

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ Ο ΜΠΕΡΔΕΜΕΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ II: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

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

Η ενέργεια αποτελεί κρίσιμη έννοια για την επίλυση προβλημάτων φυσικής, συχνά όμως είναι κύρια πηγή σύγχυσης για τους σπουδαστές εάν η παρουσίασή της από τον καθηγητή ή το σχολικό βιβλίο δεν έχει γίνει με επιδέξιο τρόπο. Στο πρώτο άρθρο¹ αυτής της σειράς συζητήθηκε η σύγχυση που μπορεί να προκληθεί στους σπουδαστές από παραδοσιακούς χειρισμούς της έννοιας του έργου. Σε οποιαδήποτε διαπραγμάτευση της έννοιας του έργου, είναι σημαντικό να δηλώνεται ότι το έργο εκτελείται από μια δύναμη πάνω σ' ένα **σύστημα**. Η φρασεολογία αυτή έχει δύο σημαντικές συνιστώσες: (1) Την αναγνώριση της δύναμης που εκτελεί το έργο και (2) την αναγνώριση του **συστήματος** που είναι αποδέκτης του έργου. Ελάχιστα εγχειρίδια ή παρουσιάσεις μαθημάτων χρησιμοποιούν μια προσέγγιση βασισμένη σε συστήματα όταν αντιμετωπίζουν ένα ενεργειακό πρόβλημα. Τα δύο πρώτα βήματα στην προσέγγιση οποιουδήποτε ενεργειακού προβλήματος θα έπρεπε να είναι:

- (1) Προσδιορισμός του συστήματος
- (2) Κατηγοριοποίηση του συστήματος

Προσδιορίζοντας το σύστημα

Ένα σύστημα μπορεί να είναι οτιδήποτε από τα παρακάτω:

- Ένα μοναδικό αντικείμενο
- Δύο αντικείμενα που αλληλεπιδρούν
- Ένα σύνολο διαφορετικών αντικειμένων
- Ένα παραμορφώσιμο αντικείμενο, για παράδειγμα μια λαστιχένια μπάλα ή ένα δείγμα μορίων αερίου
- Ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο, όπως για παράδειγμα ένας τροχός
- Μια περιοχή του χώρου, πιθανώς παραμορφώσιμη, για παράδειγμα ο όγκος που καταλαμβάνει ο χώρος του κυλίνδρου πάνω από το πιστόνι της μηχανής ενός αυτοκινήτου

Στο πρώιμο στάδιο της μελέτης της ενέργειας σ' ένα τυπικό εισαγωγικό μάθημα, το υπό εξέταση σύστημα είναι συχνά ένα μοναδικό αντικείμενο. Σε μια προσέγγιση διδασκαλίας της ενέργειας βασισμένης στην έννοια του συστήματος, ωστόσο, η ιδέα του συστήματος τονίζεται ακόμα και σ' αυτό το πρώιμο στάδιο για να είναι έτοιμοι οι σπουδαστές να αντιμετωπίσουν πιο πολύπλοκες καταστάσεις τις οποίες θα συναντήσουν σύντομα.

Οποιαδήποτε μορφή και να έχει το σύστημα, υπάρχει ένα κλειστό σύνορο που περιβάλλει το σύστημα και το διαχωρίζει από οτιδήποτε βρίσκεται απ' έξω και

αποκαλείται **περιβάλλον**. Το σύνορο του συστήματος μπορεί να ταυτίζεται με μια φυσική επιφάνεια, όπως για παράδειγμα η εξωτερική επιφάνεια μιας μπάλας, αλλά αυτή η ταύτιση δεν είναι υποχρεωτική.

