

Μέρος I

Η Σχέση Δύναμης-Κίνησης

Από το πρωτοποριακό έργο του Αριστοτέλη (384-322 π.Χ.), του Borelli (1608-1679), του Marey (1830-1904), του Sherrington (1857-1952) και του Bernstein (1896-1996), γνωρίζουμε ότι η κίνηση περιορίζεται από τους νόμους της φυσικής. Συνεπώς, η μελέτη της ανθρώπινης κίνησης πρέπει να περιλαμβάνει μια εκτίμηση των περιορισμών που επιβάλλονται στο σώμα από το περιβάλλον του. Παρόλο που το κείμενο αυτό αφορά κυρίως στον έλεγχο της κίνησης από το νευρικό σύστημα, το θεμέλιό του είναι οι αρχές της μηχανικής. Όπως παρουσιάστηκε στην πρώτη έκδοση αυτού του βιβλίου (1988), μια τέτοια προσέγγιση είναι γνωστή ως **νευρομηχανική**.

Το Μέρος I περιγράφει τη μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ του κόσμου μέσα στον οποίον συμβαίνει η κίνηση και των τμημάτων του σώματος που κινούνται. Η συζήτηση περιλαμβάνει μια εισαγωγή στους όρους και στις έννοιες που χρησιμοποιούνται συνήθως για να περιγράψουν την κίνηση, μια εισαγωγή στις διάφορες δυνάμεις που επιτρέπουν την ανθρώπινη κίνηση

και παραδείγματα των εμβιομηχανικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της κίνησης.

Στόχοι

Ο σκοπός αυτού του κειμένου είναι να περιγράψει τις κινήσεις που εκτελούμε ως αλληλεπίδραση του ανθρώπινου σώματος με τον κόσμο μέσα στον οποίο ζούμε. Στο μέρος I, ο σκοπός είναι να καθοριστεί η **εμβιομηχανική** της ανθρώπινης κίνησης. Οι συγκεκριμένοι στόχοι είναι

- η περιγραφή της κίνησης από την άποψη της μηχανικής,
- ο ορισμός της δύναμης,
- η εξέταση των δυνάμεων που παράγουν κίνηση,
- η παρουσίαση των εμβιομηχανικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της κίνησης και
- η εξέταση της εμβιομηχανικής των θεμελιωδών ανθρώπινων κινήσεων.

Περιγραφή της Κίνησης

Η ακριβής και σαφής περιγραφή της ανθρώπινης κίνησης απαιτεί τη χρήση των όρων *θέση*, *ταχύτητα* και *επιτάχυνση*. Αυτή η περιγραφή της κίνησης, που αγνοεί τα αίτια της κίνησης, είναι γνωστή ως κινηματική περιγραφή. Αν και αυτοί οι κινηματικοί όροι χρησιμοποιούνται συχνά στην καθημερινή γλώσσα, η επιστημονική περιγραφή της κίνησης απαιτεί να χρησιμοποιούμε τους αυστηρούς ορισμούς αυτών των όρων της κίνησης. Για να τονίσουμε την ανάγκη να είμαστε ακριβείς, θα συζητήσουμε πρώτα τα βασικά στοιχεία της μέτρησης των φυσικών μεγεθών.

Κανόνες Μέτρησης

Χρησιμοποιούμε το διεθνές μετρικό σύστημα γνωστό ως σύστημα SI (Le Système Internationale d'Unites). Περιλαμβάνει επτά ανεξάρτητες θεμελιώδεις μονάδες, από τις οποίες προέρχονται όλες οι άλλες μονάδες μέτρησης (παράρτημα Α).

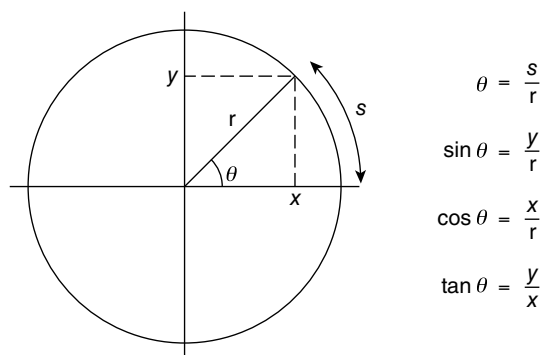
Σύστημα SI

Στο μέρος I εστιάζουμε στις θεμελιώδεις ποσότητες μήκους, μάζας, χρόνου και των παραγώγων τους. Το **μήκος** μετράται σε **μέτρα** (m), με 1 m να ορίζεται ως το μήκος της διαδρομής που διανύεται από το φως σε κενό κατά τη διάρκεια χρονικού διαστήματος $1 / 299.792.458$ του δευτερολέπτου. Η **μάζα** μετριέται σε **χιλιόγραμμα** (kg), με 1 kg να ορίζεται ως η ποσότητα της ύλης που περιέχεται στο πρότυπο που φυλάσσεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών των Σεβρών, στη Γαλλία. Ο **χρόνος** μετράται σε δευτερόλεπτα (s), με 1 s να καθορίζεται από ένα ατομικό ρολόι ως η διάρκεια $9.192.631.770$ περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ δύο επι-

