

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΥΠΡΟΥ | ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΦΥΣΙΚΗ Β' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ

ΜΕΡΟΣ Β' ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ



ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

ΜΕΡΟΣ Β'

ΦΥΣΙΚΗ Β' ΛΥΚΕΙΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ

Συγγραφή:

Γεώργιος Αρχοντής, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Φώτιος Πτωχός, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Νικόλαος Τούμπας, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Ζαχαρίας Ζαχαρία, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Τμήμα Επιστημών της Αγωγής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Μιχάλης Ιωάννου, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Ιωάννης Καρμιώτης, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Σάββας Πολυδωρίδης, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Δημήτριος Φιλίππου, Φυσικός,
Βοηθός Διευθυντής Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Παναγιώτης Ελευθερίου,
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής
Γιαννάκης Χατζηκωστής,
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής
Αντώνης Τσάκωνας, Φυσικός,
Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης

Επιμέλεια σχημάτων:

Σχεδιασμός έκδοσης:

Έλενα Ηλιάδου, Λειτουργός Υπηρεσίας
Ανάπτυξης Προγραμμάτων

Επιμέλεια έκδοσης:

Μαρίνα Άστρα-Ιωάννου, Λειτουργός Υπηρεσίας
Ανάπτυξης Προγραμμάτων

Συντονισμός έκδοσης:

Χρίστος Παρπούνας, Συντονιστής Υπηρεσίας
Ανάπτυξης Προγραμμάτων

Α' Έκδοση 2017

Ανατύπωση 2018 (Με μικροδιορθώσεις)

Εκτύπωση: Printco Manufacturing & Trading Ltd

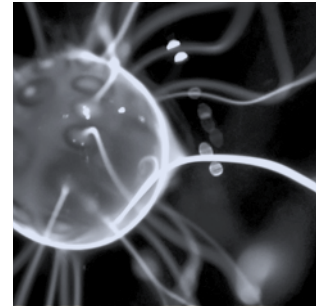
© ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ISBN: 978-9963-54-124-9





ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διασφάλιση της ποιότητας ζωής στον αιώνα που διανύουμε, βασίζεται ολοένα και περισσότερο στην επιστημονική και τεχνολογική πρόοδο. Η απόκτηση εκπαίδευσης και δεξιοτήτων στην επιστήμη είναι απαραίτητη για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης και εδραίωσης της πραγματικής δημοκρατίας.

Με ιδιαίτερη χαρά προλογίζω την έκδοση του βιβλίου «Φυσική Β΄ Λυκείου». Το βιβλίο αυτό γράφτηκε με τη σκέψη ότι εσείς, οι σημερινοί μαθητές και οι αυριανοί πολίτες, θα πρέπει να δομήσετε ένα συνεκτικό σώμα γνώσεων, να αναπτύξετε τις αναγκαίες δεξιότητες και ικανότητες για συμμετοχή σε μια κοινωνία ενεργών και κριτικά σκεπτόμενων ανθρώπων και να διαμορφώσετε θετικές στάσεις και συμπεριφορές έναντι της επιστήμης. Γι' αυτό τον λόγο σε αυτό το βιβλίο τα θέματα της Φυσικής συνδέονται με την καθημερινή ζωή, τη φύση και την εξέλιξη της επιστήμης.

Επιθυμώ να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους πανεπιστημιακούς Γεώργιο Αρχοντή, Ζαχαρία Ζαχαρία, Φώτιο Πτωχό, Νικόλαο Τούμπα, στους εκπαιδευτικούς Μιχάλη Ιωάννου, Ιωάννη Καρμιώτη, Σάββα Πολυδωρίδη και Δημήτριο Φιλίππου, και στους Επιθεωρητές Φυσικής Παναγιώτη Ελευθερίου και Γιαννάκη Χατζηκωστή, που ασχολήθηκαν με τη συγγραφή του βιβλίου.

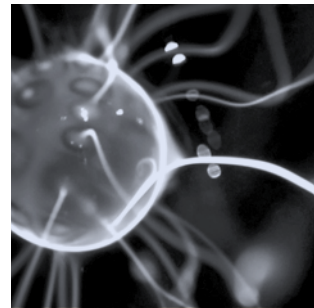
Τέλος, ευχαριστώ την Υπηρεσία Ανάπτυξης Προγραμμάτων που είχε την ευθύνη για την έκδοση του βιβλίου αυτού.

Δρ Κυπριανός Λούης
Διευθυντής Μέσης Εκπαίδευσης





ΛΙΓΑ ΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΟ ΒΙΒΛΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΗΣ Β΄ ΛΥΚΕΙΟΥ



Αγαπητοί και αγαπητές μαθήτριες και μαθητές,

Σας καλωσορίζουμε στη νέα σχολική χρονιά, και σας ευχόμαστε, με αφετηρία αυτό το βιβλίο, να κάνετε ένα συναρπαστικό ταξίδι στον θαυμαστό κόσμο της Φυσικής.