Για παράδειγμα θεωρείστε τη σχετικά απλή περίπτωση ενός αντικειμένου που σύρεται κατά μήκος μιας μη λείας επιφάνειας από μια δύναμη \mathbf{F} παράλληλη με την επιφάνεια. Ας υποθέσουμε ότι ζητείται από τον σπουδαστή να αναλύσει την κατάσταση με ενεργειακούς όρους καθώς το αντικείμενο σύρεται με μικρή ταχύτητα σταθερού μέτρου. Σε μια παραδοσιακή προσέγγιση, χωρίς τη χρήση της έννοιας του συστήματος, ο σπουδαστής έχει την τάση να επικεντρωθεί στο αντικείμενο, γιατί αυτό είναι ο μόνος αποδέκτης έργου για τον οποίο έχει μάθει. Στη συνέχεια είναι πολύ πιθανό να συνεχίσει με την εφαρμογή του θεωρήματος έργου-κινητικής ενέργειας $W = \Delta K$, για το αντικείμενο, γιατί αυτή είναι η μόνη ενεργειακή αρχή που έχει γνωρίσει. Αυτή η προσέγγιση έχει τέσσερα κύρια ελαττώματα. Πρώτον, όπως συζητήθηκε στο πρώτο άρθρο αυτής της σειράς, το έργο της δύναμης τριβής πάνω στο αντικείμενο δεν μπορεί να υπολογιστεί γιατί η μετατόπιση του αντικειμένου είναι διαφορετική από τις μετατοπίσεις των πολλών σημείων εφαρμογής της τριβής. Δεύτερον, η μεταβολή ΔK στην κινητική ενέργεια είναι μηδενική γιατί το όχημα σύρεται με ταχύτητα σταθερού μέτρου. Τρίτον, ενδεχομένως συμβαίνει μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στο αντικείμενο και την επιφάνεια με τη μορφή θερμότητας, η οποία δεν μπορεί να υπολογιστεί και δεν συμπεριλαμβάνεται στο θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας. Τέλος, το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας, δεν περιέχει όρο για την εσωτερική ενέργεια, η οποία είναι ένα σημαντικό τμήμα της ενέργειας που αποθηκεύεται στο πρόβλημα αυτό.

Συγκριτικά, ένας σπουδαστής που είναι εξοικειωμένος με την προσέγγιση σε προβλήματα ενέργειας με τη χρήση της έννοιας του συστήματος και τη σφαιρική (*global*) φύση της ενέργειας², θα συνειδητοποιούσε τις προηγούμενες δυσκολίες και θα ήξερε ότι είναι προτιμότερο να επιλέξει ως σύστημα το αντικείμενο **και** την επιφάνεια, με σύνορο της επιφάνειας του συστήματος που συμπεριλαμβάνει το αντικείμενο και την επιφάνεια αλλά όχι τον παράγοντα που ασκεί τη δύναμη \mathbf{F} . (Εξαιτίας της πιθανότητας μεταβίβασης ενέργειας με τη μορφή θερμότητας από την επιφάνεια στο εσωτερικό του σώματος, το σύνορο του συστήματος θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει ολόκληρο το σώμα και όχι μόνο μια δισδιάστατη επιφάνεια μηδενικού πάχους). Στην περίπτωση αυτή, η μόνη μεταβίβαση ενέργειας είναι μέσω του έργου της δύναμης \mathbf{F} πάνω στο σύστημα, και η μόνη μεταβολή στην κινητική ενέργεια του συστήματος είναι η μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας εξαιτίας της τριβής :

$$W_F = \Delta E_{\text{εσωτ}} \quad (1)$$

Υπάρχει πράγματι μια ανταλλαγή ενέργειας με θερμότητα ανάμεσα στο αντικείμενο και την επιφάνεια· αυτή η ανταλλαγή, ωστόσο, συμβαίνει στο **εσωτερικό** του συστήματος. Δεν υπάρχει τρόπος να γνωρίζουμε τις μεταβολές στην εσωτερική ενέργεια ξεχωριστά για το αντικείμενο και την επιφάνεια χωρίς να διαθέτουμε επιπλέον πληροφορίες. Χωρίς αυτές τις πληροφορίες η παραπάνω εξίσωση εκφράζει όλα όσα μπορούμε να γνωρίζουμε γι' αυτή την κατάσταση.

Κατηγοριοποιώντας το σύστημα

Αφού έχουμε προσδιορίσει το σύστημα, είναι σημαντικό να καθορίσουμε εάν το σύστημα είναι *απομονωμένο* ή *μη-απομονωμένο*. Απομονωμένο είναι ένα σύστημα για το οποίο δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας κατά μήκος των συνόρων του. Ένα μη-απομονωμένο σύστημα υπόκειται σε μεταφορά ενέργειας κατά μήκος των συνόρων του μέσω ενός ή περισσότερων μηχανισμών.

