

A satellite night view of Europe, showing the continent's outline against a dark blue background. The landmasses are covered with a dense pattern of yellow and white lights, representing city lights and urban areas. The lights are more concentrated in Western and Central Europe, with some smaller clusters in Eastern Europe and the Balkans. The overall effect is a glowing map of Europe.

3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

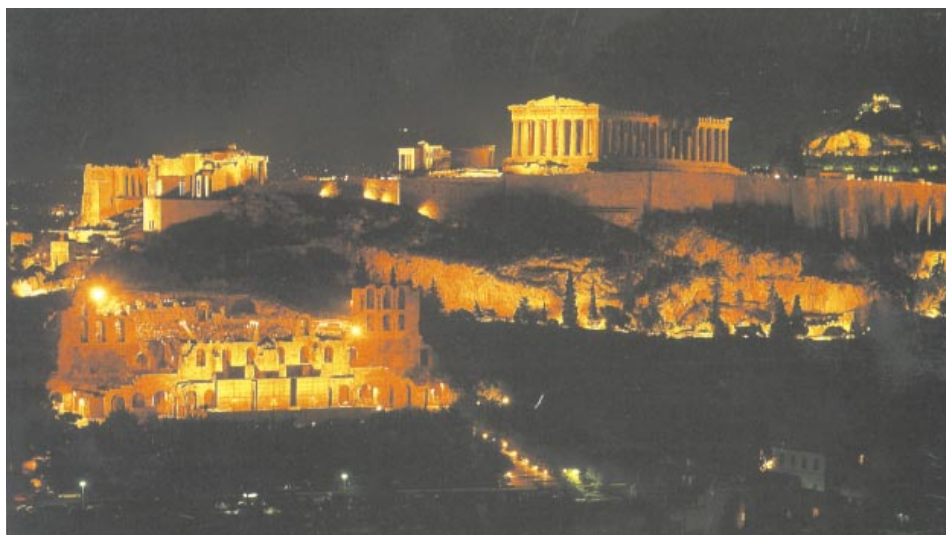
Μέρος Β΄

Η Φυσική του κινούμενου  
ηλεκτρικού φορτίου

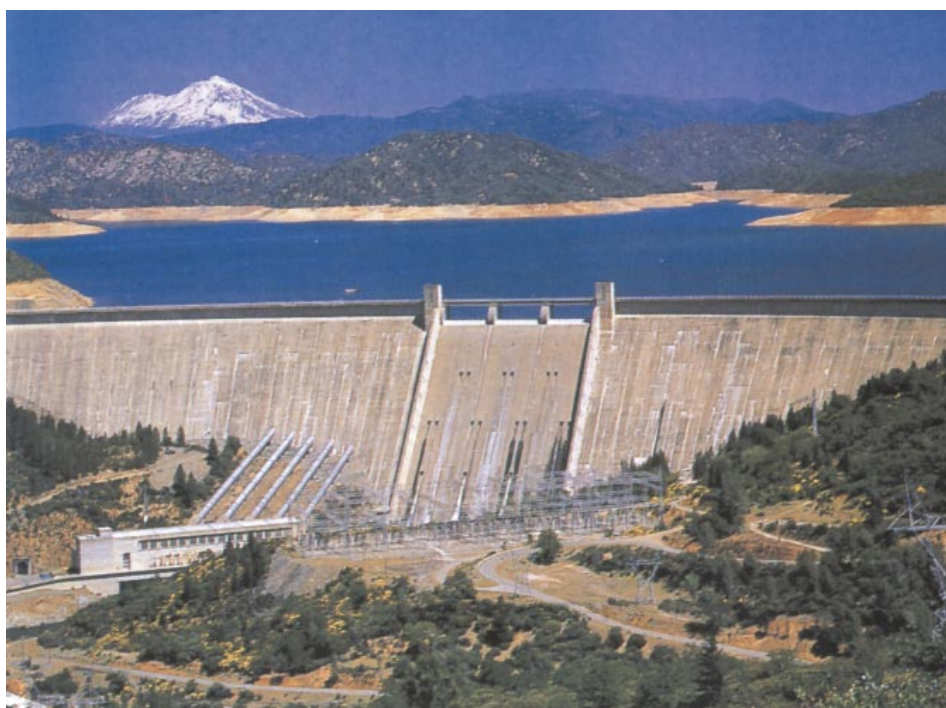


*Κάπου κάπου η τεχνολογία σμίγει με τη φαντασία...*





*...Άλλες φορές η Τεχνολογία σμίγει με το αρχαίο κάλλος.*



*Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε υδροηλεκτρικό εργοστάσιο.*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

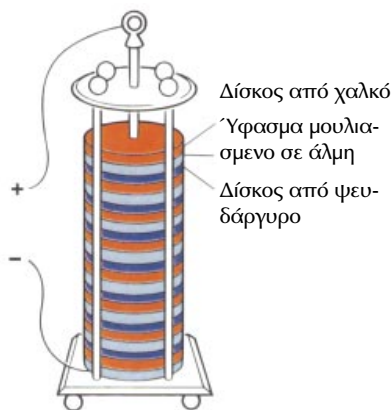
### Ο πρώτος τυχερός...

Η ιστορία του δυναμικού ηλεκτρισμού αρχίζει στα 1780, όταν ο Ιταλός γιατρός Luigi Galvani ανακάλυψε έναν τρόπο, για να δημιουργήσει συνεχή ροή φορτίου, δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα. Όπως πολλές επιστημονικές ανακαλύψεις, η ανακάλυψη του Galvani οφείλεται στην τύχη. Ο Galvani ενδιαφερόταν για τον ηλεκτρισμό και είχε εφοδιάσει το εργαστήριό του με όλο τον εξοπλισμό της εποχής του. Η ιστορία αναφέρει ότι ο Galvani ετοίμαζε ο ίδιος φαγητό για την άρρωστη γυναίκα του, η οποία τρελαινόταν για βατραχοπόδαρα. Κάποια μέρα που ετοιμαζόταν να της τα μαγειρέψει, συνέβη να είναι σε λειτουργία εκεί κοντά μια "ηλεκτρική μηχανή" που παρήγαγε σπινθήρες. Η γυναίκα του παρατήρησε ότι τα βατραχοπόδαρα άρχισαν να κάνουν συσπάσεις. Η ίδια, βέβαια, δεν ξανάβαλε βατραχοπόδαρα στο στόμα της, ο Galvani, όμως, αποφάσισε να μελετήσει το θέμα. Παρατήρησε ότι τα νεύρα των βατραχοποδάρων έκαναν συσπάσεις, όταν ερεθίζονταν από ηλεκτρικές εκκενώσεις. Με μεγάλη του έκπληξη διαπίστωσε ότι συνέβαιναν σπασμοί, ακόμα και όταν η ηλεκτρική μηχανή δε δούλευε. Για να συμβεί, όμως, αυτό έπρεπε τα πόδια του βατράχου να συνδεθούν με μέταλλο. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε ο Galvani ήταν λάθος: υπέθεσε ότι τα βατραχοπόδαρα διέθεταν ηλεκτρισμό. Πέρασαν 14 χρόνια, ώσπου να δοθεί η σωστή ερμηνεία στον "ηλεκτρισμό του βατράχου".



### Ο προσεκτικός μελετητής.....

Αυτό έγινε από έναν άλλο Ιταλό, τον Alessandro Volta, που απέδειξε ότι η πηγή του ηλεκτρισμού δεν ήταν τα βατραχοπόδαρα. Το φαινόμενο οφειλόταν στο ότι ο Galvani είχε χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικά μέταλλα, που έκαναν επαφή με αλατόνερο. Τα βατραχοπόδαρα διατηρούνταν σε άλμη. Ο Galvani είχε, πράγματι, χρησιμοποιήσει ένα δίσκο από ψευδάργυρο και ατσαλένια γαντζάκια. Επιπλέον, είχε ενώσει τα βατραχοπόδαρα με χάλκινα σύρματα. Ο Volta χρησιμοποίησε αυτές τις ιδέες



και κατασκεύασε την πρώτη ηλεκτροχημική πηγή, που μετέτρεπε χημική ενέργεια σε ηλεκτρική.

### Ο σπουδαίος πειραματιστής.....

Πριν από διακόσια χρόνια δεν ήταν εύκολο για ένα φτωχό αγόρι να μορφωθεί, ακόμα και αν ήταν ιδιοφυΐα. Ο Michael Faraday ήταν γιος σιδηρουργού. Έμαθε να διαβάζει, να γράφει και να κάνει υπολογισμούς, αλλά εγκατέλειψε το σχολείο στα 13 του, για να εργαστεί ως βοηθός σε ένα βιβλιοδέτη. Μάθαινε εύκολα και άρχισε να διαβάζει τα βιβλία που έδενε. Γοητεύτηκε ιδιαίτερα από τα βιβλία φυσικής και χημείας και ξεκίνησε να κάνει πειράματα στο σπίτι του. Αργότερα, άρχισε να παρακολουθεί διαλέξεις για το κοινό στο Βασιλικό Ινστιτούτο, ένα μεγάλο ερευνητικό εργαστήριο του Λονδίνου. Παρακολουθούσε, ιδιαίτερα, τα μαθήματα του Sir H. Davy, που ήταν διευθυντής του Ινστιτούτου. Τις σημειώσεις που κρατούσε τις έδωσε σε ένα ωραίο βιβλίο και το έστειλε στον Davy, ζητώντας του να εργαστεί κοντά του ως βοηθός. Πήρε τη δουλειά και σε ηλικία 21 χρόνων μπόρεσε να εγκαταλείψει για πάντα τη βιβλιοδεσία. Δώδεκα χρόνια αργότερα ο Faraday έγινε διευθυντής του Ινστιτούτου και ήταν ένας από τους σπουδαιότερους επιστήμονες του καιρού του. Το βασικό ερώτημα στο οποίο απάντησε ο Faraday αφορούσε τη δυνατότητα να παραχθεί ρεύμα με τη βοήθεια μαγνητικών πεδίων. Η καταφατική απάντησή του και η πειραματική θεμελίωση που παρουσίασε τον έκαναν διάσημο, διότι έδωσαν την δυνατότητα να μετατραπεί η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των μηχανών που σήμερα ονομάζουμε γεννήτριες.



Η μεγάλη σημασία της ανακάλυψης του Faraday οφείλεται στο γεγονός ότι προσέφερε στην ανθρωπότητα άφθονη και φτηνή ενέργεια. Πριν από αυτόν η μόνη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν από μετατροπή χημικής. Η χημική, όμως, ενέργεια είναι "κρυμμένη" και λίγη. Η επαναστατικότητα της ανακάλυψης του Faraday οφείλεται στο ότι μας έδωσε τη δυνατότητα να μετατρέψουμε την άφθονη και προσιτή μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, που είναι τόσο απαραίτητη στον τεχνολογικό πολιτισμό μας.