Από τα βάθη της αρχαιότητας, οι άνθρωποι προσπαθούν να ερμηνεύσουν τα φαινόμενα του φυσικού κόσμου. Τον 6ο αιώνα π.Χ. οι αρχαίοι Έλληνες φυσικοί φιλόσοφοι της Ιωνίας βασίσθηκαν σε λογικά επιχειρήματα και διατύπωσαν τις πρώτες θεωρίες για την αρχή των όντων. Η σύγχρονη επιστημονική μεθοδολογία θεμελιώθηκε τον 17ο αιώνα από τον Γαλιλαίο (Galileo Galilei) και θέτει ως προϋπόθεση τη διεξαγωγή και ερμηνεία κατάλληλα σχεδιασμένων πειραμάτων. Σε συνδυασμό με την πειραματική μεθοδολογία, ο Γαλιλαίος τόνιζε ότι για την ερμηνεία των νόμων της Φύσης είναι απαραίτητη η χρήση των μαθηματικών (“το βιβλίο της Φύσης είναι γραμμένο με μαθηματικούς χαρακτήρες”). Τον ίδιο αιώνα, ο Ισαάκ Νεύτωνας διατύπωσε τους νόμους της κίνησης και τον νόμο της παγκόσμιας έλξης, στο φημισμένο έργο του *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Οι σύγχρονες Φυσικές θεωρίες και πειράματα μελετούν και ερμηνεύουν σε μεγάλο βαθμό φαινόμενα που παρατηρούνται τόσο σε υποατομική, όσο και σε αστρονομική κλίμακα, από τη συμπεριφορά των στοιχειωδών σωματιδίων μέχρι τη δημιουργία αστέρων και την εξέλιξη του Σύμπαντος.

Σε συνδυασμό με την κατανόηση της συμπεριφοράς του Φυσικού κόσμου, η Φυσική έχει αναρίθμητες **πρακτικές εφαρμογές**. Η λειτουργία των συσκευών που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή ζωή για την παραγωγή φωτός, την παραγωγή και χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, την απορρόφηση ηλιακής ενέργειας, την κίνηση, την επικοινωνία και την ψυχαγωγία, βασίζεται σε φυσικές αρχές.

Στα μέσα του 20ου αιώνα, ο φημισμένος Αυστριακός Φυσικός Erwin Schrodinger, διατύπωσε στο βιβλίο του “*What is Life*” την άποψη ότι η Φυσική μπορεί να συνεισφέρει και στην κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται σε ζωντανούς οργανισμούς (**έμβια** ύλη). Η





αλματώδης ανάπτυξη όλων των Φυσικών Επιστημών, ιδιαίτερα από τις αρχές του εικοστού αιώνα, καθιστά δυνατή τη μελέτη και την ερμηνεία της συμπεριφοράς της έμβιας ύλης με μία **διεπιστημονική προσέγγιση**, στην οποία συνδυάζονται μέθοδοι από πολλές επιστημονικές περιοχές (Φυσική, Χημεία, Βιολογία, κλάδοι Μηχανικής). Πειραματικές συσκευές που βασίζονται σε φυσικές αρχές, όπως το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, το μικροσκόπιο φθορισμού, το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης και το σύγχροτρο προσφέρουν λεπτομερείς εικόνες της δομής του κυττάρου και των βιολογικών μορίων. Οι εικόνες αυτές, μαζί με θεωρητικά φυσικά μοντέλα για τη δομή και τις δυνάμεις μεταξύ μορίων, χρησιμοποιούνται στο στοχευμένο σχεδιασμό φαρμάκων. Ταυτόχρονα, η Φυσική συνεισφέρει ουσιαστικά σε πολλές διαγνωστικές και θεραπευτικές τεχνικές της σύγχρονης Ιατρικής, όπως η χρήση υπερήχων, ο πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός (MRI), η τομογραφία ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου (PET scan), η ακτινοβολία καρκινικών όγκων.

Οι αλματώδεις εξελίξεις που περιγράψαμε υποδεικνύουν ότι η Φυσική είναι ένας εξαιρετικά υποσχόμενος τομέας απασχόλησης για τους νέους ανθρώπους, που θα συνεισφέρουν στην πρόοδο της ανθρωπότητας, παίρνοντας τη σκυτάλη από τους παλαιότερους.

Το βιβλίο που έχετε στα χέρια σας αποτελεί ένα περιεκτικό και πλήρες κείμενο αναφοράς, που συμβαδίζει πιστά με το Αναλυτικό Πρόγραμμα.

Κάθε κεφάλαιο περιλαμβάνει:

- Αρχική σύνοψη των διδακτικών στόχων,
- Ανάπτυξη της αντίστοιχης θεωρίας με συνδυασμό αναπαραστάσεων (κείμενο και εικόνες, διαγράμματα, γραφικές παραστάσεις, πίνακες).
- Ερωτήσεις ελέγχου κατανόησης εννοιών
- Πολυάριθμα λυμένα παραδείγματα
- Τελικές ερωτήσεις ανακεφαλαίωσης και κατανόησης
- Άλυτες ασκήσεις.

Η **σύνοψη των διδακτικών στόχων** συνιστά έναν οδηγό για το τι πρέπει να γνωρίζετε με την ολοκλήρωση της μελέτης του κεφαλαίου. Οι συνοδευτικές αναπαραστάσεις (εικόνες, διαγράμματα, γραφικές παραστάσεις, πίνακες) επεξηγούν πτυχές της θεωρίας και πρέπει να μελετώνται σε συνδυασμό με το γραπτό κείμενο.