πέδων της κατάστασης ελάχιστης ενέργειας του ατόμου του κασίου-133.

Εκτός από τις επτά θεμελιώδεις μονάδες μέτρησης (παράρτημα Α), υπάρχει και μια συμπληρωματική μονάδα μέτρησης της γωνίας, το **ακτίνιο** (rad). Μια γωνία (θ) είναι ίση με 1 rad ($\sim 57,3^\circ$), όταν ο λόγος του μήκους του τόξου (s) προς την ακτίνα ενός κύκλου (R) έχει την τιμή 1 (**σχήμα 1.1**). Ως λόγος δύο μηκών, το ακτίνιο είναι μια αδιάστατη ποσότητα. Για να εξοικειωθείτε με τις μετρήσεις γωνιών σε ακτίνια, παρατηρήστε ότι μια ορθή γωνία είναι ίση με 1,57 rad, η άρθρωση του αγκώνα είναι υπό γωνία 3,14 rad όταν ο βραχίονας είναι εκτεταμένος και ένας πλήρης κύκλος είναι 2π rad.

Επειδή οι αριθμοί που κυμαίνονται από 0,1 έως 9999 είναι εύχρηστοι, μπορούν να προσαρτηθούν στις μονάδες μέτρησης προθέματα (**πίνακας 1.1**) που αντιπροσωπεύουν μια μικρότερη ή μεγαλύτερη ποσότητα της μονάδας. Το μήκος του μαραθώνιου δρόμου (26 μίλια, 385 yd), για παράδειγμα, μπορεί να εκφραστεί ως 42,4 km αντί για 42.400 m. Το πρόθεμα kilo (k) αντιπροσωπεύει το



Σχήμα 1.1 Ορισμός του ακτινίου.

1.000 και 1 km = 1.000 m. Παρομοίως, τα προθέματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικρές αποστάσεις. Για παράδειγμα, η διάμετρος μιας μυϊκής ίνας εκφράζεται καταλληλότερα σε μικρόμετρα (μm, 1μm = 0,000001 m), με συνηθισμένη τιμή 55 μm.

Αλλαγή Μονάδων

Μερικές φορές είναι απαραίτητο να μετατρέψουμε τη μονάδα μέτρησης από κάποιο άλλο σύστημα (π.χ. Αγγλικές μονάδες) σε μια μονάδα SI. Το παράρτημα Α απαριθμεί τις μονάδες SI και ορισμένους κοινούς συντελεστές μετατροπής. Για να μετατρέψετε μια ποσότητα από ένα σύστημα μέτρησης σε κάποιο άλλο, γράψτε την απαιτούμενη έκφραση και απαλείψτε τις μονάδες για να πάρετε την επιδιωκόμενη μονάδα μέτρησης. Για παράδειγμα, για να μετατρέψετε το ύψος σας (π.χ. 5 ft 8 in.) σε μονάδες SI, πολλαπλασιάστε το ύψος σας (68 in.) με την αναλογία μεταξύ ιντσών και μέτρων:

$$(68 \text{ in.}) \cdot \left(\frac{0.0254 \text{ m}}{1 \text{ in.}} \right) = 1.73 \text{ m}$$

Ομοίως, για να μετατρέψετε την ταχύτητα από μίλια ανά ώρα (mph) σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m / s), μετατρέψτε τις ώρες σε δευτερόλεπτα και τα μίλια σε μέτρα πολλαπλασιάζοντας με τους κατάλληλους συντελεστές μετατροπής ως εξής:

$$(65 \text{ mph}) \cdot \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \cdot \left(\frac{1609 \text{ m}}{1 \text{ mile}} \right) = 29.1 \text{ m/s}$$

Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτών των διαδικασιών είναι ότι είναι λιγότερο πιθανό να αντιστρέψετε έναν συντελεστή μετατροπής εάν δώσετε προσοχή στην απαλοιφή των μονάδων. Για να εξοικειωθείτε με τις μονάδες SI, μπορείτε να απομνημονεύσετε κάποια μεγέθη αναφοράς, όπως το ύψος (m), η μάζα (kg) και το βάρος (N) σας, αντί να απομνημονεύσετε τους συντελεστές μετατροπής. Ομοίως, για να κρίνετε αν μια κίνηση