### Ένας σημερινός άνθρωπος.....

Το πρωί θα τον ξυπνήσει το ηλεκτρικό του ξυπνητήρι (που μπορεί να παίζει και κάποια μελωδία). Θα ανοίξει την τηλεόρασή του για μια σύντομη ενημέρωση και ταυτόχρονα θα χρησιμοποιήσει την ηλεκτρική του κουζίνα, για να ετοιμάσει το πρωινό του με υλικά που θα προμηθευτεί και από το ηλεκτρικό του ψυγείο. Θα χρησιμοποιήσει (ενδεχομένως) το ηλεκτρικό ασανσέρ της πολυκατοικίας

στην οποία μένει για να κατεβεί στο δρόμο, όπου έχει παρκάρει το αυτοκίνητό του. Θα χρησιμοποιήσει τα κλειδιά του αυτοκινήτου, για να λειτουργήσει η ηλεκτρική μίζα του αυτοκινήτου του και να ξεκινήσει. Στο γραφείο του θα ανοίξει το ηλεκτρικό κλιματιστικό μηχανήμα και ίσως χρησιμοποιήσει το ηλεκτρικό μπρίκι, για να φτιάξει τον πρώτο του καφέ. Θα σηκώσει το ακουστικό του τηλεφώνου του, για να επικοινωνήσει με φίλους και συνεργάτες. Θα ανοίξει, ίσως, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του, για να αρχίσει την δουλειά του. Αν η μέρα είναι σκοτεινή, θα χρησιμοποιήσει το φως του γραφείου του.

Όλα αυτά χάρη σε αυτό το μικροσκοπικό, αόρατο, μυστηριώδες σωματίδιο, που ονομάζουμε **ηλεκτρόνιο**, και στο ακόμα πιο μυστηριώδες μέγεθος που το χαρακτηρίζει και το οποίο ονομάζεται **ηλεκτρικό φορτίο**. Η κίνηση αυτού του σωματιδίου κάνει όλες τις ηλεκτρικές συσκευές να λειτουργούν.

Να χρωστάμε, λοιπόν, ευγνωμοσύνη σε αυτό το ευεργετικό σωματίδιο; Την απάντηση θα τη δώστε μόνοι σας. Λέγεται ότι το ανθρώπινο ον κατάφερε να δαμάσει τις δυνάμεις της φύσης, ανάμεσα στις οποίες είναι και ο ηλεκτρισμός. Αυτό, σίγουρα, είναι αλήθεια. Σκεφτείτε, πράγματι, τι θα συνέβαινε, αν, για κάποιο λόγο, στερούμαστε τις ευκολίες και τις ανέσεις που μας προσφέρει ο ηλεκτρισμός. Είμαστε, λοιπόν, κύριοι ή αιχμάλωτοι του ηλεκτρισμού; Και σε αυτό το ερώτημα την απάντηση θα τη δώσετε μόνοι σας. Εμείς εκείνο που μπορούμε να σας πούμε είναι ότι η επιστημονική έρευνα και η τεχνολογία δεν είναι αυτές καθαυτές ανήθικες και δεν είναι δυνατόν να ανασταλούν. Εκείνο που είναι ανήθικο και πρέπει να ανασταλεί είναι η κακή χρήση και η εκμετάλλευσή τους, ώστε να επιτυγχάνεται η συγκέντρωση δύναμης από κάποιες ομάδες με στόχο την επιβολή απόψεων σε άλλες ομάδες.

### 3.1 Η έννοια του ηλεκτρικού ρεύματος

Όλοι και όλες σας θα έχετε παρατηρήσει το νήμα ενός λαμπτήρα πυράκτωσης, όταν είναι σε λειτουργία. Τι είναι εκείνο που αναγκάζει το σύρμα να εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία και ταυτόχρονα να θερμαίνεται; Ποια είναι η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση του λαμπτήρα όταν είναι σκοτεινός και σε εκείνη όταν είναι φωτεινός; Γνωρίζετε ότι, για να φωτοβολήσει ένας λαμπτήρας, αρκεί να πιέσετε τον κατάλληλο διακόπτη. Τι συμβαίνει, λοιπόν, όταν πιέζουμε το διακόπτη ενός λαμπτήρα (και κάθε ηλεκτρικής συσκευής) και μεταβάλλεται τόσο ριζικά η κατάστασή του; Ας μην ξεχνάμε



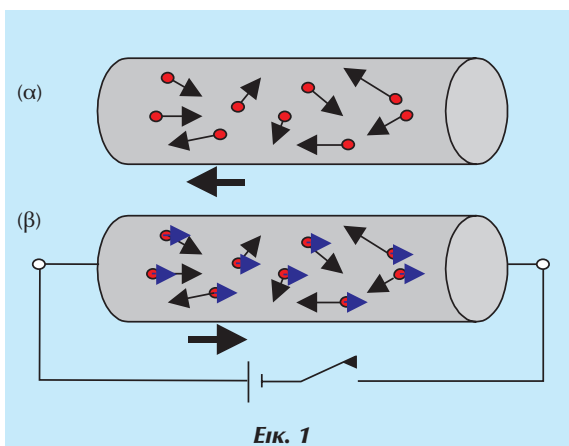
ότι τόσο η ακτινοβολία φωτός όσο και η εκπομπή θερμότητας είναι φαινόμενα που προϋποθέτουν ενεργειακές μετατροπές. Από πού προέρχεται η φωτεινή και η θερμική ενέργεια που εκπέμπουν τα άτομα του υλικού του νήματος του λαμπτήρα; Ποιος παράγοντας κινητοποιήθηκε με το κλείσιμο του διακόπτη και ανάγκασε τα άτομα του υλικού να εκπέμπουν ενέργεια; Μην ξεχνάτε ότι η ηλεκτρική καλωδίωση είναι μεταλλική. Θυμηθείτε τώρα ότι μέσα σε κάθε κομμάτι μετάλλου υπάρχουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που κινούνται τυχαία και άτακτα. Αυτά ακριβώς τα αόρατα, μικροσκοπικά και φευγαλέα σωματίδια, όταν βρεθούν κάτω από ειδικές συνθήκες, δημιουργούν τα φαινόμενα που αναφέραμε.

Στο εσωτερικό των μεταλλικών αγωγών κυκλοφορούν ηλεκτρόνια, που κινούνται τυχαία και χαοτικά προς όλες τις κατευθύνσεις (εικόνα 1α). Τα ηλεκ-



τρόνια αυτά αποτελούν το λεγόμενο **ηλεκτρονικό νέφος** του μετάλλου, και οι ταχύτητές τους είναι, γενικώς, πολύ μεγάλες.

Ας υποθέσουμε ότι στα άκρα του μεταλλικού αγωγού εφαρμόζουμε μια σταθερή διαφορά δυναμικού (εικόνα 1β). Ως αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς δυναμικού θα δημιουργηθεί στο εσωτερικό του μετάλλου ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο θα ασκήσει δυνάμεις στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που θα έχουν όλες την ίδια κατεύθυνση, αντίθετη προς την κατεύθυνση της έντασης. Εξαιτίας αυτών των δυνάμεων τα ηλεκτρόνια του νέφους θα αποκτήσουν μια συνιστώσα ταχύτητας κατά την κατεύθυνση της δύναμης. Αυτό σημαίνει ότι όλα θα αρχίσουν να κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση. Η κίνηση παύει να είναι τυχαία και γίνεται προσανατολισμένη. Αυτή την κίνηση την ονομάζουμε **ηλεκτρικό ρεύμα**.



Εικ. 1

**Ηλεκτρικό ρεύμα** ονομάζουμε την ομαδικά προσανατολισμένη κίνηση ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Οι κινούμενοι φορείς στα μέταλλα είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Στα διαλύματα ηλεκτρολυτών οι κινούμενοι φορείς είναι ελεύθερα θετικά και αρνητικά ιόντα. Στα αέρια οι φορείς είναι ελεύθερα ηλεκτρόνια, θετικά ιόντα και αρνητικά ιόντα.

### 3.2. Ηλεκτρικές πηγές

Είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι, για να δημιουργήσουμε ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα μεταλλικό αγωγό, πρέπει να εφαρμόσουμε στα άκρα του μια διαφορά δυναμικού. Αυτή τη διαφορά δυναμικού την εξασφαλίζουν οι **ηλεκτρικές πηγές**.

**Η ηλεκτρική πηγή** είναι μια συσκευή που δημιουργεί και διατηρεί διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο συγκεκριμένα σημεία της, τα οποία λέγονται **πόλοι της πηγής**.

Θα δούμε, στη συνέχεια, ότι το ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή οι κινούμενοι ηλεκτρικοί φορείς, έχει και μεταφέρει ενέργεια. Την ενέργεια αυτή την παίρνουν οι φορείς από την πηγή. Να προσέξουμε όμως: η πηγή δεν παράγει ενέργεια από το τίποτα. Απλώς μετασχηματίζει σε



ηλεκτρική ενέργεια ενέργεια κάποιας άλλης μορφής, την οποία ο κατασκευαστής έχει αποθηκεύσει στην πηγή. Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε ότι :

**Κάθε ηλεκτρική πηγή είναι μετατροπέας της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε αυτή σε ηλεκτρική ενέργεια.**

Έχουμε διάφορα είδη πηγών ανάλογα με το είδος της ενεργειακής μετατροπής που πραγματοποιείται κατά τη λειτουργία τους.

### 1. Ηλεκτροχημική πηγή

Σε αυτή γίνεται μετατροπή αποθηκευμένης χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.



Τύποι ηλεκτροχημικών πηγών, Α,Β,С, των 1,5 Volt D των 9,5 Volt



### 2. Γεννήτρια

Σε αυτή μετατρέπεται μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

#### Ηλεκτρική πηγή

**Αποθηκευμένη χημική ενέργεια**

Ηλεκτροχημική πηγή

**Μηχανική ενέργεια**

Γεννήτρια



**Ηλεκτρική  
ενέργεια**

### 3.3. Ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

Οι ηλεκτρικοί φορείς σε ένα ρευματοφόρο αγωγό μπορούν να κινούνται με διάφορους τρόπους, που εξαρτώνται από το είδος της πηγής που αναγκάζει τους φορείς σε ομαδική κίνηση. Σε κάθε περίπτωση χρειαζόμαστε ένα μέγεθος, το οποίο να περιγράφει το πόσο ισχυρό είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων (στην περίπτωση μεταλλικών αγωγών) που περνούν από διατομή του αγωγού στη μονάδα του χρόνου. Είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρο-

νίων που περνούν σε κάθε δευτερόλεπτο από διατομή του αγωγού, το ρεύμα γίνεται ισχυρότερο. Γνωρίζουμε ότι όλα τα ηλεκτρόνια έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι το πέρασμα των ηλεκτρονίων από διατομή του αγωγού συνεπάγεται διακίνηση φορτίου από τη διατομή. Το μέγεθος που προσδιορίζει το πόσο ισχυρό είναι ένα ηλεκτρικό ρεύμα **ονομάζεται ένταση  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος**. Αν ο ρυθμός της ροής των ηλεκτρικών φορέων είναι σταθερός, με την έννοια ότι σε ίσα χρονικά διαστήματα διακινείται το ίδιο φορτίο από διατομή του αγωγού, η ένταση ορίζεται ως εξής:

Ένταση  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος είναι το σταθερό πηλίκο του φορτίου  $Q$  που περνάει από διατομή του αγωγού σε χρονικό διάστημα  $t$  με το αντίστοιχο χρονικό διάστημα  $t$ .