Η **μελέτη των λυμένων παραδειγμάτων** είναι **απαραίτητη** προϋπόθεση για την κατανόηση της θεωρίας και πρέπει να προηγείται της επίλυσης των άλυτων ασκήσεων στο τέλος του βιβλίου. Ο στόχος των παραδειγμάτων είναι διπλός: **(1)** παρουσιάζουν τη μεθοδολογία επί-



λυσης μίας κατηγορίας προβλημάτων. **(2)** αναδεικνύουν λεπτομερώς τον τρόπο γραφής και τον χειρισμό μαθηματικών συμβόλων, εξισώσεων και μονάδων μέτρησης, που υιοθετείται στη διεθνή πρακτική.

Οι **ερωτήσεις ελέγχου κατανόησης** αναφέρονται σε επιλεγμένα σημεία του κειμένου, και αποσκοπούν στον έλεγχο της κατανόησης βασικών εννοιών. Εάν διαπιστώνετε έλλειψη κατανόησης, πρέπει να αφιερώνετε επιπλέον χρόνο πριν προχωρήσετε στα επόμενα σημεία του κειμένου.

Οι **τελικές ερωτήσεις κατανόησης** ελέγχουν την κατανόηση του συνολικού περιεχομένου του κεφαλαίου, και βοηθούν στην ανακεφαλαίωση. Σε περίπτωση που εντοπίζετε δυσκολίες, πρέπει να μελετήσετε ξανά το σχετικό περιεχόμενο και τα συνοδευτικά παραδείγματα.

Η **επίλυση προβλημάτων** είναι **απαραίτητο και αναντικατάστατο στοιχείο** της εκπαίδευσης στη Φυσική. Τόσο η Πειραματική, όσο και η Θεωρητική Φυσική έχουν σημαντική ποσοτική συνιστώσα. Μαζί με την ανάπτυξη ικανοτήτων διερεύνησης και διατύπωσης συμπερασμάτων, είναι απαραίτητη και η σταδιακή ωρίμανση σας στην ποσοτική επεξεργασία δεδομένων. Γι' αυτό το λόγο έχουμε συμπεριλάβει στο βιβλίο πολυάριθμα λυμένα παραδείγματα και ασκήσεις κλιμακούμενης δυσκολίας. Επίσης, είναι σημαντικό να γνωρίζετε ότι φροντίσαμε ώστε το κείμενο να βασίζεται στις ήδη αποκτηθείσες γνώσεις Μαθηματικών σας, χωρίς να τις υπερβαίνει.

Για να επιτύχετε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, σας εισηγούμαστε όπως μελετάτε πρώτα το επιστημονικό περιεχόμενο μίας ενότητας, τα αντίστοιχα λυμένα παραδείγματα και τις ερωτήσεις ελέγχου κατανόησης εννοιών, πριν προχωρήσετε στο επόμενο μέρος. Στο τέλος, ασχοληθείτε με την επίλυση των άλυτων ασκήσεων. Οι άλυτες ασκήσεις βασίζονται στη θεωρία και τα λυμένα παραδείγματα. **Μην** προσπαθείτε να λύσετε τις ασκήσεις πριν συμβουλευτείτε το κείμενο, γιατί θα δυσκολευτείτε πολύ περισσότερο.

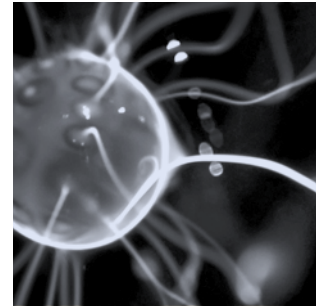
Το βιβλίο αποτελεί οδηγό μελέτης, αλλά το βασικό και αναντικατάστατο σημείο αναφοράς είναι ο/η εκπαιδευτικός σας. Πρέπει να δίνετε εξαιρετική προσοχή στις διαλέξεις, να συμμετέχετε ενεργά, και να συμβουλευέστε εγκαίρως τον/την εκπαιδευτικό σας για σημεία στα οποία εντοπίζετε έλλειψη κατανόησης.

Ευχόμαστε να βρείτε το βιβλίο χρήσιμο, και σας ευχόμαστε **Καλή Νέα Σχολική Χρονιά**.

Η Συγγραφική Ομάδα







ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ	15
7.1. Η Δομή του Ατόμου	18
7.2. Ηλεκτρικά Φορτισμένα Άτομα και Μόρια (Ιόντα)	21
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	22
7.3. Η Κβάντωση του Ηλεκτρικού Φορτίου	23
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	23
7.4. Μονωτές και Αγωγοί	24
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	25
Ερωτήσεις Κατανόησης	25
Ερωτήσεις	26
7.5. Φόρτιση με Επαφή ή Τριβή	26
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	27
7.6. Διατήρηση Ηλεκτρικού Φορτίου	28
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	28
7.7. Φόρτιση Αγώγιμων Σωμάτων	28
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	29
7.8. Ηλέκτριση ενός Αγωγού	29
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	30
Ερωτήσεις Κατανόησης	30
7.9. Όργανα Ανίχνευσης Ηλεκτρικού Φορτίου	30
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	32