Πίνακας 1.1

Προθέματα που Χρησιμοποιούνται με τις Μονάδες Μέτρησης SI

Πρόθεμα	Σύμβολο	Δύναμη
γιοττα	Y	1.000.000.000.000.000.000.000.000 = 10 ²⁴
ζεττα	Z	1.000.000.000.000.000.000.000 = 10 ²¹
εξα	E	1.000.000.000.000.000.000 = 10 ¹⁸
πετα	P	1.000.000.000.000.000 = 10 ¹⁵
τερα	T	1,000,000,000,000 = 10 ¹²
γίγα	G	1.000.000.000 = 10 ⁹
μεγα	M	1.000.000 = 10 ⁶
χίλιο	k	1.000 = 10 ³
εκατο	h	100 = 10 ²
δεκα	da	10 = 10 ¹
-	-	1 = 10 ⁰
δεκατο	d	0,1 = 10 ⁻¹
εκατοστο	c	0,01 = 10 ⁻²
χίλιοστο	m	0,001 = 10 ⁻³
μικρο	μ	0,000001 = 10 ⁻⁶
νανο	n	0,000000001 = 10 ⁻⁹
πικο	p	0,000000000.001 = 10 ⁻¹²
φεμτο	f	0,0000000000000001 = 10 ⁻¹⁵
αττο	a	0,0000000000000000001 = 10 ⁻¹⁸
ζεπτο	z	0,0000000000000000000001 = 10 ⁻²¹
γιοκτο	y	0,0000000000000000000000001 = 10 ⁻²⁴

προς την οποία συνέβη. Η **ταχύτητα** είναι απλά το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας και δεν δείχνει την κατεύθυνση της μετατόπισης. Επειδή η μετατόπιση αναφέρεται σε μια αλλαγή στη θέση, η διανυσματική ταχύτητα μπορεί να περιγραφεί ως ο ρυθμός μεταβολής (παράγωγος) της μετατόπισης. Στην ορολογία του λογισμού στα μαθηματικά, η διανυσματική ταχύτητα είναι η παράγωγος της θέσης ως προς τον χρόνο.

Το **σχήμα 1.2** δείχνει την κάθετη θέση ενός αντικειμένου πάνω από κάποια τιμή αναφοράς σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Το σχήμα υποδεικνύει ότι το αντικείμενο μετατοπίστηκε κατά 2 m κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 3 s με μέση διανυσματική ταχύτητα 0,67 m / s κατά τη μετακίνηση από τη θέση 1 στη θέση 2, όπου m / s σημαίνει μέτρα ανά δευτερόλεπτο (αυτή η μονάδα μέτρησης μπορεί επίσης να εκφραστεί ως $m \cdot s^{-1}$). Πιο συγκεκριμένα,

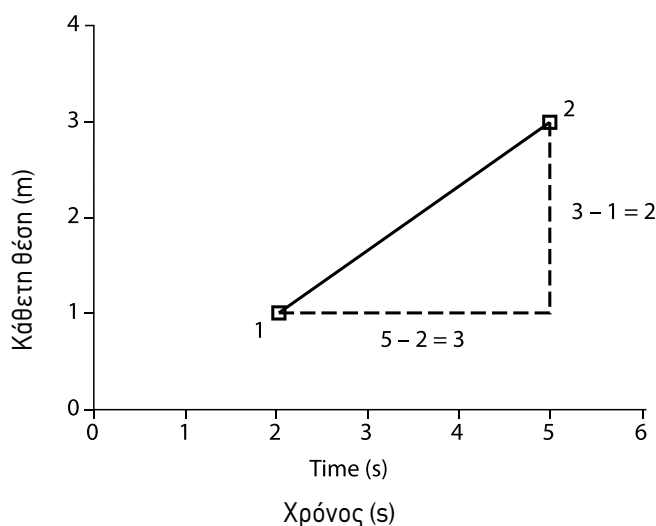
$$\text{Διανυσματική ταχύτητα} = \frac{\Delta \text{θέσης}}{\Delta \text{χρόνου}} \quad (1.1)$$