Στην περίπτωση που συζητήθηκε προηγουμένως, όπου σύρεται ένα αντικείμενο πάνω σε επιφάνεια, ας υποθέσουμε ότι προσδιορίζουμε ως σύστημα το αντικείμενο. Αυτό το σύστημα είναι ξεκάθαρα μη-απομονωμένο γιατί ενέργεια διαπερνά τα σύνορα του συστήματος με έργο που παράγει η ασκούμενη δύναμη και με θερμότητα: η τριβή κάνει το σώμα πιο ζεστό, οπότε θερμότητα ρέει από το σώμα στον αέρα και σε πιο κρύες περιοχές της επιφάνειας με τις οποίες το σώμα έρχεται σε επαφή καθώς κινείται. Την κατάσταση θα περιέπλεκε ακόμα περισσότερο η μεταφορά ενέργειας μέσω μηχανικών κυμάτων –ήχου– καθώς το αντικείμενο θρυμματίζεται πάνω στην τραχειά επιφάνεια. Αν προσδιορίσουμε ως σύστημα το αντικείμενο και την επιφάνεια, το σύστημα αυτό και πάλι δεν είναι απομονωμένο- παράγεται έργο από την εξωτερική δύναμη πάνω στο σύστημα και μεταβιβάζεται ενέργεια στον αέρα με τη μορφή θερμότητας και ήχου. Για να προσδιορίσουμε ένα απομονωμένο σύστημα σ' αυτή την περίπτωση, θα έπρεπε να συμπεριλάβουμε τον αέρα και τον παράγοντα που ασκεί τη δύναμη F , έτσι ώστε έργο, θερμότητα και ήχος να αναπαριστούν μορφές μεταφοράς ενέργειας στο εσωτερικό του συστήματος και όχι διαμέσου των συνόρων του συστήματος.

Φυσικές καταστάσεις που συμπεριλαμβάνουν την πιθανότητα μεταφοράς ενέργειας με θερμότητα, ήχο και φως είναι εν γένει πολύπλοκες γιατί μ' αυτές τις διαδικασίες η ενέργεια έχει την τάση να απλώνεται σε μεγάλες αποστάσεις. Πολλές φορές, αυτές οι μεταφορές ενέργειας θεωρούνται αμελητέες για να μπορούμε να κάνουμε προσέγγιση ενός συστήματος το οποίο να έχει λογικές διαστάσεις. Για παράδειγμα, για ένα αντικείμενο που πέφτει, η αντίσταση του αέρα συνήθως θεωρείται αμελητέα έτσι ώστε η θέρμανση του αντικειμένου εξαιτίας της *drag force* και η μεταφορά ενέργειας με θερμότητα ανάμεσα στο αντικείμενο και τον αέρα να μπορούν να αγνοηθούν. Σ' αυτή την περίπτωση εάν θεωρήσουμε σύστημα το αντικείμενο μόνο του, το σύστημα είναι μη-απομονωμένο εξαιτίας του έργου που παράγεται πάνω στο σύστημα από τη βαρυτική δύναμη. Αν θεωρήσουμε σύστημα το αντικείμενο και τη Γη, το σύστημα είναι μονωμένο- δεν υπάρχουν μεταφορές ενέργειας στα σύνορα αυτού του συστήματος.

Μόλις το σύστημα έχει προσδιοριστεί και κατηγοριοποιηθεί, εφαρμόζεται γι' αυτό η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η ίδια αρχή εφαρμόζεται για απομονωμένα και μη-απομονωμένα συστήματα. Η διαδικασία αυτή συζητείται στο τέταρτο άρθρο αυτής της σειράς.²

Εσωτερικό και εξωτερικό έργο

Ως ακόμα ένα παράδειγμα της σημασίας που έχει να προσδιορίσουμε το σύστημα, θεωρήστε μια πρόταση για τη δυναμική ενέργεια η οποία αναφέρεται σ' ένα συνηθισμένο εγχειρίδιο³ ή σε μάθημα στην τάξη:

Όταν μια συντηρητική δύναμη εκτελεί έργο W , η δυναμική ενέργεια που αντιστοιχεί στη δύναμη μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$W = -\Delta U \quad (2)$$