	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	33
	Ασκήσεις	33
7.10.	Ο Νόμος του Coulomb	34
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	35
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	43
7.11.	Πόλωση ενός Μονωτή	44
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	46
	Ερωτήσεις Κατανόησης	47
	Ασκήσεις	47
7.12.	Η Έννοια του Ηλεκτρικού Πεδίου	49
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	50
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	52
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	53
	Ένθετο	55
7.13.	Ηλεκτρικές Δυναμικές Γραμμές	56
7.14.	Παραδείγματα Υπολογισμού της Συνισταμένης Έντασης Περισσότερων Σημειακών Φορτίων	58
	Ένθετο	60
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	61
7.15.	Η Έννοια του Βαρυτικού Πεδίου	61
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	63
7.16.	Το Ομογενές Ηλεκτρικό Πεδίο	63
	Ερωτήσεις Κατανόησης	65
	Ασκήσεις	66
7.17.	Το Έργο της Ηλεκτροστατικής Δύναμης	67
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	69
7.18.	Η Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια Συστήματος δύο Στατικών Σημειακών Φορτίων	70
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	71
7.19.	Σχέση Έργου Ηλεκτρικής Δύναμης και Μεταβολής στην Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια	72
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	74
7.20.	Η Έννοια του Ηλεκτροστατικού Δυναμικού	75
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	78

7.21.	Το Συνολικό Ηλεκτροστατικό Δυναμικό Περισσότερων Σημειακών Φορτίων	78
7.22.	Η Φυσική Σημασία της Διαφοράς Ηλεκτροστατικού Δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του Χώρου	81
	Ένθετο	82
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	82
7.23.	Σχέση Έντασης και Διαφοράς Δυναμικού μεταξύ Σημείων Ομογενούς Ηλεκτρικού Πεδίου	83
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	84
7.24.	Η Έννοια της Ισοδυναμικής Επιφάνειας	85
	Ερωτήσεις Κατανόησης	86
	Ασκήσεις	88
	Απαντήσεις Ελέγχου Κατανόησης Εννοιών	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ **97**

8.1.	Το Ηλεκτρικό Πεδίο δημιουργεί προσανατολισμένη Ροή Φορέων Φορτίου σε έναν Αγωγό	100
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	101
8.2.	Ένας Αγωγός διαρρέεται από Ρεύμα, εάν και μόνο εάν το Ηλεκτρικό Δυναμικό δεν είναι σταθερό σε όλα τα σημεία του	102
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	103
8.3.	Η Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος	103
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	105
	Ερωτήσεις Κατανόησης	106
	Ασκήσεις	106
8.4.	Σχέση Έντασης Ρεύματος - Διαφοράς Δυναμικού: ο Νόμος του Ohm	107
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	108
8.5.	Η Αντίσταση ενός Υλικού	109
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	110
8.6.	Η Αντίσταση ενός Μεταλλικού Σύρματος με σταθερή Διατομή	111
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	114
	Ερωτήσεις Κατανόησης	114

	Ασκήσεις	115
8.7.	Η Ηλεκτρική Πηγή	116
8.8.	Ένα απλό Κύκλωμα	117
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	119
8.9.	Ροοστάτης και Διαιρέτης Τάσης (Ποτενσιόμετρο)	120
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	122
8.10.	Συνδεσμολογία Αντιστάσεων	122
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	124
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	129
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	131
	Ερωτήσεις	131
8.11.	Εφαρμογές της Συνδεσμολογίας Αντιστατών	132
	Ερωτήσεις Κατανόησης	137
	Ερωτήσεις	139
	Ασκήσεις	140
8.12.	Ηλεκτρική Ισχύς και Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μία Συσσκευή	142
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	145
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	149
	Ερωτήσεις Κατανόησης	150
	Ασκήσεις	151
8.13.	Η Έννοια της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης Πηγής (ΗΕΔ)	152
	Ένθετο	156
	Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών	158
	Ασκήσεις	159
8.14.	Οι Κανόνες του Kirchhoff (Κίρκωφ)	159
	Ένθετο	163
	Ερωτήσεις Κατανόησης	165
	Ασκήσεις	166
	Απαντήσεις Ελέγχου Κατανόησης Εννοιών	167





ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Στο Κεφάλαιο 7:

- **Περιγράφουμε** τη δομή του ατόμου.
- **Ορίζουμε** το φυσικό μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου και εξηγούμε ότι το φορτίο εμφανίζεται σε δύο είδη, το «θετικό» και το «αρνητικό»: Φορτία του ίδιου είδους απωθούνται και φορτία διαφορετικού είδους έλκονται.
- **Αναφέρουμε** το ηλεκτρικό φορτίο των συστατικών σωματιδίων του ατόμου (ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο και νετρόνιο).
- **Εξηγούμε** ότι το αρνητικό ή θετικό φορτίο των ατόμων και μορίων οφείλεται σε περίσσεια ή έλλειμμα ηλεκτρονίων.
- **Εξηγούμε** ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο, δηλαδή μεταβάλλεται κατά ακέραια πολλαπλάσια μίας χαρακτηριστικής ποσότητας φορτίου.
- **Διαχωρίζουμε** τα διάφορα υλικά σε μονωτές και αγωγούς, με βάση την ευκολία της ελεύθερης κίνησης ηλεκτρικού φορτίου σε αυτά.
- **Περιγράφουμε** διάφορους τρόπους φόρτισης σωμάτων (μονωτών με επαφή και αγωγών με επαφή ή επαγωγή).
- **Εξηγούμε** ότι κατά τη φόρτιση σωμάτων το συνολικό φορτίο διατηρείται.
- **Περιγράφουμε** την εξάρτηση της ηλεκτρικής δύναμης δύο σημειακών φορτίων από τα φορτία και την απόσταση μεταξύ τους (νόμος του Coulomb).





ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

- **Εξηγούμε** ότι η ηλεκτρική δύναμη, που δρα σε ένα φορτίο από μία κατανομή σημειακών φορτίων, ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb από κάθε φορτίο ξεχωριστά (αρχή της υπέρθεσης).
- **Ορίζουμε** το φυσικό μέγεθος της Έντασης ηλεκτρικού πεδίου.
- **Υπολογίζουμε** την ένταση ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ένα ή περισσότερα σημειακά φορτία.
- **Εξηγούμε** ότι το ηλεκτρικό πεδίο μίας ομάδας φορτίων απεικονίζεται με τη βοήθεια των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών.
- **Μελετούμε** το έργο της ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου στην παρουσία ενός δεύτερου ακίνητου (στατικού) φορτίου.
- **Εξηγούμε** ότι οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι διατηρητικές.
- **Ορίζουμε** την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια συστήματος στατικών φορτίων.
- **Συνδέουμε** το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης με τη μεταβολή της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας.
- **Εισάγουμε** το φυσικό μέγεθος του ηλεκτροστατικού δυναμικού.
- **Υπολογίζουμε** το ηλεκτροστατικό δυναμικό σημειακού φορτίου.
- **Συνδέουμε** το έργο της ηλεκτρικής δύναμης με τη διαφορά ηλεκτροστατικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων.
- **Δείχνουμε** ότι η ένταση ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου ισούται με την αρνητική διαφορά δυναμικού ανά μονάδα μήκους, κατά μήκος μίας δυναμικής γραμμής.
- **Εξηγούμε** την έννοια της ισοδυναμικής επιφάνειας.



Στην Α΄ Λυκείου είχαμε αναφέρει ότι όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων ταξινομούνται σε τέσσερις θεμελιώδεις κατηγορίες: τις βαρυτικές, τις ηλεκτρομαγνητικές, τις ισχυρές πυρηνικές και τις ασθενείς πυρηνικές. Στη διάρκεια της φετινής χρονιάς, στο **Κεφάλαιο 5** μελετήσαμε τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις και εξάγαμε τον Νόμο της Παγκόσμιας Έλξης. Σε αυτό το Κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

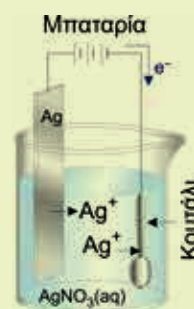
Εάν εξαιρέσουμε τη βαρυτική έλξη, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις είναι υπεύθυνες για όλα τα υπόλοιπα φαινόμενα που παρατηρούμε στην καθημερινή μας ζωή. **Δυνάμεις από απόσταση** όπως η έλξη κόκκων σκόνης από μία επιφάνεια, η άπωση μεταξύ δύο γυάλινων ραβδίων όταν τα τρίψουμε με μάλλινο ύφασμα, η έλξη κομματιών χαρτιού από μία φορτισμένη πλαστική πέννα, αλλά και **δυνάμεις επαφής** όπως η δύναμη ελατηρίου, η τάση ενός σχοινού, η κάθετη δύναμη από μία επιφάνεια, η τριβή, η αντίσταση του αέρα ή του νερού στην κίνηση σωμάτων, οφείλονται στην ηλεκτρομαγνητική έλξη ή άπωση ανάμεσα στα άτομα ή μόρια ενός ή περισσότερων σωμάτων.

Η λέξη “ηλεκτρισμός” προέρχεται από τη λέξη ήλεκτρο, με την οποία αποδίδεται στα αρχαία Ελληνικά η απολιθωμένη ρητίνη (κεχριμπάρι). Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν παρατηρήσει ότι το τρίψιμο μικρών λίθων από κεχριμπάρι με ένα ξηρό ύφασμα ή στο τρίχωμα ενός ζώου τους προσέδιδε την ικανότητα να έλκουν και να μετακινούν ελαφρά αντικείμενα, όπως κομμάτια από άχυρο ή πούπουλα. Αυτή υπήρξε η πρώτη εμπειρική διαπίστωση της ύπαρξης του ηλεκτρισμού. Σήμερα, οι ηλεκτρικές δυνάμεις έχουν εξηγηθεί πλήρως με βάση μία ιδιότητα της ύλης, που ονομάζεται **ηλεκτρικό φορτίο**.