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3.1)$$

Το μέγεθος "ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος" είναι θεμελιώδες μέγεθος στο S.I. Η μονάδα του ονομάζεται 1Ampere (προς τιμήν του Γάλλου φυσικού Andre Ampere) και συντομογραφείται ως 1A

Από τη σχέση (3.1) μπορούμε να προσδιορίσουμε και τη μονάδα φορτίου στο S.I, η οποία είναι, όπως ήδη γνωρίζετε, το 1C. Έτσι,  $1C = 1A \cdot s$ .

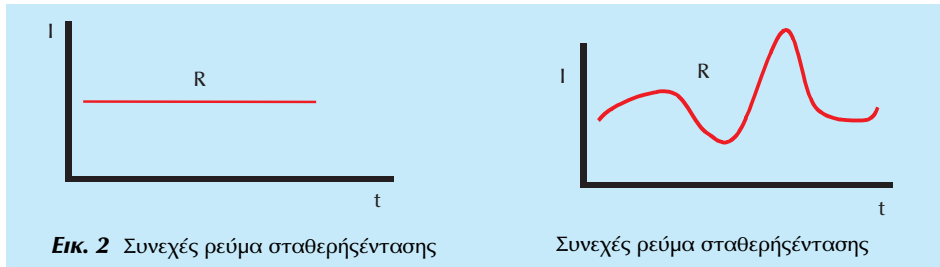
Υποπολλαπλάσια της μονάδας 1A είναι τα επόμενα :

1mA = $10^{-3}A$	(μιλιαμπέρ)
1μA = $10^{-6}A$	(μικροαμπέρ)
1nA = $10^{-9}A$	(νανοαμπέρ)
1pA = $10^{-12}A$	(πικοαμπέρ)

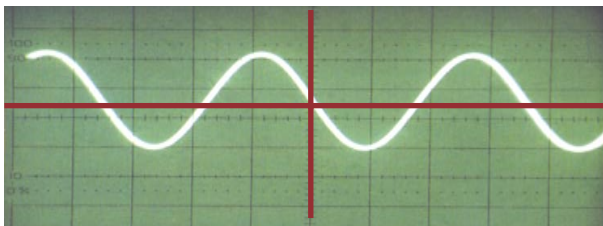
Τα ηλεκτρικά ρεύματα τα διακρίνουμε σε διάφορες κατηγορίες.

#### **A. Συνεχή    B. Μεταβαλλόμενα**

Στα συνεχή ρεύματα οι ηλεκτρικοί φορείς κινούνται συνεχώς προς την ίδια κατεύθυνση. Στην περίπτωση που η ταχύτητα των φορέων είναι σταθερή τα φορτία που διακινούνται από διατομή του αγωγού σε ίσα χρονικά διαστήματα θα είναι ίσα. Αυτό, σύμφωνα με τη σχέση (3.1), σημαίνει ότι η ένταση του ρεύματος θα είναι σταθερή. Αυτά τα ρεύματα ονομάζονται **συνεχή σταθερής έντασης** και είναι αυτά τα οποία θα μας απασχολήσουν σε αυτό το βιβλίο. Αν η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μεταβάλλεται με το χρόνο (χωρίς όμως να αλλάζει φορά), το ρεύμα λέγεται **συνεχές μεταβλητής έντασης** (εικόνα 2)



Στα μεταβαλλόμενα ρεύματα μεταβάλλεται η κατεύθυνση κίνησης των φορέων. Αν η μεταβολή της κατεύθυνσης παρουσιάζει περιοδικότητα, έχουμε τα **περιοδικά μεταβαλλόμενα ρεύματα**. Στην ακόμα ειδικότερη περίπτωση όπου η χρονική εξέλιξη του ρεύματος περιγράφεται από ημιτονική ή από συνημιτονική συνάρτηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4, το ρεύμα ονομάζεται **αρμονικά εναλλασσόμενο** ή απλώς **εναλλασσόμενο**.



**Εικ. 4** Το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο ημιτονοειδές. Το φορτίο που διακινείται από διατομή του αγωγού σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου είναι μηδέν.

Σήμερα έχει γενικευτεί η χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος τόσο στη βιομηχανική όσο και στην αστική κατανάλωση. Ο σπουδαιότερος λόγος σχετίζεται με την οικονομική μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις. Όλα τα ηλεκτρικά όργανα που χρησιμοποιείτε στο σπίτι σας τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο μας προμηθεύει η ΔΕΗ. Το ρεύμα αυτό έχει συχνότητα 60Hz.

Συχνότητα 60 Hz σημαίνει ότι σε κάθε δευτερόλεπτο αλλάζει η πολικότητα της τάσης 60 φορές, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε δευτερόλεπτο αλλάζει 60 φορές η κατεύθυνση της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στους αγωγούς.

### Παράδειγμα 1

Αγωγός διαρρέεται από συνεχές ρεύμα έντασης  $I = 16\text{A}$ . Να υπολογίσετε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που περνούν από διατομή του αγωγού σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου και να τον συγκρίνετε με τον πληθυσμό της γης.

### Λύση

Αρχικά θα υπολογίσουμε το φορτίο που περνάει από διατομή του αγωγού σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου  $\Delta t = 1\text{ s}$ . Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση  $I = Q/t$ , η οποία, λυμένη ως προς  $q$  δίνει  $Q = I t$ . Με αντικατάσταση

έχουμε :  $Q = 16 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 16 \text{ C}$

Αν ονομάσουμε το φορτίο ενός ηλεκτρονίου  $q_e$ , ο αριθμός  $N$  των ηλεκτρονίων που μεταφέρουν το φορτίο  $Q = 16 \text{ C}$  θα υπολογιστεί από τη σχέση

$$Q = N \cdot q_e, \text{ η οποία, λυμένη ως προς } N, \text{ δίνει } N = \frac{Q}{q_e}$$

Με αντικατάσταση έχουμε :

$$N = \frac{16 \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{C}}{e}} = 10^{20} e$$

Αν υποθέσουμε ότι ο πληθυσμός των ανθρώπων στη γη είναι περίπου 10 δισεκατομμύρια άτομα ( $10^{10}$  άτομα), ο λόγος του αριθμού των ηλεκτρονίων που πέρασαν από τη διατομή σε ένα δευτερόλεπτο και του πληθυσμού της γης είναι:

$$\alpha = \frac{10^{20}}{10^{10}} = 10^{10}$$

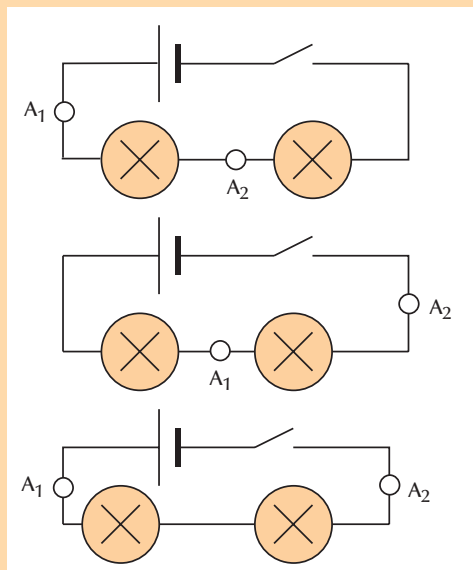
### Δραστηριότητα 1

Θα χρησιμοποιήσετε ένα λεμόνι και δύο μικρά σύρματα από διαφορετικά μέταλλα. Καρφώστε ένα μικρό μέρος των δύο συρμάτων στο λεμόνι και ελέξτε με ένα μιλιαμπερόμετρο εάν κυκλοφορεί ρεύμα στο κύκλωμα. Αν έχετε ένα μικρό λαμπάκι, χρησιμοποιήστε το, για να δείτε αν θα φωτοβολήσει. Αν διαπιστώσετε ρεύμα ή αν το λαμπάκι φωτοβολήσει, έχετε κατασκευάσει την πρώτη σας ηλεκτρική πηγή.

### Δραστηριότητα 2

Χρησιμοποιήστε δύο λαμπάκια ηλεκτρικού φακού, μια πηγή συνεχούς σταθερής τάσης 3-Volt, δύο μιλιαμπερόμετρα και ένα διακόπτη, για να συνδεσμολογήσετε τα κυκλώματα που φαίνονται στο απέναντι σχήμα. Το ζητούμενο είναι να καταγράψετε τις ενδείξεις των οργάνων, όταν τοποθετούνται στις διάφορες θέσεις, και να βγάλετε τα σχετικά συμπεράσματα.

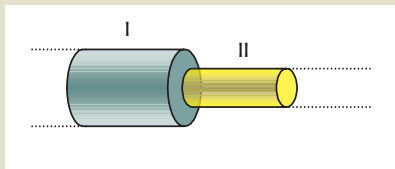
1. Στον πίνακα που παρατίθεται να καταγράψετε τις ενδείξεις και να προσδιορίσετε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την πηγή.





2. Να υπολογίσετε το φορτίο που περνάει από κάθε αμπερόμετρο σε 100s.
3. Να υπολογίσετε το φορτίο που περνάει από την πηγή σε 100s.

Κύκλωμα	Ένδειξη οργάνου		Ρεύμα πηγής
	A1	A2	
1			
2			
3			



#### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Ο αγωγός του απέναντι σχήματος παρουσιάζει μεταβλητό εμβαδόν διατομής. Να συγκρίνετε τις εντάσεις του ρεύματος στις περιοχές (I) και (II). Να συγκρίνετε επίσης τις ταχύτητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

### 3.4. Αντιστάτες

Γνωρίζουμε, ήδη, ότι αν στα άκρα ενός μεταλλικού αγωγού συνδέσουμε μια ηλεκτρική πηγή, θα δημιουργηθεί στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο, που θα ασκεί στα ελεύθερα ηλεκτρόνια δύναμη και θα τα αναγκάσει να κινηθούν. Το ερώτημα που προκύπτει είναι: ποια θα είναι η μορφή αυτής της κίνησης; Θυμηθείτε ότι στο εσωτερικό των μεταλλικών αγωγών υπάρχουν και **θετικά ιόντα**, τα οποία **ταλαντώνονται** χωρίς να εγκαταλείπουν τις περιοχές τους. Η κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων επιταχύνεται από το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στο εσωτερικό του αγωγού. Έτσι ελεύθερα ηλεκτρόνια αποκτούν κινητική ενέργεια. Καθώς κινούνται, συγκρούονται με τα ταλαντούμενα ιόντα και τους μεταβιβάζουν την ενέργειά τους. Το ηλεκτρικό πεδίο, όμως, είναι εκεί. Επιταχύνει πάλι τα ηλεκτρόνια και τους προσφέρει νέα ποσά ενέργειας, την οποία τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν στα ιόντα σε επόμενες κρούσεις τους. Αυτές οι κρούσεις δημιουργούν εμπόδια στην κίνηση των ηλεκτρονίων. Δείτε το, αν θέλετε, ως μηχανική αντίσταση του σώματος του αγωγού στην προσανατολισμένη κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή στο πέραςμα του ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο αγωγός παρουσιάζει **ηλεκτρική αντίσταση** στο ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ίδιος ο αγωγός ονομάζεται **αντιστάτης**.