όπου το Δ (δέλτα) υποδεικνύει την αλλαγή σε κάθε μεταβλητή. Γραφικά, η ταχύτητα αναφέρεται στην κλίση της γραμμής στη γραφική παράσταση θέσης-χρόνου. Επειδή μια γραφική παράσταση (όπως αυτή στο **σχήμα 1.2**) δείχνει τη σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, μια αλλαγή στην κλίση της γραμμής, καθώς γίνεται περισσότερο ή λιγότερο απότομη, δείχνει μια αλλαγή στη σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Προσδιορίζουμε την κλίση

της γραμμής αριθμητικά αφαιρώντας μια τιμή αρχικής θέσης από την τελική θέση (Δ θέσης) και διαιρώντας την αλλαγή στη θέση (μετατόπιση) με το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για να συμβεί η αλλαγή (Δ χρόνου). Η κλίση, επομένως, αναφέρεται στον ρυθμό μεταβολής μιας μεταβλητής: Όσο πιο απότομη είναι η κλίση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταβολής. Αντίστροφα, όσο μικρότερη είναι η κλίση, τόσο πιο αργός είναι ο ρυθμός μεταβολής.

Πολλές έννοιες σε αυτό το βιβλίο παρουσιάζονται με τη μορφή γραφικών παραστάσεων που δείχνουν τη σχέση μεταξύ των επιλεγμένων μεταβλητών. Το **σχήμα 1.2** δείχνει τη σχέση μεταξύ θέσης και χρόνου. Η σχέση αντιπροσωπεύεται από τη γραμμή ή τα σημεία δεδομένων που σχεδιάζονται στη γραφική παράσταση. Ο κύριος σκοπός μιας γραφικής παράστασης είναι να δείξει την τάση ή το μοτίβο της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Τα ακριβέστερα ποσοτικά δεδομένα παρουσιάζονται ως πίνακες ή σύνολα αριθμητικών τιμών. Για να ερμηνεύσετε μια γραφική παράσταση, προσδιορίστε πρώτα τις μεταβλητές που αναγράφονται στους άξονες και στη συνέχεια εξετάστε τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Η σχέση μεταξύ θέσης και χρόνου στο σχήμα 1.2 είναι σχετικά απλή και μπορεί να υποδειχθεί από μία μόνο μέτρηση, την κλίση της γραμμής.

Η μετατόπιση ενός αντικειμένου μπορεί να ποικίλει τόσο σε μέγεθος όσο και σε κατεύθυνση. Το **σχήμα 1.3A** δείχνει την κατακόρυφη θέση ενός αντικειμένου σε πέντε χρονικές στιγμές. Η



Σχήμα 1.2 Γραφική παράσταση θέσης-χρόνου.