Ο Στατικός Ηλεκτρισμός στη Ζωή μας

Ο στατικός ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές αλλά και επιστημονικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα:

- Στη λειτουργία συσκευών καθημερινής χρήσης, όπως τα ηλεκτροστατικά μεγάφωνα, τα μικρόφωνα και οι ηλεκτροστατικές φωτοτυπικές μηχανές.
- Στη βαφή μεταλλικών αντικειμένων και στην ηλεκτροστατική επικάλυψη μετάλλων από άλλα μέταλλα, για διακοσμητικούς λόγους ή για τον περιορισμό της οξειδωσής τους.
- Στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα καυσαέρια εργοστασίων και ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών, μέσω της

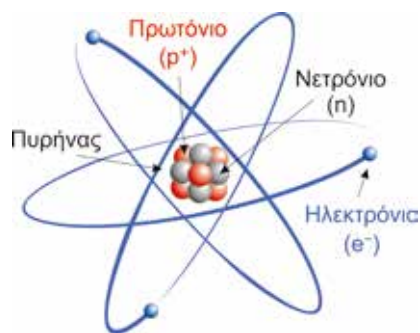


κατακράτησης σωματιδίων καπνού και σκόνης στις καπνοδόχους με ηλεκτροστατικά φίλτρα.

- Στον διαχωρισμό των συστατικών ενός μίγματος μέσω της ηλεκτροφόρησης. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στη μελέτη βιολογικών μιγμάτων πρωτεϊνών, νουκλεϊκών οξέων, υδατανθράκων, και στην κλινική ιατρική για τον καθορισμό των πρωτεϊνών, που περιέχονται στα υγρά του σώματος.

7.1. Η Δομή του Ατόμου

Οι βασικές δομικές μονάδες της ύλης είναι τα άτομα. Η ατομική θεωρία διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον αρχαίο φυσικό φιλόσοφο Δημόκριτο από τα Άβδηρα (περίπου 460 - 370 π.Χ.). Η κατανόηση της δομής και της σταθερότητας του ατόμου είναι κορυφαία επιτεύγματα της Φυσικής του 20ού αιώνα.



Τα άτομα αποτελούνται από τρία είδη σωματιδίων: πρωτόνια (p^+), νετρόνια (n) και ηλεκτρόνια (e^-). Τα πρωτόνια και νετρόνια σχηματίζουν τον ατομικό **πυρήνα**, ο οποίος έχει τυπικό μέγεθος 1-10 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από τον πυρήνα, σε μία περιοχή με μέγεθος $\sim 10^{-10} \text{ m}$, δηλαδή περίπου 10 000 - 100 000 φορές μεγαλύτερο από αυτό του πυρήνα.

Εάν ο πυρήνας του ατόμου απεικονισθεί σαν μία σφαίρα με ακτίνα 1 mm, η περιοχή στην οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια του ατόμου θα εκτείνεται σε απόσταση 10 - 100 m.

Οι μάζες του πρωτονίου ($m_{p^+} = 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$) και του νετρονίου ($m_n = 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$) είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους, και περίπου 2000 φορές μεγαλύτερες από τη μάζα του ηλεκτρονίου ($m_{e^-} = 9,1094 \times 10^{-31} \text{ kg}$). Το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας ενός ατόμου είναι συγκεντρωμένο στον πυρήνα.

Τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με **ηλεκτρικές δυνάμεις**, εξαιτίας μιας ιδιότητας που ονομάζεται **ηλεκτρικό φορτίο**.

Το **ηλεκτρικό φορτίο** είναι μία ιδιότητα των σωματιδίων της ύλης. Υπάρχουν δύο είδη φορτίου, τα οποία ταξινομούμε ως «θετικό» και «αρνητικό». Οι δυνάμεις, με τις οποίες αλληλεπιδρούν τα σωματίδια που έχουν ηλεκτρικό φορτίο, ονομάζονται ηλεκτρικές. Σωματίδια με **ομόσημα** φορτία **απωθούν**

νται, και σωματίδια με **ετερόσημα** φορτία **έλκονται**. Σωματίδια χωρίς ηλεκτρικό φορτίο (**ηλεκτρικά ουδέτερα**) δεν αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικές δυνάμεις.

Μονάδα ηλεκτρικού φορτίου στο Σύστημα Μέτρησης SI είναι το Coulomb (C).

Ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο αλληλεπιδρούν με ελκτικές ηλεκτρικές δυνάμεις, οπότε φέρουν ετερόσημα φορτία. Κάθε ηλεκτρόνιο φέρει συγκεκριμένο σταθερό ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο θεωρούμε κατά σύμβαση ως “αρνητικό”. Κάθε πρωτόνιο φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο, αντίθετο από το φορτίο του ηλεκτρονίου. Τα νετρόνια δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο.

Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι ίσο με $-1,602 \times 10^{-19}$ C, και το φορτίο του πρωτονίου είναι ίσο με $+1,602 \times 10^{-19}$ C. **Θα συμβολίζουμε την απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου με e** . Με αυτό το συμβολισμό, το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι $-e$ και του πρωτονίου $+e$.