Οι **αντιστάτες** είναι σώματα τα οποία δυσκολεύουν το πέρασμα του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ποσοτική έκφραση αυτής της δυσκολίας χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος, που εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά του αντιστάτη και ονομάζεται **αντίσταση**.

### Παρατηρήσεις

1. Δεν πρέπει να γίνει σύγχυση ανάμεσα στις έννοιες "αντιστάτης" και "αντίσταση". Ο αντιστάτης είναι ένα υλικό σώμα, μέσα από το οποίο μπορεί να περνά ηλεκτρικό ρεύμα. Η αντίσταση του αντιστάτη είναι το χαρακτηριστικό μέγεθός του, που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.
2. Αν σκεφτούμε τις ενεργειακές μετατροπές που συμβαίνουν σε ένα κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μια πηγή και από έναν αντιστάτη, θα δούμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχει η πηγή στα κινούμενα ηλεκτρόνια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Στη συνέχεια, αυτή η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στις κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα ταλαντούμενα ιόντα. Η θερμική ενέργεια εν μέρει παραμένει στον αντιστάτη και του αυξάνει τη θερμοκρασία και εν μέρει διαφεύγει στο περιβάλλον με μεταφορά και με ακτινοβολία.

Σύμφωνα με την παρατήρηση 2 οι μεταλλικοί αγωγοί ( και όχι μόνο) μετατρέπουν την ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος σε θερμική ενέργεια και μόνο, η οποία "χάνεται" στο περιβάλλον. Από την άποψη αυτή οι αγωγοί αυτοί θεωρούνται **παθητικά στοιχεία**. Αυτό, βέβαια, δε σημαίνει ότι δεν μπορούμε να αξιοποιήσουμε για διάφορους σκοπούς τη θερμική ενέργεια που εκλύεται σε αυτούς τους αγωγούς. Θα δούμε στη συνέχεια ότι αυτή η ενέργεια αξιοποιείται σε πολλές συσκευές.

Από την άλλη πλευρά είδαμε ότι σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια ( και θερμική ). Λέμε, λοιπόν, ότι ο κινητήρας είναι ένα **ενεργητικό στοιχείο**.

## 3.5. Μέτρηση έντασης ρεύματος και διαφοράς δυναμικού

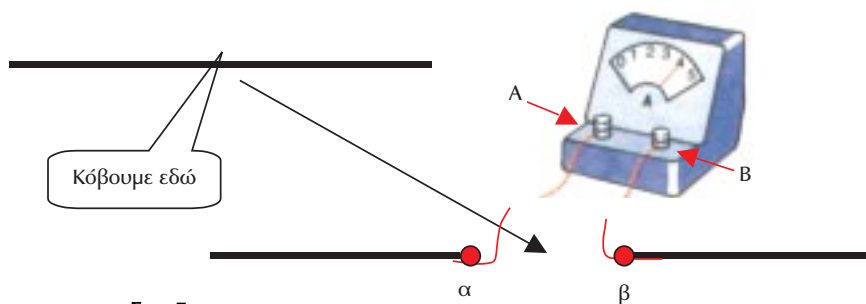
Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που **διαρρέει έναν αγωγό** μετρείται με ειδικό όργανο, που ονομάζεται **αμπερόμετρο**. Το αμπερόμετρο διαθέτει δύο ακροδέκτες. Για να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό, κάνουμε το εξής: κόβουμε τον αγωγό σε ένα σημείο και προκύπτουν δύο ελεύθερα άκρα α και β. Στο ένα άκρο α συνδέουμε τον ένα ακροδέκτη Α του οργάνου. Τον άλλο ακροδέκτη Β τον συνδέουμε στο άλλο ελεύθερο άκρο β, όπως φαίνεται στην εικόνα 5



Στην αριστερή πλευρά εικονίζεται ένα συνηθισμένο εργαστηριακό αμπερόμετρο. Δεξιά φαίνεται ένα συνηθισμένο εργαστηριακό βολτόμετρο



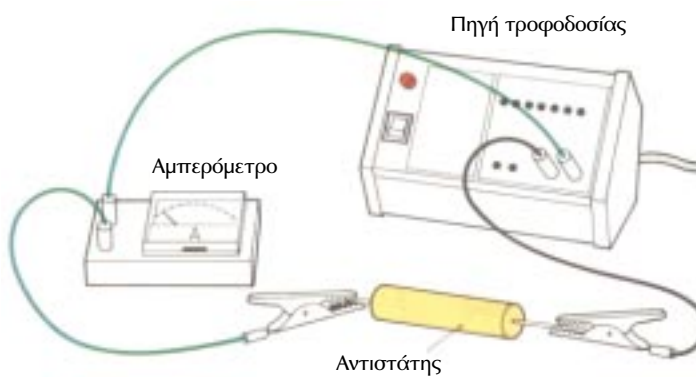
Συνηθισμένο εργαστηριακό πολύμετρο. Μπορεί να μετρήσει τάση, ένταση και αντίσταση.



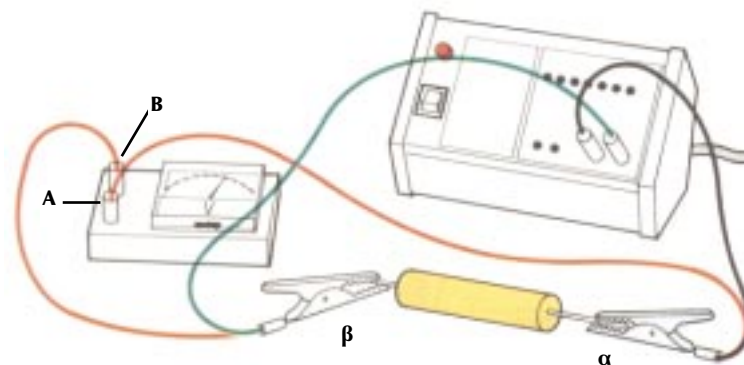
Εικ. 5

Λέμε ότι το αμπερόμετρο παρεμβάλλεται σε σειρά στον αγωγό του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος.

**Εικ.6α** Να παρατηρήσετε ότι το αμπερόμετρο και ο αντιστάτης είναι συνδεσμολογημένα σε σειρά προς την πηγή. Το πράσινο καλώδιο κόπηκε σε κάποιο σημείο, και στα δύο ελεύθερα άκρα του συνδέθηκαν οι ακροδέκτες του αμπερόμετρου. Από το αμπερόμετρο, τον αντιστάτη και την πηγή περνάει το ίδιο ρεύμα.



Η διαφορά δυναμικού **ανάμεσα σε δύο σημεία, α και β**, ενός κυκλώματος μετριέται με ειδικό όργανο, που ονομάζεται **βολτόμετρο**. Ενώνουμε τον ακροδέκτη A του βολτόμετρου με το σημείο α και τον ακροδέκτη B με το σημείο β. Λέμε ότι το βολτόμετρο συνδέεται **παράλληλα** με το τμήμα του κυκλώματος, στα άκρα του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού. (εικόνα 6β)



**Εικ.6β** Να παρατηρήσετε ότι οι ακροδέκτες του βολτόμετρου συνδέθηκαν απευθείας στα άκρα του αντιστάτη. Αυτό σημαίνει ότι η τάση στα άκρα του βολτόμετρου ισούται με την τάση στα άκρα του αντιστάτη.

### 3.6. Το ηλεκτρικό κύκλωμα

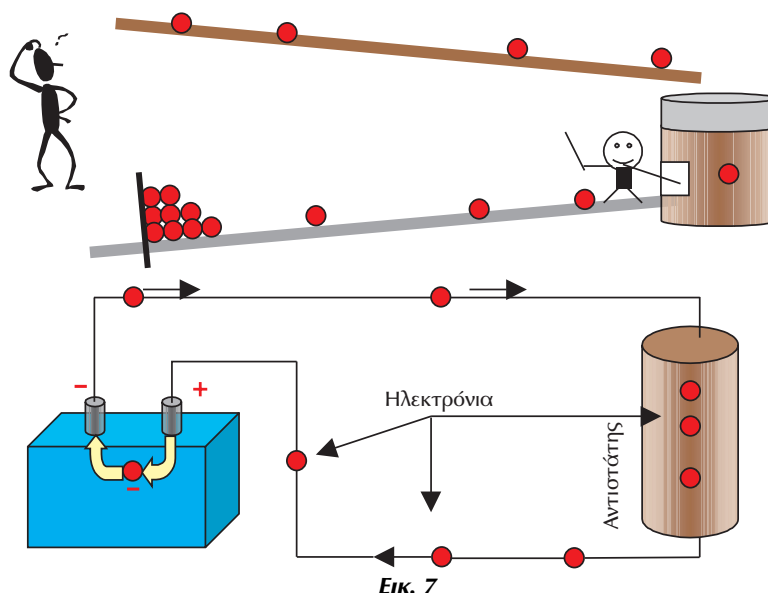
Το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι ένα σύνολο από πηγές, αποδέκτες, όργανα μέτρησης, καλώδια σύνδεσης και διακόπτες. Τα παραπάνω στοιχεία συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούνται αγωγάιμοι δρόμοι για το ρεύμα. Στο κύκλωμα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μία ηλεκτρική πηγή και ένας τουλάχιστον αποδέκτης. Ο αποδέκτης μπορεί να είναι και ένας απλός αντιστάτης (παθητικός αποδέκτης). Η "καρδιά" κάθε ηλεκτρικού κυκλώματος είναι η ηλεκτρική πηγή. Αυτή αποτελεί το στοιχείο που ενεργοποιεί όλα τα άλλα και από το οποίο πηγάζει η αρχική ενέργεια, που διατίθεται συνεχώς στα άλλα στοιχεία του κυκλώματος.

Στην εικόνα (7) γίνεται μια προσπάθεια να αναλύσουμε το ρόλο μιας πηγής σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, συγκρίνοντάς το με ένα απλό μηχανικό κύκλωμα. Στο μηχανικό κύκλωμα ένας εργάτης ανεβάζει από το έδαφος μεταλλικές σφαίρες και τις τοποθετεί στη σανίδα, που παρουσιάζει κλίση ως προς τον ορίζοντα. Οι σφαίρες κυλούν πάνω στη σανίδα και πέφτουν σε ένα βαρέλι, που περιέχει ένα χύρρευστο υγρό, π.χ. λάδι. Οι σφαίρες περνούν μέσα από το λάδι και φτάνουν στον πυθμένα, όπου υπάρχει μια μικρή πόρτα που την εξουσιάζει ένας "δαίμων".