Μια τέτοια πρόταση δεν κάνει αναφορά στο σύστημα, ούτε στο αν η διατηρητική δύναμη είναι εσωτερική ή εξωτερική και δεν κάνει αναφορά στο αν το έργο γίνεται *πάνω* ή *στο εσωτερικό* του συστήματος. Ο ικανός σπουδαστής θα αναγνωρίσει μια αντίφαση: «Αν σηκώσω ένα βιβλίο σ' ένα ψηλότερο ράφι, κάνω θετικό έργο πάνω στο σύστημα βιβλίου-Γης και υπάρχει *αύξηση* στη βαρυτική δυναμική ενέργεια του συστήματος, όχι *μείωση*.» Για την περίπτωση αυτή μπορεί να γραφεί η παρακάτω εξίσωση:

$$W = \Delta U \quad (3)$$

όπου με U παριστάνεται η βαρυτική δυναμική ενέργεια του συστήματος βιβλίου-Γη. Κοιτώντας τις εξισώσεις (2) και (3) ο σπουδαστής είναι πιθανό να μπερδευτεί για την παρουσία του προσήμου (-) στη μία εξίσωση και όχι στην άλλη. Είναι κρίσιμο σ' αυτή την περίπτωση να συζητήσουμε με τους σπουδαστές ότι ***τα έργα στο αριστερό μέλος των δύο εξισώσεων δεν είναι ίδια***. Στην εξίσωση (3) το έργο W αντιπροσωπεύει το έργο που εκτελείται ***πάνω στο σύστημα*** από το περιβάλλον και αντιπροσωπεύει την ενέργεια που διαπερνά τα σύνορα του συστήματος. Μπορούμε λοιπόν να το θεωρήσουμε ***εξωτερικό*** έργο γιατί έχει να κάνει με επίδραση στο σύστημα απ' έξω.

Στην εξίσωση (2), το έργο W είναι έργο που παράγεται ***εσωτερικά*** στο σύστημα από ένα μέλος του συστήματος πάνω σ' ένα άλλο. Στην περίπτωση ενός βιβλίου που πέφτει, όπως περιγράφεται από την εξίσωση (2), W είναι το έργο που παράγεται από τη βαρυτική δύναμη που ασκείται από τη Γη πάνω στο βιβλίο, έργο εσωτερικό για το σύστημα βιβλίο-Γη. Θα συμβουλευάμε με επιμονή να χρησιμοποιούνται διαφορετικά σύμβολα⁴ για το έργο στις εξισώσεις (2) και (3) ώστε να δίνεται έμφαση στη διαφορά ανάμεσά τους.

Η εξίσωση (3) εμφανίζεται σπανιότερα από την εξίσωση (2) και σε ελάχιστες περιπτώσεις γίνεται σύγκριση ανάμεσα στις δύο εξισώσεις. Η εξίσωση (3) ωστόσο είναι σημαντική, γιατί είναι ανάλογη με το θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας, $W = \Delta K$. Στο θεώρημα έργου-κινητικής ενέργειας, ενέργεια μεταφέρεται σ' ένα σύστημα μέσω έργου και το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της κινητικής ενέργειας του συστήματος. Η εξίσωση (3) αναπαριστάνει μια ανάλογη κατάσταση στην οποία ενέργεια μεταφέρεται σ' ένα σύστημα μέσω έργου και το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της δυναμικής ενέργειας του συστήματος.

Όταν συσχετίζουμε συντηρητικές δυνάμεις με δυναμική ενέργεια, είναι σημαντικό να επισημαίνουμε ότι η συντηρητική δύναμη δρα ***μεταξύ μελών του συστήματος και το έργο είναι εσωτερικό στο σύστημα***. Μια πλήρης και καλύτερη πρόταση απ' αυτήν που σχετίζεται με την εξίσωση (2) πιο πάνω είναι η εξής:

Θεωρείστε ένα σύστημα στο οποίο μια συντηρητική δύναμη δρα μεταξύ μελών του συστήματος. Αν ένα μέλος του συστήματος μετακινείται έτσι ώστε το σημείο εφαρμογής της συντηρητικής δύναμης να μετατοπίζεται και έργο $W_{\text{συντ}}$ να παράγεται πάνω του από τη συντηρητική δύναμη, η αντίστοιχη δυναμική ενέργεια του συστήματος μεταβάλλεται κατά