Ο αριθμός των πρωτονίων ενός ατόμου ονομάζεται **ατομικός αριθμός (Z)** και καθορίζει τη **φύση** του ατόμου (το στοιχείο στο οποίο αντιστοιχεί). Ο συνολικός αριθμός πρωτονίων και νετρονίων ενός ατόμου ονομάζεται **μαζικός αριθμός (A)**. Το απλούστερο άτομο αντιστοιχεί στο στοιχείο υδρογόνο (H) και έχει ατομικό και μαζικό αριθμό $Z = A = 1$ (1 πρωτόνιο). Το βαρύτερο άτομο που απαντάται στη φύση αντιστοιχεί στο στοιχείο ουράνιο (U). Το ουράνιο-238 έχει ατομικό αριθμό $Z = 92$ και μαζικό αριθμό $A = 238$ (92 πρωτόνια και 146 νετρόνια).

Σε ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο, ο αριθμός των πρωτονίων ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Ένα ουδέτερο άτομο νατρίου (Na) έχει 11 πρωτόνια και 11 ηλεκτρόνια, και ένα ουδέτερο άτομο χλωρίου (Cl) έχει 17 πρωτόνια και 17 ηλεκτρόνια.

Σύντομη Ιστορική Αναδρομή στην Ανακάλυψη της Δομής του Ατόμου

Στην ανακάλυψη της δομής του ατόμου και στη μελέτη του ηλεκτρικού φορτίου των σωματιδίων που το αποτελούν συνεισέφεραν πολλοί σπουδαίοι Φυσικοί του 19ου και 20ου αιώνα.

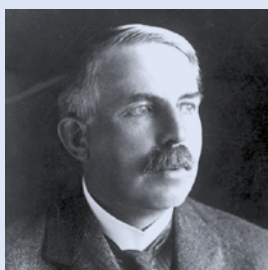
Το 1897, ο Βρετανός φυσικός **Sir Joseph John Thomson** (1856-1940) έδειξε ότι τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόδια των λυχνιών



κενού εξέπεμπαν δέσμες σωματιδίων (καθοδικές ακτίνες), τα οποία είχαν αρνητικό φορτίο και μάζα κατά πολύ μικρότερη από αυτή των ατόμων. Τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν **ηλεκτρόνια**. Ο Thomson τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1906.



Ο Αμερικανός φυσικός **Robert Millikan** (1868-1953) προσδιόρισε με ακρίβεια την τιμή του **φορτίου του ηλεκτρονίου** το 1911, μελετώντας την ισορροπία φορτισμένων σταγόνων λαδιού υπό την επίδραση ηλεκτρικών δυνάμεων και της βαρύτητας. Ο Millikan τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1923. Η τιμή που ανέφερε ο Millikan στην ομιλία του κατά την απονομή του βραβείου, ήταν $-1,5924 \times 10^{-19} \text{ C}$, που διαφέρει λιγότερο από 1% από τη σημερινή εκτίμηση $-1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$.



Η ανακάλυψη του **πυρήνα του ατόμου** πραγματοποιήθηκε από τον Βρετανό φυσικό **Ernest Rutherford** (1871-1937). Το 1909, οι μαθητές του Rutherford, Hans Geiger και Ernst Marsden, βομβάρδισαν λεπτά φύλλα χρυσού με δέσμες σωματιδίων α, τα οποία αποτελούνται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια και αντιστοιχούν σε πυρήνες ατόμων του στοιχείου ήλιο (He). Τα σωματίδια α έχουν θετικό φορτίο $+2e$.

Μελετώντας τις ταχύτητες που αποκτούσαν τα σωματίδια α μετά τη σύγκρουσή τους με τα άτομα χρυσού, ο Rutherford συμπέρανε ότι το κέντρο θετικού φορτίου των ατόμων χρυσού ήταν συγκεντρωμένο σε μία πολύ μικρή, σχεδόν σημειακή περιοχή, η οποία είχε παρόμοιο μέγεθος με αυτό των σωματιδίων α. Ο Rutherford ονόμασε αυτή την περιοχή “πυρήνα” του ατόμου.

Ο Rutherford θεωρείται ο πατέρας της πυρηνικής φυσικής. Για τις μελέτες του στη ραδιενεργή διάσπαση των ατόμων ο Rutherford τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Χημείας το 1908. Το πείραμα της ανακάλυψης του πυρήνα πραγματοποιήθηκε μετά τη βράβειυσή του με το βραβείο Nobel. Μαζί με τον Faraday συγκαταλέγεται στους σπουδαιότερους πειραματικούς φυσικούς όλων των εποχών.

Το 1921, ο Rutherford υποστήριξε ότι στον πυρήνα των ατόμων υπήρχαν και ηλεκτρικά ουδέτερα σωματίδια, τα οποία ονόμασε **νετρόνια**. Τα σωματίδια αυτά ανακαλύφθηκαν από τον συνεργάτη του, Βρετανό φυσικό James Chadwick το 1932. Γι’ αυτή την ανακάλυψη ο Chadwick τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1935.