Ο "δαίμων" έχει την ικανότητα να ανοίγει την πόρτα την κατάλληλη στιγμή, ώστε να βγαίνουν οι σφαίρες χωρίς να χύνεται το λάδι. Στη συνέχεια, οι σφαίρες, ακολουθώντας τον επικλινή δρόμο, καταφτάνουν στον εργάτη, όπου και συνεχίζεται ο κύκλος.

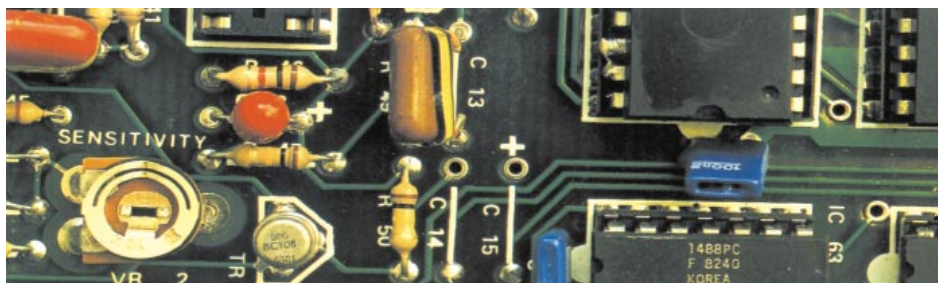
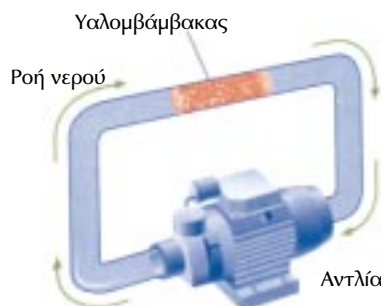
Στο ηλεκτρικό κύκλωμα το ρόλο του εργάτη τον αναλαμβάνει η ηλεκτρική πηγή. Ο εργάτης δαπανά ενέργεια, για να σηκώσει τις σφαίρες, να τις αναγκάσει, δηλαδή, να κινηθούν αντίθετα από τη φυσική τάση τους, που είναι να πέφτουν. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα η πηγή δαπανά ενέργεια, για να κινήσει τα ηλεκτρόνια από υψηλό δυναμικό (θετικός πόλος της πηγής) προς χαμηλό δυναμικό (αρνητικός πόλος της πηγής), αντίθετα δηλαδή προς τη φυσική τάση τους, που είναι να κινούνται από χαμηλό δυναμικό σε υψηλό δυναμικό.





Μπορείτε, αν θέλετε, να εξομοιώσετε το ρόλο μιας πηγής σε ένα κύκλωμα με το ρόλο μιας αντλίας. Η αντλία προσφέρει ενέργεια στη μάζα του νερού, για να υπερνικήσει τη μηχανική αντίσταση του υαλοβάμβου. Η ηλεκτρική πηγή προσφέρει ενέργεια στα ηλεκτρόνια, για να υπερνικήσουν την αντίσταση από τα ταλαντούμενα ιόντα.

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα το ρόλο του λαδιού τον αναλαμβάνει ο αντιστατής. Η ενέργεια που έχουν αποκτήσει οι σφαίρες μετατρέπεται σε θερμότητα κατά την κίνησή τους μέσα στο λάδι, λόγω μεγάλης τριβής. Στον αντιστατή η ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των κρούσεων των ηλεκτρονίων με τα ταλαντούμενα ιόντα.

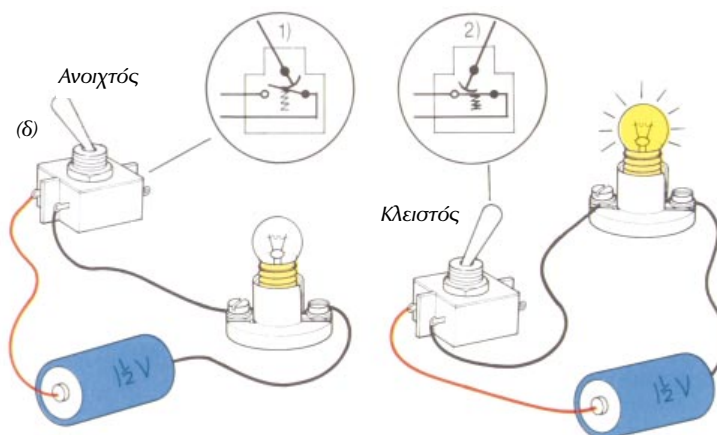


**Εικ.** Στο εσωτερικό ενός Η/Υ. Μερικά κυκλώματα είναι, πραγματικά, εξαιρετικά πολύπλοκα.

### 3.7. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος

Στην εικόνα 8 φαίνεται ένα απλό κύκλωμα, που αποτελείται από μία ηλεκτρική πηγή, έναν αντιστάτη, που είναι μια λάμπα πυράκτωσης, από καλώδια σύνδεσης και από έναν ανοικτό διακόπτη.

Μόλις κλείσουμε το διακόπτη δ, συμβαίνουν τα εξής :



Εικ. 8

1. Σχεδόν **ακαριαία** σε κάθε σημείο του κυκλώματος δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο, που ασκεί δυνάμεις σε όλα τα ηλεκτρόνια του κυκλώματος, όπου και αν βρίσκονται.
2. Τα ηλεκτρόνια, ανταποκρινόμενα στις δυνάμεις που δέχονται, αρχίζουν να κινούνται όλα μαζί. Προσέξτε όμως: η ταχύτητα μετακίνησης των ηλεκτρονίων είναι **εξαιρετικά μικρή**. Δε θα ήταν υπερβολή να πούμε ότι η ομαδική ταχύτητα μεταφοράς των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μικρότερη από την ταχύτητα μιας χελώνας.

Να μη γίνει, λοιπόν, σύγχυση ανάμεσα στην ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου (που ισούται περίπου με την ταχύτητα του φωτός στο κενό) και την ταχύτητα μεταφοράς των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Για να κατανοήσετε καλύτερα τη διαφορά ανάμεσα στην ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το ηλεκτρικό πεδίο στους αγωγούς, όταν κλείσουμε το διακόπτη σε ένα κύκλωμα, και στην ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια, σκεφτείτε το επόμενο μηχανικό ανάλογο. Φανταστείτε ότι είσαστε σταματημένοι με το αυτοκίνητό σας μπροστά στο κόκκινο φως ενός σηματοδότη της Τροχαίας μαζί με μια μεγάλη σειρά από άλλα αυτοκίνητα. Κάποια στιγμή το φως γίνεται πράσινο. Όλοι οι οδηγοί αντιλαμβάνονται σχεδόν **ακαριαία** ότι το φως έγινε πράσινο. Οι ταχύτητες, όμως, που μπορούν να αναπτύξουν με τα αυτοκίνητα είναι πολύ μικρότερες. Να αντιστοιχίσετε την ταχύτητα του φωτός με την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου και την ταχύτητα των αυτοκινήτων με τη μεταφορική ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Όταν,

λοιπόν, σε ένα κύκλωμα κλείσουμε το διακόπτη, όλα τα ηλεκτρόνια, σε όποιο σημείο του κυκλώματος και αν βρίσκονται, αντιλαμβάνονται ακαριαία τη δράση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω τους. Οι ταχύτητες, όμως, που αποκτούν εξαιτίας της συνεχούς δράσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι εξαιρετικά μικρές.

3. Τα ηλεκτρόνια που είναι κοντά στο θετικό πόλο της πηγής παίρνουν ενέργεια από την πηγή και μετακινούνται προς τον αρνητικό πόλο της. Από εκεί και πέρα κινούνται μέσα στον αντιστάτη από χαμηλό δυναμικό. (άκρο α) προς υψηλό δυναμικό (άκρο β).

Στην πραγματικότητα μέσα από την ηλεκτρική πηγή δεν κινούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια. Υιοθετήσαμε αυτή την άποψη, για να μη διακοπεί η συνέχεια της υποθετικής κίνησης.

Από αυτά που είπαμε έως τώρα είναι φανερό ότι στα ηλεκτρικά κυκλώματα κινούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια (τουλάχιστον στα μεταλλικά μέρη τους). Η φορά κίνησης αυτών των ελεύθερων ηλεκτρονίων ονομάζεται **πραγματική φορά** του ηλεκτρικού ρεύματος.

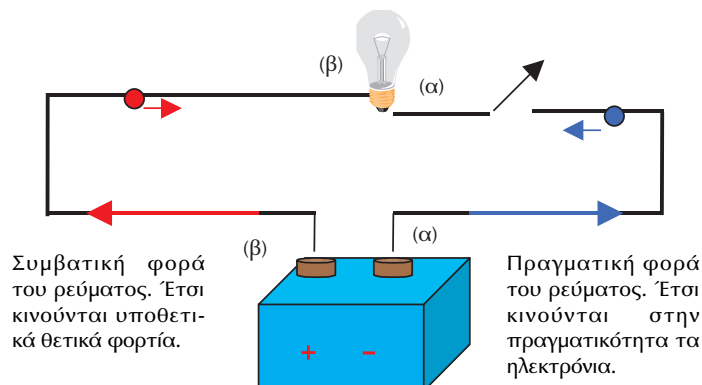
Η πραγματική φορά του ρεύματος δε χρησιμοποιείται. Αντί αυτής χρησιμοποιείται η λεγόμενη **συμβατική φορά**, που είναι η φορά κίνησης **θετικών φορέων**. Προφανώς, για τη συμβατική φορά ισχύουν τα αντίθετα από αυτά που ισχύουν για την πραγματική φορά.

**Η πραγματική φορά του ρεύματος** μέσα σε μια ηλεκτρική πηγή είναι από το θετικό προς τον αρνητικό πόλο της.

**Η πραγματική φορά του ρεύματος** σε αντιστάτη είναι από το άκρο με χαμηλό δυναμικό προς το άκρο με υψηλό δυναμικό.

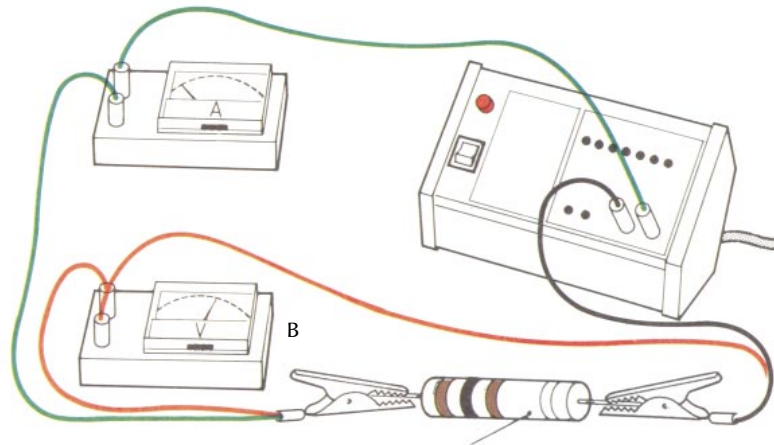
**Η συμβατική φορά του ρεύματος** μέσα σε μια ηλεκτρική πηγή είναι από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο της.