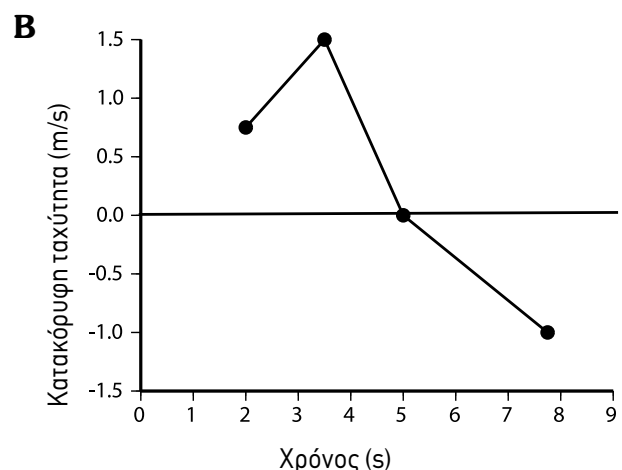
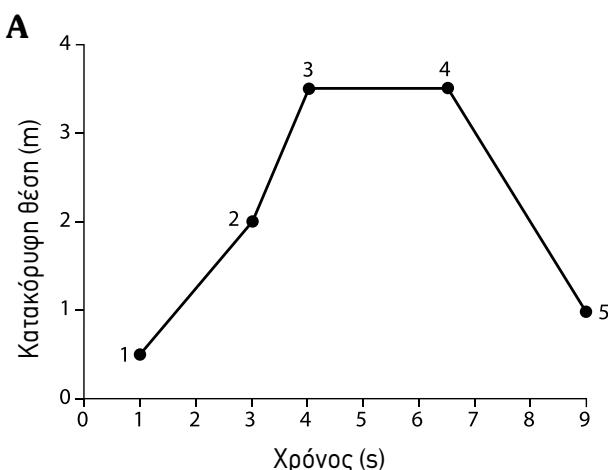
μέση διανυσματική ταχύτητα για κάθε μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση 1.1: από τη θέση 1 έως τη θέση 2 = 0,75 m / s, από τη θέση 2 έως τη θέση 3 = 1,5 m / s, από τη θέση 3 έως τη θέση 4 = 0 m / s και από τη θέση 4 έως τη θέση 5 = -1,0 m/s. Αυτές οι τιμές απεικονίζονται γραφικά στο **σχήμα 1.3B**. Η μέση διανυσματική ταχύτητα αυξάνει με την αύξηση της κλίσης στη γραφική παράσταση θέσης-χρόνου (σχήμα 1.3α), για παράδειγμα 1,5 m / s από τη θέση 2 έως τη θέση 3 έναντι 0,75 m / s από τη θέση 1 έως τη θέση 2. Μια αλλαγή στην κατεύθυνση της μετατόπισης υποδεικνύεται από μια διαφορά στην κλίση της γραμμής μεταξύ δύο θέσεων. Η κλίση προς τα κάτω από τη θέση 4 έως τη θέση 5 δείχνει μία κατακόρυφη μετατόπιση προς τα κάτω και υποδεικνύεται ως αρνητική διανυσματική ταχύτητα στο σχήμα 1.3β. Αντίστροφα, η απουσία αλλαγής θέσης (π.χ. από τη θέση 3 έως τη θέση 4) αντιστοιχεί σε μηδενική διανυσματική ταχύτητα. Αυτό το παράδειγμα υπογραμμίζει ένα σημαντικό σημείο σχετικά με τη διανυσματική ταχύτητα: Όταν αλλάζει το πρόσημο της τιμής της ταχύτητας (θετική, αρνητική ή μηδενική), η κίνηση έχει αλλάξει κατεύθυνση. Επιπλέον, όταν αλλάζει η κατεύθυνση της κίνησης, η γραφική παράσταση ταχύτητας-χρόνου πρέπει να διέλθει από το μηδέν. Το **σχήμα 1.3B** δείχνει ότι ένα αντικείμενο αρχικά κινήθηκε προς μία κατεύθυνση (που ονομάζεται αυθαίρετα θετική κατεύθυνση-σημειώστε τη θετική κλίση στο σχήμα 1.3α), στη συνέχεια ήταν ακίνητο (μηδενική ταχύτητα) και τελικά κινήθηκε προς

την άλλη κατεύθυνση (αρνητική κλίση).

Δεν αρκεί να περιγράψουμε την κίνηση μόνο από άποψη μετατόπισης και διανυσματικής ταχύτητας. Για παράδειγμα, η διανυσματική ταχύτητα δεν είναι σταθερή όταν μια μπάλα που βρίσκεται σε απόσταση 1,23 m πάνω από το έδαφος πέφτει και φτάνει στο έδαφος 0,5 s αργότερα. Η αλλαγή στη θέση είναι 1,23 m και η μέση διανυσματική ταχύτητα είναι 2,46 m / s (1,23 m / 0,5 s). Αλλά η ταχύτητα αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Αρχίζει με μηδενική τιμή κατά την απελευθέρωση της μπάλας και αυξάνεται σε 4,91 m / s λίγο πριν την επαφή με το έδαφος, μετά από πτώση 1,23 m. Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας αναφέρεται ως επιτάχυνση. Δηλαδή, η επιτάχυνση είναι η παράγωγος της ταχύτητας ως προς τον χρόνο ή η δεύτερη παράγωγος της θέσης ως προς τον χρόνο. Η επιτάχυνση που υφίσταται η μπάλα ενώ πέφτει είναι σταθερή και έχει τιμή 9,81 m / s². Έτσι, η επιτάχυνση δείχνει τη μεταβολή σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο κάθε δευτερόλεπτο (m / s²). Συνεπώς,

$$\text{Επιτάχυνση} = \frac{\Delta \text{ταχύτητας}}{\Delta \text{χρόνου}} \quad (1.2)$$

Αν η μεταβλητή στον άξονα γ στο σχήμα 1.3α μεταβάλλονταν σε κατακόρυφη ταχύτητα έτσι ώστε το σημείο 2 να έχει συντεταγμένες 2,0 m / s και 3 s και το σημείο 3 να έχει συντεταγμένες 3,5 m / s και 4 s, ο ρυθμός μεταβολής από το σημείο 2 στο σημείο 3 (η επιτάχυνση) θα μπορούσε να υπολογι-



Σχήμα 1.3 (Α) Η μεταβολή της διανυσματικής ταχύτητας που σχετίζεται με άνισες μεταβολές της τιμής και της κατεύθυνσης σε μια γραφική παράσταση θέσης-χρόνου και (Β) οι μέσες διανυσματικές ταχύτητες των μετατοπίσεων.