$$W_{\text{συντ}} = -\Delta U. \quad (4)$$

Ο Barrow⁵ δηλώνει, «ο όρος ‘έργο’ μπορεί να θεωρηθεί ένα στήριγμα που ανοίγει τον δρόμο για την κατοπινή εισαγωγή της δυναμικής ενέργειας... Σε όλα τα προβλήματα της μηχανικής που ακολουθούν, το ‘έργο’ εγκαταλείπεται και χρησιμοποιούνται η δυναμική και η κινητική ενέργεια.» Η πρόταση αυτή φαίνεται να συγγεί το εσωτερικό και το εξωτερικό έργο. Ενώ το εσωτερικό έργο μέσα σ’ ένα σύστημα πράγματι σχετίζεται με μια μεταβολή στη δυναμική ενέργεια του συστήματος, το εξωτερικό έργο μπορεί να συσχετιστεί με μεταβολή οποιασδήποτε ενέργειας στο σύστημα – κινητικής (το θεώρημα έργου- κιν. ενέργειας), δυναμικής (ανύψωση βιβλίου σε ράφι) ή εσωτερικής (τρίβουμε τα χέρια μας μεταξύ τους). Έτσι, στη μέθοδο της ενέργειας με τη χρήση της έννοιας του συστήματος, το έργο σίγουρα δεν εγκαταλείπεται αλλά γίνεται μια σημαντική διάκριση ανάμεσα σε εσωτερικό και εξωτερικό έργο σ’ ένα σύστημα.

Πολλαπλά συστήματα

Ένα δοσμένο πρόβλημα μπορεί να περιλαμβάνει διαφορετικά συστήματα για διαφορετικά τμήματα της επίλυσης. Για παράδειγμα, θεωρήστε το συνηθισμένο παράδειγμα όπλου-ελατηρίου στο πείραμα του βαλλιστικού εκκρεμούς που γίνεται σε αρκετά εισαγωγικά εργαστηριακά μαθήματα.⁶ Η ανάλυση αυτής της διάταξης περιλαμβάνει *τρία* διαφορετικά συστήματα. Το πρώτο σύστημα είναι το ελατήριο και το βλήμα που εκτοξεύεται από το όπλο. Αυτό το απομονωμένο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συσχετίσουμε την ταχύτητα του βλήματος με τη συμπίεση του ελατηρίου μέσω της διατήρησης της μηχανικής ενέργειας. Το δεύτερο σύστημα είναι το βλήμα με το εκκρεμές. Σ’ αυτό το απομονωμένο σύστημα εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ορμής μπορούμε να προσδιορίσουμε από την ταχύτητα του βλήματος πριν την κρούση την τελική ταχύτητα του συσσωματώματος. Τέλος η αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί για το απομονωμένο σύστημα βλήμα-Γη-εκκρεμές για να συσχετίσουμε την τελική ταχύτητα του συσσωματώματος αμέσως μετά την κρούση με το τελικό ύψος στο οποίο θα φτάσει το κέντρο μάζας του συσσωματώματος.