**Η συμβατική φορά του ρεύματος** σε έναν αντιστάτη είναι από το άκρο με υψηλό δυναμικό προς το άκρο με χαμηλό δυναμικό.



### 3.8. Αντίσταση αντιστάτη

Είπαμε ότι οι ηλεκτρικές πηγές είναι ενεργητικά στοιχεία, που έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν στους πόλους τους διαφορά δυναμικού. Αν αυτή τη διαφορά δυναμικού την εφαρμόσουμε σε έναν αντιστάτη, θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Έχει σημασία να γνωρίζουμε το ρεύμα που θα δημιουργηθεί από μια δοσμένη διαφορά δυναμικού. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να διερευνήσουμε τη σχέση ανάμεσα στις διαφορές δυναμικού και στις αντίστοιχες εντάσεις των ρευμάτων.



**Εικ. 10** Να παρατηρήσετε ότι το αμπερόμετρο είναι συνδεσμοποιημένο σε σειρά με τον αντιστάτη και το βολτόμετρο παράλληλα με αυτόν. Η πηγή έχει τη δυνατότητα να παρέχει διάφορες τάσεις στο κύκλωμα.

#### Πείραμα

Τους πόλους μιας πηγής τους συνδέουμε με έναν αντιστάτη (εικόνα 10). Στο κύκλωμα παρεμβάλλουμε σε σειρά αμπερόμετρο Α.

Θα υποθέσουμε ότι η εσωτερική αντίσταση του αμπερομέτρου είναι μηδενική. Στα άκρα του αντιστάτη συνδέουμε βολτόμετρο Β. Θα υποθέσουμε ότι η εσωτερική αντίσταση του βολτόμετρου είναι "άπειρη". Αυτό σημαίνει ότι το βολτόμετρο δε διαρρέεται από ρεύμα. Θα υποθέσουμε, ακόμα, ότι μπορούμε, κατά βούληση, να μεταβάλλουμε τη διαφορά δυναμικού των πόλων της πηγής. Είναι φανερό ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη είναι ίση με τη διαφορά δυναμικού που επικρατεί ανάμεσα στους πόλους της πηγής. Δίνουμε στη διαφορά δυναμικού διάφορες τιμές και καταγράφουμε τις αντίστοιχες τιμές της έντασης. Κατασκευάζουμε τον πίνακα Ι



ΠΙΝΑΚΑΣ Ι		
Διαφορά δυναμικού V	Ένταση I	Διαφορά δυναμικού ένταση
10 V	0,1 A	100 V/A
20 V	0,2A	100V/A
30 V	0,3A	100V/A
40 V	0,4A	100V/A

Στην πρώτη στήλη καταγράφονται οι διαφορές δυναμικού που εφαρμόζονται στα άκρα του αντιστάτη. Στη δεύτερη στήλη καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές της έντασης του ρεύματος. Στην τρίτη στήλη καταγράφονται τα πηλίκα των αντίστοιχων τάσεων-εντάσεων.

### Συμπέρασμα

Από τη μελέτη του πίνακα φαίνεται ότι ο διπλασιασμός της διαφοράς δυναμικού έχει ως συνέπεια το διπλασιασμό της έντασης, ο τριπλασιασμός της διαφοράς δυναμικού τον τριπλασιασμό της έντασης κ.ο.κ. Παρατηρούμε ότι το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού και της αντίστοιχης έντασης παραμένει σταθερό. Το σταθερό αυτό πηλίκο το ονομάζουμε **αντίσταση** του αντιστάτη και το συμβολίζουμε με R.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

Η αντίσταση δοσμένου αντιστάτη είναι το σταθερό πηλίκο της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του αντιστάτη και της αντίστοιχης έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.

Η μονάδα αντίστασης, που προκύπτει από τη σχέση (3.2), αν θέσουμε  $V = 1\text{Volt}$  και  $I = 1\text{A}$ , ονομάζεται  $1\text{Ohm}$  και γράφεται  $1\Omega$ .

$$1\Omega = 1 \frac{\text{Volt}}{\text{A}}$$

**Θα λέμε ότι η αντίσταση ενός αντιστάτη είναι  $1\Omega$ , αν διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $1\text{A}$ , όταν στα άκρα του εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού  $1\text{ Volt}$ .**

Πολλαπλάσια

$$\begin{aligned} 1\text{K}\Omega &= 10^3 \Omega \\ 1\text{M}\Omega &= 10^6 \Omega \\ 1\text{G}\Omega &= 10^9 \Omega \\ 1\text{T}\Omega &= 10^{12} \Omega \end{aligned}$$

Υποπολλαπλάσια

$$\begin{aligned} 1\text{m}\Omega &= 10^{-3} \Omega \\ 1\mu\Omega &= 10^{-6} \Omega \\ 1\text{n}\Omega &= 10^{-9} \Omega \\ 1\text{p}\Omega &= 10^{-12} \Omega \end{aligned}$$

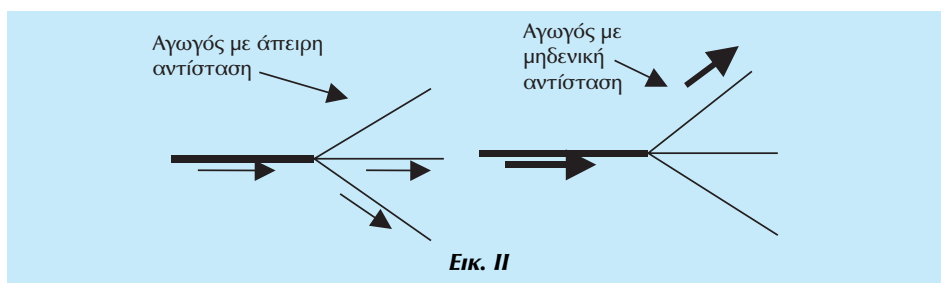
Από φυσική άποψη μπορούμε να πούμε ότι η αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία διόδου του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τα διάφορα υλικά και οφείλεται στις κρούσεις που κάνουν οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς με τα άλλα δομικά στοιχεία των σωμάτων (όπως π.χ. τα ιόντα στους μεταλλικούς αγωγούς).

Ο ρόλος του αντιστάτη σε ένα κύκλωμα είναι φανερός από την εξίσωση (3.2), σύμφωνα με την οποία η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αντίστασή του για σταθερή διαφορά δυναμικού.

$$I = \frac{1}{R} V \quad (3.3)$$

Από τη σχέση (3.3) φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του αντιστάτη τόσο μικρότερη είναι η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει. Είναι, λοιπόν, δυνατόν να ελέγχουμε την ένταση των ρευμάτων στα διάφορα κυκλώματα, επιλέγοντας κατάλληλες τιμές των αντιστάσεων των αντιστατών.

Στην ειδική περίπτωση που η αντίσταση ενός αντιστάτη έχει σχεδόν άπειρη τιμή, η ένταση του ρεύματος από τον αντιστάτη είναι σχεδόν μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι εάν το ρεύμα πρόκειται να διακλαδιστεί σε πολλούς δρόμους σε κάποιο σημείο Α, ο αγωγός με τη μεγαλύτερη αντίσταση θα διαρρέεται από το ρεύμα με τη μικρότερη ένταση. Αν κάποιος αγωγός έχει "άπειρη" αντίσταση, δε διαρρέεται καθόλου από ρεύμα. Αντίθετα, αν κάποιος αγωγός έχει μηδενική αντίσταση, θα τραβήξει όλο το ρεύμα μέσα από αυτόν (εικόνα 11).



Από πρακτική άποψη ένας ανοικτός διακόπτης έχει άπειρη αντίσταση, ενώ ένας κλειστός έχει μηδενική αντίσταση. Όταν σχεδιάζουμε κυκλώματα, οι αγωγοί σύνδεσης (καλώδια), επειδή, πρακτικά, έχουν μηδενική αντίσταση, σχεδιάζονται με ευθείες γραμμές.

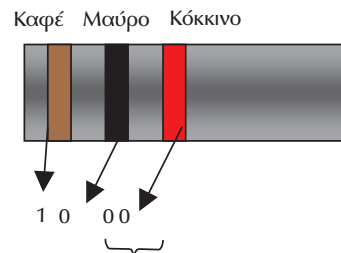
Η τιμή της αντίστασης ενός αντιστάτη καθορίζεται με τη βοήθεια ενός χρωματικού κώδικα. Κάθε αντιστάτης φέρει πάνω του τέσσερις έγχρωμες παράλληλες λωρίδες. Οι τρεις από αυτές είναι σχετικά κοντά η μία με την άλλη. Η τέταρτη βρίσκεται κάπως μακρύτερα. Οι πρώτες τρεις λωρίδες εκφράζουν την αντίσταση του αντιστάτη σε Ω. Ο κώδικας φαίνεται στον πίνακα II. Το χρώμα της πρώτης και της δεύτερης λωρίδας καθορίζουν τα δύο πρώτα ακέραια ψηφία της αντίστασης. Το χρώμα της τρίτης λωρίδας καθορίζει τον αριθμό των μηδενι-

κών της αντίστασης. Το χρώμα της τέταρτης λωρίδας καθορίζει την πιθανή απόκλιση της πραγματικής τιμής από την αναγραφόμενη, σύμφωνα με την επόμενη σύμβαση:

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι			
Χρώμα	1	2	Μηδενικά
Μαύρο	0	0	
Καφέ	1	1	0
Κόκκινο	2	2	00
Πορτοκαλί	3	3	000
Κίτρινο	4	4	0000
Πράσινο	5	5	00000
Γαλάζιο	6	6	000000
Ιώδες	7	7	0000000
Γρίζο	8	8	00000000
Λευκό	9	9	000000000

Κόκκινο χρώμα → απόκλιση 2%  
 Χρυσασφί → απόκλιση 5%  
 Ασημένιο → απόκλιση 10%

Η αντίσταση του αντιστάτη που φαίνεται στο απέναντι σχήμα είναι  $1000 \Omega = 1\text{K}\Omega$ .



Σε στενή σχέση με την έννοια της αντίστασης είναι η έννοια της αγωγιμότητας. Ως αγωγιμότητα  $G$  ενός αντιστάτη ορίζουμε το αντίστροφο της αντίστασής του:

$$G = \frac{1}{R} \quad (3.4)$$

Από φυσική άποψη η αγωγιμότητα ενός αντιστάτη εκφράζει την ευκολία διόδου του ηλεκτρικού ρεύματος από αυτόν.

Μονάδα αγωγιμότητας είναι το  $1\Omega^{-1}$ , όπως φαίνεται από τη σχέση (3.4).

### Παράδειγμα 1

Όταν στα άκρα ενός αγωγού εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού  $V = 256$  Volt, η ένταση του ρεύματος είναι  $I = 16\text{A}$ . Να υπολογίσετε:

1. Την αντίσταση του αγωγού.
2. Την ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει τον αγωγό, όταν στα άκρα του εφαρμόσουμε τάση  $V_1 = 16$  Volt.

