάσεων για τη βελτίωση της διδασκαλίας της ενέργειας στους σπουδαστές μας. Παρουσιάζω κομμάτια από διάφορα εγχειρίδια ως γενικές κατευθύνσεις και όχι αυτούσια.
14. Πλήρεις λύσεις σ' αυτά τα δύο προβλήματα παρουσιάζονται στο «ενέργεια και ο μπερδεμένος μαθητής V: Η προσέγγιση ενέργειας/ορμής σε προβλήματα που συμπεριλαμβάνουν παραμορφώσιμα και περιστρεφόμενα αντικείμενα» του J.W. Jewett, που πρόκειται να δημοσιευθεί τον Μάιο του 2008.

15. J.W. Jewett, "Energy and the confused student II: Systems," *Phys. Teach.* To be published in Feb. 2008).
16. B.A. Sherwood and W.H. Bernard, "Work and heat transfer in the presence of sliding friction," *Am J Phys.* **52**, 1001-1007 (Nov. 1984).
17. R.P. Bauman, "Physics that textbook writers usually get wrong; I. work," *Phys Teach.* **30**, 264-269 (May 1992).
18. See, for example, R.A. Serway and J.W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 7th ed. (Brooks/Cole, Belmont CA, 2008), pp. 204-209 or R.A. Serway and J.W. Jewett, *Principles of Physics*, 4th ed. (Brooks/Cole, Belmont CA, 2006), pp. 173-177.
19. J.W. Jewett, "Energy and the confused student IV: A global approach to energy," *Phys. Teach.* To be published in April 2008).
20. Αυτή η πρόταση προϋποθέτει ότι η επιφάνεια που ασκεί τη δύναμη δεν παραμορφώνεται. Στην πράξη, η επιφάνεια θα παραμορφωθεί λίγο· το έδαφος συμπιέζεται λίγο προς τα κάτω όταν το αγόρι πηδά προς τα πάνω, τα σκαλοπάτια παραμορφώνονται λίγο προς τα κάτω όταν ο άνθρωπος ανεβαίνει, ο τοίχος κάμπτεται λίγο προς τα μέσα όταν το κορίτσι τον σπρώχνει. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, η κατεύθυνση της μετατόπισης του σημείου εφαρμογής της δύναμης είναι αντίθετη απ' αυτή της κάθετης δύναμης που ασκείται από την επιφάνεια, έτσι το έργο που εκτελείται πάνω στο αγόρι, άνθρωπο, κορίτσι ή στόκο από την επιφάνεια έχει μια μικρή αρνητική τιμή.