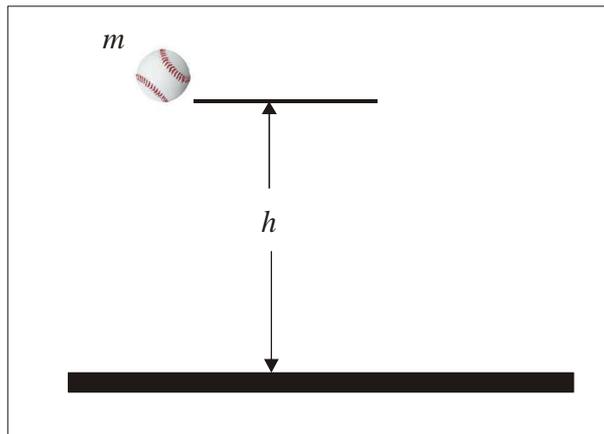
Ο Keeperts⁷ πραγματεύεται την περίπτωση ενός μπαλονιού με ήλιο, περιγράφοντας την έκπληξη που εκφράζουν οι σπουδαστές όταν συνειδητοποιούν ότι η δυναμική ενέργεια ελαττώνεται καθώς το μπαλόνι ανεβαίνει προς τα πάνω στον αέρα. Στην θεώρηση αυτή, η λέξη *σύστημα* δεν αναφέρεται ποτέ και η δυναμική ενέργεια πάντοτε αναφέρεται ως αυτή «του μπαλονιού»⁸. Πράγματι η εξίσωσή του (6), $U=(mg-\rho Vg)y$, υποτίθεται ότι εκφράζει τη δυναμική ενέργεια «του μπαλονιού» ως συνδυασμό αυτής που σχετίζεται με τη βαρυτική δύναμη και αυτής που σχετίζεται με την άνωση. Η εξίσωση, ωστόσο, αναμειγνύει δύο διαφορετικά συστήματα. Η δυναμική ενέργεια που σχετίζεται με τη βαρυτική δύναμη ανήκει στο σύστημα μπαλόνι-Γη. Η δυναμική ενέργεια που σχετίζεται με τη δύναμη της άνωσης ανήκει στο σύστημα μπαλόνι-αέρας. Εάν στην πραγμάτευση οριζόταν ως σύστημα το μπαλόνι-Γη-αέρας η εξίσωση θα μπορούσε να είναι σωστή. Γι’ αυτό το σύστημα, ωστόσο, η συνισταμένη δύναμη ανάμεσα στο μπαλόνι και το σύστημα Γη-αέρας είναι απωστική δύναμη. Το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ένα απομονωμένο σύστημα με δύο παράγοντες οι οποίοι αλληλοαπωθούνται. Έτσι, η ελάττωση της δυναμικής ενέργειας του συστήματος καθώς το μπαλόνι ανεβαίνει δεν προκαλεί μεγαλύτερη έκπληξη από ένα σύστημα δύο πρωτονίων που απομακρύνονται λόγω της απωστικής δύναμης ανάμεσά τους. Αντί να παρουσιάζεται αυτό το παράδειγμα σαν έκπληξη, θα ήταν πολύ χρήσιμο να αναγνωριστεί η ευκαιρία για μοντελοποίηση και παρουσίαση

της παραπάνω πραγμάτευσης ώστε να καταδειχτούν οι παραλληλίες ανάμεσα σε δύο διαφορετικά συστήματα (πρωτόνιο και πρωτόνιο, Γη-αέρας και μπαλόνι) που μπορούν και τα δύο να αναλυθούν ως ζεύγη απωθούμενων αντικειμένων.

Προβλήματα

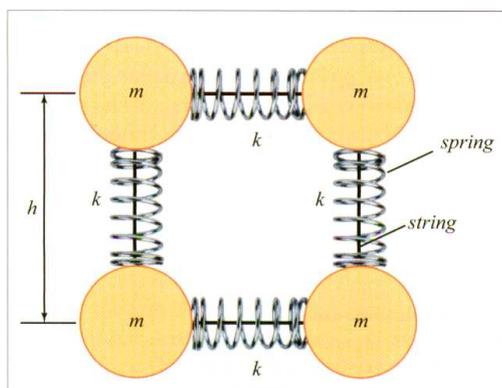
Θεωρήστε τα δύο παρακάτω προβλήματα:

1. Μια μπάλα μάζας m αφήνεται από ύψος h πάνω από την επιφάνεια της Γης (σχήμα 1), και η αντίσταση του αέρα θεωρείται αμελητέα. Ποιο είναι το μέτρο της ταχύτητας με την οποία θα χτυπήσει στη Γη;



Σχ. 1. Μία μπάλα μάζας m αφήνεται από ύψος h . Πόσο γρήγορα κινείται όταν χτυπάει τη Γη;

2. Κάθε μία από τέσσερις μικρές σφαίρες έχει μάζα m . Ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι διαδοχικών σφαιρών υπάρχει συμπιεσμένο ελατήριο με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα τετράγωνο πλευράς h (σχήμα 2). Τα ελατήρια είναι όμοια, έχουν σταθερά k και αμελητέα μάζα και δεν είναι δεμένα στις σφαίρες. Οι σφαίρες είναι δεμένες με ελαφρά νήματα που διέρχονται από τους άξονες των ελατηρίων. Η όλη διάταξη βρίσκεται σε περιοχή που είναι έξω από πεδία βαρύτητας. Τα τέσσερα νήματα κόβονται ταυτόχρονα έτσι ώστε οι σφαίρες να απωθούνται από τα ελατήρια και να απομακρύνονται. Ποιο είναι το μέτρο της ταχύτητας με την οποία κινούνται οι σφαίρες όταν πάνε να βρίσκονται σε επαφή με τα ελατήρια;