**Λύση**

1. Για τον υπολογισμό της έντασης  $I$  θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (3) λυμένη ως προς την αντίσταση  $R$ . Θα έχουμε:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{256}{16} = 16\Omega$$

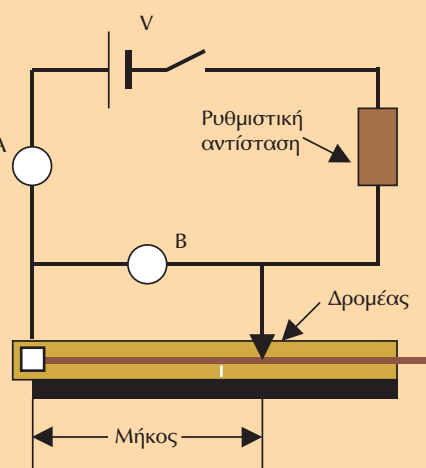
2. Για την περίπτωση που ο αγωγός αυτός τροφοδοτείται με τάση  $V_1 = 16$  Volt, η ένταση του ρεύματος θα υπολογιστεί από τη σχέση (3)

$$I_1 = \frac{V_1}{R} = \frac{16\text{Volt}}{16\Omega} = 1\text{A}$$

**Δραστηριότητα 3**

Θα προσπαθήσουμε από ένα δοσμένο σύρμα από ομογενές υλικό να κατασκευάσουμε έναν αντιστάτη με δοσμένη αντίσταση. Προηγουμένως, θα ερευνήσουμε πώς εξαρτάται η αντίσταση του σύρματος από το μήκος του.

Στο κύκλωμα φαίνεται ένας κανόνας με μήκος περίπου 1m, πάνω στον οποίο έχουμε τεντώσει το σύρμα που θα χρησιμοποιήσουμε. Έχουμε φροντίσει το αριστερό άκρο του σύρματος να συμπίπτει με το μηδέν της κλίμακας. Πάνω στο σύρμα μπορεί να ολισθαίνει ένας δρομέας. Η θέση του δρομέα καθορίζει το μήκος του σύρματος που διαρρέεται από ρεύμα. Οι ενδείξεις του αμπερόμετρου και του βολτόμετρου θα μας επιτρέψουν να υπολογίζουμε την αντίσταση του σύρματος για κάθε μήκος του. Σας συμβουλεύουμε να αρχίσετε από μικρό μήκος, π.χ 0,2m, το οποίο να αυξάνεται κατά ίσα ποσά σε κάθε νέα μέτρηση.

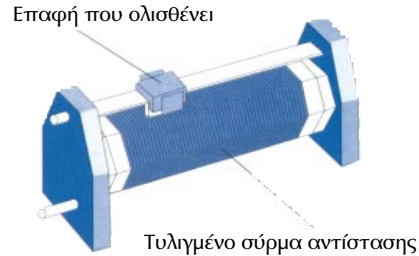


Τάση V(Volt)	Ένταση I(A)	Αντίσταση R(Ω)	Μήκος l(m)

1. Να παρετε μετρήσεις και να συμπληρώσετε τον αντίστοιχο πίνακα.
2. Από τη μελέτη του πίνακα να συμπεράνετε τον τρόπο εξάρτησης της αντίστασης του σύρματος από το μήκος του.
3. Με βάση το προηγούμενο συμπέρασμα να κατασκευάσετε αντίσταση



Η τελευταία δραστηριότητα μας βάζει στον πειρασμό να σκεφτούμε αν είναι δυνατόν να κατασκευάσουμε έναν αντιστάτη με μεταβλητή αντίσταση. Η απάντηση που μας δίνει η προηγούμενη δραστηριότητα είναι καταφατική. Εκείνο που έχουμε να κάνουμε είναι να τυλίξουμε ένα σύρμα σε ένα κυλινδρικό κομμάτι από μονωτικό υλικό και να χρησιμοποιήσουμε ένα δρομέα, ο οποίος να μπορεί να ολισθαίνει πάνω στο σύρμα. Με τη βοήθεια αυτής της ρυθμιζόμενης αντίστασης μπορούμε να ελέγχουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα.



### 3.9. Νόμος του Ohm

Σε προηγούμενη παράγραφο διαπιστώσαμε πειραματικά ότι όταν έχουμε έναν αντιστάτη, στα άκρα του οποίου εφαρμόζουμε συνεχή σταθερή διαφορά δυναμικού, της οποίας μπορούμε να μεταβάλλουμε την τιμή, το πηλίκο της τάσης και της αντίστοιχης έντασης παραμένει σταθερό. Αυτό το σταθερό πηλίκο το ονομάσαμε αντίσταση του αντιστάτη.

$$R = \frac{V}{I}$$

Αν λύσουμε την προηγούμενη σχέση ως προς  $I$ , θα έχουμε:

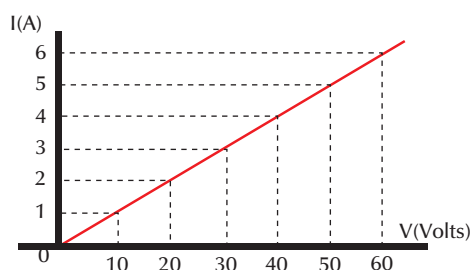
$$I = \frac{1}{R} V \quad (3.5)$$

Αυτή η σχέση εκφράζει την εξάρτηση της έντασης του ρεύματος (αποτελέσμα) από το αίτιο που το προκαλεί και το οποίο είναι η διαφορά δυναμικού (τάση). Δηλώνει ότι η ένταση του ρεύματος για αντιστάτη δοσμένης αντίστασης είναι ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της. Ο σταθερός συντελεστής αναλογίας είναι το αντίστροφο της αντίστασης του αντιστάτη, δηλαδή η αγωγιμότητά του.

#### Πείραμα

Θα επαναλάβουμε το πείραμα που περιγράφεται στην εικόνα 10. Εδώ μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε τη σχέση ανάμεσα στην τάση στα άκρα ενός αντιστάτη και την ένταση  $I$  του ρεύματος που αυτή η τάση προκαλεί. Θα επιλέξουμε έναν αντιστάτη (του οποίου την αντίσταση δε χρειάζεται να γνωρίζουμε). Στα άκρα του αντιστάτη θα εφαρμόζουμε τάση, της οποίας την τιμή μπορούμε να μεταβάλλουμε κάθε φορά. Το βολτόμετρο στα άκρα του αντιστάτη θα μας δίνει την τάση του. Με το αμπερόμετρο, που παρεμβάλλεται σε σειρά στο κύκλωμα, θα προσδιορίζουμε την τιμή της έντασης για κάθε τιμή της τάσης. Τα αποτελέσματα ενός τέτοιου πειράματος καταγράφονται στον πίνακα III.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι	
Τάση V(Volt)	Ένταση I(A)
10	1
20	2
30	3
40	4
50	5
60	6



Το επόμενο βήμα είναι να αποδώσουμε με γράφημα τη σχέση ανάμεσα στην τάση στα άκρα του αντιστάτη και την ένταση του ρεύματος. Παρατηρούμε ότι το γράφημα είναι ευθεία γραμμή, πράγμα που σημαίνει ότι η τάση στα άκρα του αντιστάτη και η ένταση του ρεύματος είναι μεγέθη ανάλογα.

### Συμπέρασμα

Το πείραμα αναδεικνύει την αναλογία ανάμεσα στην τάση που εφαρμόζεται στα άκρα δοσμένου αντιστάτη και της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτή η διαπίστωση, ακριβώς, αποτελεί και το ουσιαστικό περιεχόμενο του νόμου του ΟΗΜ.

### Διατύπωση του νόμου του ΟΗΜ για αντιστάτη

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει δοσμένο αντιστάτη είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού (τάσης) που εφαρμόζεται στα άκρα του.

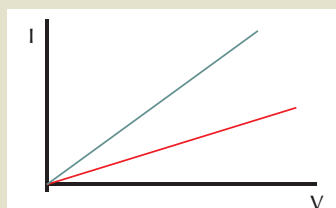
Η σχέση του νόμου του Ohm μπορεί να έχει τις επόμενες μορφές:

$$I = \frac{V}{R} \quad V = IR \quad R = \frac{V}{I}$$

Παρατηρούμε ότι η σχέση  $V=IR$  είναι πρωτοβάθμια ως προς τις μεταβλητές  $I$  και  $V$ . Αυτό σημαίνει ότι η γραφική παράσταση της πρέπει να είναι ευθεία γραμμή. Να παρατηρήσετε ακόμα τη γωνία που σχηματίζει το γράφημα της σχέσης με τον οριζόντιο άξονα. Κάποιος τριγωνομετρικός αριθμός αυτής της γωνίας προσδιορίζει κάποιο σταθερό στοιχείο του αντιστάτη. Ποιος είναι ο τριγωνομετρικός αριθμός και ποιο στοιχείο προσδιορίζει;

### Σκεφτείτε...

Στο απέναντι διάγραμμα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις του νόμου του Ohm για δύο διαφορετικούς αντιστάτες. Προσπαθήστε να προσδιορίσετε ποιος από τους δύο έχει μεγαλύτερη αντίσταση.



### Παράδειγμα 3

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αντιστάτη με αντίσταση  $R_2=3\Omega$  είναι  $I_2=10A$ . Να υπολογιστούν οι εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τους αντιστάτες και οι τάσεις στα άκρα τους. Οι αντιστάσεις των άλλων αντιστατών είναι  $R_1=8\Omega$  και  $R_3=6\Omega$ .

### Λύση

Η τάση  $V_{BF}$  στα άκρα του αντιστάτη  $R_2$  θα είναι, σύμφωνα με το νόμο του Ohm:

$$V_{BF} = I_2 R_2 = 10 \times 3 = 30 \text{ V.}$$

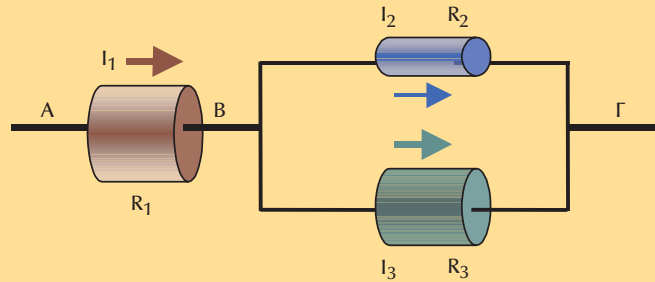
Η ίδια τάση θα επικρατεί και στα άκρα του αντιστάτη  $R_3$  (οι  $R_2$  και  $R_3$  έχουν τα ίδια άκρα). Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αντιστάτη  $R_3$  θα είναι σύμφωνα με το νόμο του Ohm :  $I_3 = V_{BF} / R_3 = 30/6 = 5\text{A}$ .

Είναι φανερό ότι η ένταση  $I_1$  θα ισούται με το άθροισμα των εντάσεων  $I_2$  και  $I_3$ . Έτσι  $I_1 = I_2 + I_3 = 15\text{A}$ .

Η τάση στα άκρα του αντιστάτη με αντίσταση  $R_1$  θα είναι σύμφωνα με τον νόμο του Ohm:  $V_{AB} = I_1 \times R_1 = 15 \times 8 = 120\text{V}$ .

Η τάση στα άκρα ολόκληρου του κυκλώματος θα είναι

$$V_{AG} = V_{AB} + V_{BF} = 150\text{V}.$$

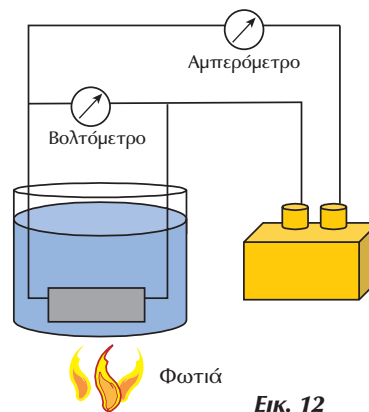


## 3.10 Μεταβολή αντίστασης με τη θερμοκρασία

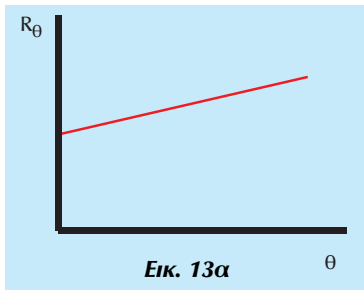
Υα μελετήσουμε πειραματικά την εξάρτηση της αντίστασης ενός αντιστάτη από τη θερμοκρασία.

### Πείραμα

Ο μεταλλικός αντιστάτης είναι βυθισμένος σε νερό το οποίο θερμαίνουμε. Η τάση στα άκρα του είναι σταθερή και αυτό εξασφαλίζεται από την πηγή συνεχούς σταθερής τάσης. Στο κύκλωμα έχει τοποθετηθεί σε σειρά αμπερόμετρο, που καταγράφει τις τιμές της έντασης που διαρρέει το κύκλωμα. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε τη θέρμανση, η ένδειξη του αμπερόμετρου μεταβάλλεται. Το αμπερόμετρο καταγράφει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, δηλαδή το πηλίκο  $I = V / R$ . Εφόσον η τάση  $V$  παραμένει σταθερή, ο μόνος λόγος για τον οποίο μπορεί να μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος είναι η μεταβολή της αντίστασης.



Εικ. 12



Εικ. 13α

Για κάθε τιμή της θερμοκρασίας καταγράφουμε τις αντίστοιχες τιμές τάσης και έντασης και του πηλίκου τους, που είναι η τιμή της αντίστασης του αντιστάτη στη θερμοκρασία μέτρησης. Αν αποδώσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε διάγραμμα  $R_\theta - \theta$ , θα πάρουμε την καμπύλη που φαίνεται στην εικόνα 13α.

### Συμπέρασμα

**Η αντίσταση των μεταλλικών αγωγών αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.**

Λεπτομερής πειραματική έρευνα έχει προσδιορίσει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η αντίσταση ενός αντιστάτη, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Η σχέση στην οποία καταλήγουμε είναι :

$$R_\theta = R_0 (1 + \alpha\theta = \alpha\theta) \quad (3.6)$$

$R_\theta$  : η αντίσταση σε θερμοκρασία  $\theta$

$R_0$  : η αντίσταση σε θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$

$\theta$  : η θερμοκρασία του αντιστάτη όταν η αντίσταση είναι

$\alpha$  : συντελεστής που εξαρτάται κυρίως από τη φύση του υλικού του αντιστάτη και ονομάζεται **θερμικός συντελεστής αντίστασης** του υλικού του αντιστάτη.

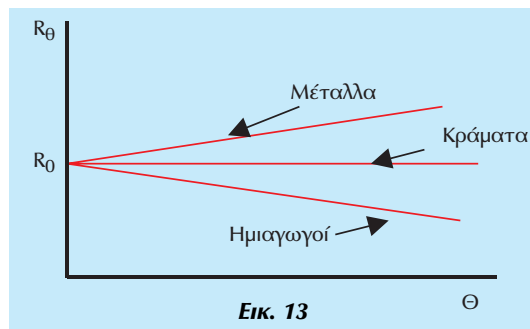
Στη σχέση (3.6) τα μεταβλητά μεγέθη είναι η θερμοκρασία  $\theta$  και η αντίσταση  $R_\theta$ . Όπως βλέπετε, η σχέση είναι πρωτοβάθμια (με την προϋπόθεση ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν είναι πολύ μεγάλη).

Αυτό σημαίνει ότι το γράφημα θα είναι ευθεία γραμμή. Προσέξτε όμως: αν στη σχέση βάλουμε  $\theta=0$ , προκύπτει  $R_\theta = R_0$ . Αυτό σημαίνει ότι η ευθεία δεν περνάει από το σημείο  $(0,0)$ , αλλά τέμνει τον άξονα των αντιστάσεων στο σημείο  $R_0$ .

Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης  $\alpha$  εξαρτάται από τη φύση του υλικού του αντιστάτη και μπορεί να έχει θετικές τιμές, αρνητικές τιμές ή και τιμή μηδέν (εικόνα 13β).

- $\alpha > 0$ . Η τιμή του  $\alpha$  είναι θετική για τους μεταλλικούς αντιστάτες. Στην περίπτωση αυτή, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η αντίσταση

- $\alpha < 0$ . Η τιμή του  $\alpha$  είναι αρνητική για τους ημιαγωγούς και για τα διαλύματα ηλεκτρολυτών. Στην περίπτωση αυτή, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία,



Εικ. 13

ελαττώνεται η αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η αγωγιμότητα, δηλαδή οι ημιαγωγοί και τα διαλύματα ηλεκτρολυτών γίνονται περισσότερο αγωγίμα.

- $\alpha = 0$  Υπάρχουν κάποια κράματα για τα οποία η τιμή του  $\alpha$  είναι μηδέν. Τέτοια κράματα είναι η κοσταντάνη, η χρωμονικελίνη, η μαγγανίνη κ.ά. Στα κράματα αυτά η αντίσταση παραμένει σταθερή, ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

Η μονάδα του θερμικού συντελεστή αντίστασης στο SI είναι  $1 \text{ grad}^{-1}$

#### Παράδειγμα 4

Η αντίσταση του αντιστάτη μιας ηλεκτρικής συσκευής όταν λειτουργεί κανονικά είναι δεκαπλάσια της αντίστασης της συσκευής "εν κενώ", (όταν, δηλαδή, δε λειτουργεί). Αν η θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας είναι  $\theta = 2000 \text{ C}$ , να υπολογίσετε το θερμικό συντελεστή αντίστασης του υλικού του αντιστάτη.

#### Λύση

Ας ονομάσουμε  $R_\theta$  και  $R_0$  τις τιμές αντίστασης του αντιστάτη σε θερμοκρασίες  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  και περιβάλλοντος, αντίστοιχα. Από τη σχέση  $R_\theta = R_0 (1 + \alpha\theta)$  έχουμε με αντικατάσταση  $10R_0 = R_0 (1 + \alpha\theta)$ . Από αυτήν προκύπτει με επίλυση ως προς  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{9}{\theta} = \frac{9}{2000^\circ\text{C}} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ C}^{-1}$$

### 3.11 Σύνδεση αντιστατών

Στα διάφορα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται αντιστάτες που συνδέονται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τις ανάγκες που πρέπει να εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο κύκλωμα. Πολλές φορές στην ανάλυση των κυκλωμάτων και για τον υπολογισμό των επιδόσεών τους χρειάζεται να αντικαταστήσουμε (θεωρητικά) διάφορους αντιστάτες με λιγότερους ή και με έναν και μόνο, χωρίς, όμως, να μεταβληθούν οι γενικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι κάνουμε σύνδεση αντιστατών. Ο αντιστάτης που αντικαθιστά τους άλλους ονομάζεται **ισοδύναμος αντιστάτης** και η αντίστασή του **ισοδύναμη αντίσταση**.

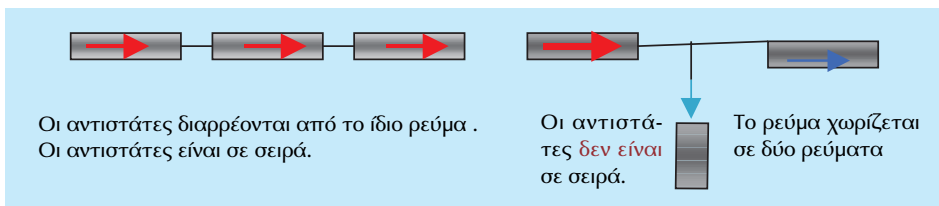
**Ισοδύναμος αντιστάτης ενός συνόλου αντιστατών οι οποίοι αποτελούν μέρος κυκλώματος στο οποίο εφαρμόζεται τάση  $V$  και το οποίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$ , είναι εκείνος ο αντιστάτης που, αν αντικαταστήσει τους δοσμένους και τροφοδοτηθεί με την ίδια τάση, θα διαρρέεται από ρεύμα της ίδιας έντασης  $I$ .**



Θα εξετάσουμε δύο τρόπους σύνδεσης αντιστατών : τη **σύνδεση σε σειρά** και **την παράλληλη σύνδεση**

### A. Σύνδεση σε σειρά

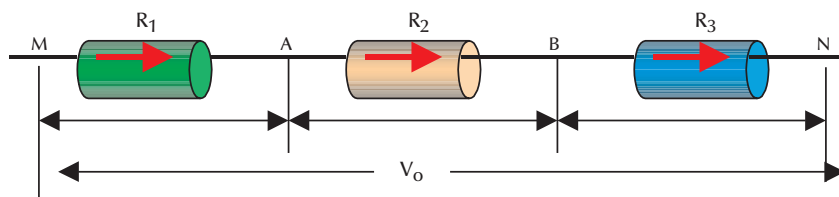
Θα λέμε ότι κάποιοι αντιστάτες είναι συνδεσμολογημένοι σε σειρά, αν όλοι διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Το πρακτικό κριτήριο της σύνδεσης σε σειρά είναι να μην υπάρχει μεταξύ δύο, οποιωνδήποτε, κάποια διακλάδωση.



Στην εικόνα (14) φαίνεται πώς γίνεται στην πράξη η σύνδεση αντιστατών.



Εικ. 14



Εικ. 15

Θα υπολογίσουμε την αντίσταση του ισοδύναμου αντιστάτη των τριών αντιστατών του κυκλώματος της εικόνας (15).

Ας πούμε ότι οι αντιστάσεις των αντιστατών είναι  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

Ας ονομάσουμε  $V_0$  τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του συστήματος των τριών αντιστατών και  $I_0$  την ένταση του ρεύματος που τους διαρρέει. Χρησιμοποιούμε τον νόμο του Ohm , για να εκφράσουμε τις τάσεις στα άκρα των αντιστατών.