Σχ. 2 Τέσσερις σφαίρες μάζας m συνδέονται με νήματα και σχηματίζουν τετράγωνο πλευράς h . Όμοια ελατήρια είναι συμπιεσμένα μεταξύ κάθε ζεύγους σφαιρών. Όταν κοπούν τα νήματα, οι σφαίρες αρχίζουν να απομακρύνονται. Πόσο γρήγορα κινούνται οι σφαίρες όταν χαθεί η επαφή με τα ελατήρια;

Είναι τα δύο αυτά προβλήματα θεμελιωδώς διαφορετικά; Ένας σπουδαστής που δεν είναι εξοικειωμένος με την προσέγγιση με χρήση συστήματος ίσως είναι ικανός να χρησιμοποιήσει τη συνήθη αλλά ακατάλληλη μέθοδο του «θέτουμε mgh ίσο με $1/2m \cdot u^2$ » για να λύσει το πρώτο πρόβλημα, αλλά το δεύτερο θα τον φέρει σε αμηχανία. Το δεύτερο πρόβλημα περιλαμβάνει πολλαπλές κινητικές ενέργειες και πολλαπλές δυναμικές ενέργειες· η επίλυση απαιτεί εξοικείωση με την ενέργεια ενός συστήματος μάλλον, απ' ό,τι απλώς με την ενέργεια ενός αντικειμένου.

Ο σπουδαστής που έχει μάθει την προσέγγιση με τη χρήση συστήματος θα ξεκινήσει με τα ίδια βήματα και για τα δύο προβλήματα. Για το πρόβλημα 1, προσδιορίζουμε ως σύστημα τη μπάλα και τη Γη. Είναι ένα απομονωμένο σύστημα στο οποίο δεν δρουν μη συντηρητικές δυνάμεις, έτσι μπορούμε να γράψουμε μια εξίσωση για τη διατήρηση της μηχανικής ενέργειας:

$$\Delta K + \Delta U_{\beta\alpha\rho} = 0 \quad (5)$$

όπου με $U_{\beta\alpha\rho}$ συμβολίζουμε τη βαρυτική δυναμική ενέργεια.

Για το πρόβλημα 2, προσδιορίζουμε ως σύστημα τις τέσσερις σφαίρες και τα τέσσερα ελατήρια. Είναι επίσης ένα απομονωμένο σύστημα, στο οποίο δεν δρουν μη συντηρητικές δυνάμεις, έτσι μπορούμε να γράψουμε μια εξίσωση για τη διατήρηση της μηχανικής ενέργειας:

$$\Delta K + \Delta U_{\epsilon\lambda} = 0 \quad (6)$$

Όπου με $U_{\epsilon\lambda}$ συμβολίζουμε την ελαστική δυναμική ενέργεια. Ο τρόπος που προσεγγίζουμε τα δύο προβλήματα είναι ίδιος, μόνο ο υπολογισμός των ενεργειών είναι διαφορετικός. Τα προβλήματα αυτά θα λυθούν πλήρως στο τέταρτο άρθρο² της σειράς.

Για να γίνουν ξεκάθαρα όσα πραγματευόμαστε εδώ, σκεφτείτε την παρακάτω ερώτηση του τύπου σωστό-λάθος η οποία σχετίζεται με το σώμα που θεωρήσαμε νωρίτερα ότι κινείται πάνω σε μια επιφάνεια:

Σωστό ή λάθος; Ένα αντικείμενο σύρεται πάνω στην επιφάνεια ενός τραπέζιού με σταθερή ταχύτητα κάτω από την επίδραση δύναμης παράλληλης με την επιφάνεια. Επειδή το σώμα είναι σε ισορροπία, η δύναμη τριβής έχει το ίδιο μέτρο με την ασκούμενη δύναμη. Έτσι το έργο που εκτελείται πάνω στο σώμα από τη δύναμη τριβής είναι ίσο κατ' απόλυτη τιμή με αυτό που παράγεται από την ασκούμενη δύναμη. Το συνολικό έργο που παράγεται απ' όλες τις δυνάμεις είναι μηδενικό.

Το επιχείρημα αυτό είναι πειρασμός για πολλούς σπουδαστές αλλά, όπως συζητήθηκε από τους Sherwood και Bernard⁹ καθώς και από τους Chabay και Sherwood,¹⁰ είναι λανθασμένο. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος σχετίζεται με τον ορισμό του έργου όπως συζητήθηκε στο πρώτο άρθρο αυτής της σειράς.¹ Αν και η ασκούμενη δύναμη και η τριβή έχουν ίσα μέτρα, η μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της ασκούμενης δύναμης δεν είναι ίδια με τις πολλές μετατοπίσεις των σημείων εφαρμογής της δύναμης τριβής πάνω σ' ένα μεγάλο αριθμό σημείων επαφής. Έτσι τα έργα των δύο δυνάμεων δεν έχουν το ίδιο μέτρο και δεν αναιρεί το ένα το άλλο.

Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με μια προσεκτική προσέγγιση ανάλυσης της ενέργειας με τη χρήση της έννοιας του συστήματος. Ας προσδιορίσουμε ως σύστημα το αντικείμενο. Αν ισχυριστούμε ότι το συνολικό έργο όλων των δυνάμεων πάνω στο σώμα είναι μηδενικό, και δεν υπάρχει άλλη μεταβίβαση ενέργειας στο σύστημα, τότε η ενέργεια του συστήματος πρέπει να παραμένει σταθερή. Η κινητική ενέργεια του συστήματος πράγματι παραμένει σταθερή γιατί κινείται με ταχύτητα σταθερού μέτρου. Αλλά, από την εμπειρία μας γνωρίζουμε ότι σύροντας ένα αντικείμενο πάνω σε μια επιφάνεια το κάνουμε πιο ζεστό – η εσωτερική του ενέργεια αυξάνεται. Εάν το έργο πάνω στο σώμα ήταν μηδενικό, δεν θα υπήρχε πηγή γι’ αυτή την αυξημένη εσωτερική ενέργεια.

Συμπέρασμα

Παρουσιάσαμε διάφορες περιπτώσεις στις οποίες είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε το σύστημα που εξετάζουμε και να προσεγγίσουμε το πρόβλημα με ενεργειακή μέθοδο. Αποτυχία σ’ αυτό οδηγεί σε σφάλματα και παρανοήσεις. Ως καθηγητές φυσικής έχουμε την υποχρέωση να πείσουμε τους σπουδαστές μας για τη σπουδαιότητα τού να προσδιορίσουμε και να κατηγοριοποιήσουμε το σύστημα όταν ακολουθούμε μια ενεργειακή μέθοδο για να επιλύσουμε ένα πρόβλημα. Στο επόμενο τμήμα αυτής της σειράς, θα εξετάσουμε τη σύγχυση που προκαλείται από την απρόσεκτη χρήση της γλώσσας όταν ασχολούμαστε με την ενέργεια.

Αναφορές

1. J.W. Jewett, “Energy and the confused student I: Work,” *Phys. Teach.* 46,38-43 (Jan. 2008).
2. J.W. Jewett, “Energy and the confused student IV: A global approach to energy,” *Phys. Teach.* To be published in April 2008.
3. 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.
4. Δες, για παράδειγμα, R.A. Serway and J.W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 7th ed. (Brooks/Cole, Belmont CA, 2008), Chap. 7 στο οποίο το W χρησιμοποιείται για την εξ. (3) και το W_C (δείκτης για το *conservative force*) για την εξ. (2). Δες επίσης R.W. Chabay and B.A. Sherwood, *Matter and interactions I: Modern Mechanics*, 2nd ed. (Wiley, Hoboken, NJ, 2007), Chap. 5, στο οποίο W_{surr} (*surroundings*) χρησιμοποιείται για την εξ. (3) και W_{int} (*internal*) για την εξ. (2).
5. G.M. Barrow, “Thermodynamics should be built on energy-not on heat and work,” *J.Chem. Educ.* 65(2), 122-125 (Feb. 1988).
6. Δες, για παράδειγμα, R.A. Serway and J.W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 7th ed. (Brooks/Cole, Belmont CA, 2008), pp. 239-240.
7. D. Keepports, “How does the potential energy of a rising helium-filled ballon change?” *Phys. Teach.* 40, 164-165 (March 2002).
8. Αυτή η παραπλανητική έκφραση για τη δυναμική ενέργεια θα συζητηθεί στο J.W. Jewett, “Energy and the confused student III: Language,” *Phys. Teach.* To be published in March 2008.
9. 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).
10. R.W. Chabay and B.A. Sherwood, *Matter and interactions I: Modern Mechanics*, 2nd ed. (Wiley, Hoboken, NJ, 2007), pp. 291-293.