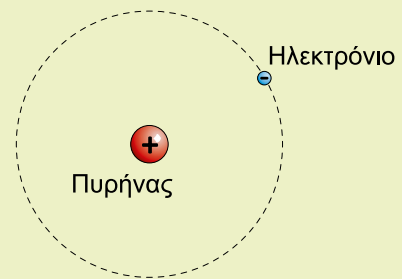
Προαιρετικές εργασίες για το σπίτι

Να αναζητήσετε σχετικές πληροφορίες σε έγκυρες πηγές, και να περιγράψετε τις πειραματικές διαδικασίες που ακολούθησαν:

- Ο J. J. Thomson για την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου.
- Ο R. Millikan για τον προσδιορισμό του φορτίου του ηλεκτρονίου.

Το Ατομικό Μοντέλο των Bohr-Rutherford

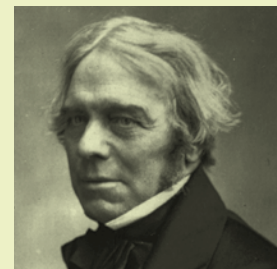
Στο ατομικό μοντέλο των Bohr-Rutherford, το οποίο διατυπώθηκε από τον Δανό φυσικό **Niels Bohr** το 1913, η δομή του ατόμου θυμίζει ένα πλανητικό σύστημα, με τα ηλεκτρόνια (πλανήτες) να περιστρέφονται σε κυκλικές τροχιές συγκεκριμένων ακτίνων, με κέντρο τον πυρήνα (Ήλιο). Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρονίων και πυρήνα οφείλονται στα ηλεκτρικά τους φορτία.



Σύμφωνα με τη σύγχρονη κβαντική θεωρία, η οποία εξηγεί τη σταθερότητα των ατόμων, το μοντέλο Bohr-Rutherford δεν είναι ορθό. Όμως, χρησιμοποιείται συχνά σαν διδακτικό εργαλείο για τη δομή του ατόμου επειδή είναι απλό και προβλέπει σωστά τις δυνατές τιμές ενέργειας ατόμων με ένα ηλεκτρόνιο, όπως το άτομο του υδρογόνου. Για τις θεμελιώδεις του ανακαλύψεις στη δομή του ατόμου, ο Niels Bohr τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922.

Michael Faraday (1791 - 1867)

Ο Michael Faraday ήταν σπουδαίος πειραματικός φυσικός του 19ου αιώνα, και θεωρείται ένας από τους πιο σημαντικούς επιστήμονες όλων των εποχών. Μελέτησε το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης το 1834 και έδειξε ότι τα μεταλλικά ιόντα που συλλέγονταν στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, έφεραν συγκεκριμένο φορτίο. Επινόησε την περιγραφή του ηλεκτρικού πεδίου με τη μέθοδο των δυναμικών γραμμών. Μελέτησε διεξοδικά τις ιδιότητες του στατικού ηλεκτρισμού, το φαινόμενο του διαμαγνητισμού και την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, και εφύρε τον ηλεκτρικό κινητήρα, που μετατρέπει την ηλεκτρική σε μηχανική ενέργεια.



7.2. Ηλεκτρικά Φορτισμένα Άτομα και Μόρια (Ιόντα)

Εάν ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, αποκτά θετικό φορτίο και μετατρέπεται σε θετικό ιόν (**κατιόν**). Το ιόν νατρίου Na^+ (με ατομικό αριθμό $Z = 11$) έχει φορτίο $+e$ και 10 ηλεκτρόνια.

Εάν ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο κερδίσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, αποκτά αρνητικό φορτίο και μετατρέπεται σε αρνητικό ιόν (**ανιόν**). Το ιόν χλωρίου Cl^- (με ατομικό αριθμό $Z = 17$) έχει φορτίο $-e$ και 18 ηλεκτρόνια.

Προσοχή

Ο **αριθμός πρωτονίων** (ατομικός αριθμός) ενός συγκεκριμένου ατόμου παραμένει **σταθερός**, όταν αλλάζει το φορτίο του ατόμου. Για παράδειγμα, το ιόν Na^+ έχει ατομικό αριθμό 11, όσο και το ουδέτερο άτομο.

Ο αριθμός των πρωτονίων των ατόμων μπορεί να μεταβάλλεται μέσω **πυρηνικών αντιδράσεων**, όπως η συνένωση δύο πυρήνων σε μεγαλύτερους (πυρηνική σύντηξη), η διάσπαση ενός πυρήνα σε μικρότερους (πυρηνική σχάση) και η εκπομπή σωματιδίων από πυρήνες (ραδιενεργή ακτινοβολία α και β).

Για παράδειγμα, ο πυρήνας του ουρανίου-238 ($Z = 92$, $A = 238$) μετατρέπεται σε πυρήνα θορίου (Th) ($Z = 90$, $A = 234$) με εκπομπή ενός σωματίου α (πυρήνας ηλίου, με 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια).

Όταν οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ δύο ή περισσότερων ατόμων είναι αρκετά ισχυρές, τα άτομα δημιουργούν συσσωματώματα που ονομάζονται μόρια. Ένα μόριο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο όταν ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων των ατόμων του ισούται με τον συνολικό αριθμό πρωτονίων των πυρήνων των ατόμων. Εάν το μόριο χάσει ή κερδίσει ηλεκτρόνια, φορτίζεται θετικά ή αρνητικά.

Για παράδειγμα, το μόριο του υδρογόνου (H_2) αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και έχει 2 πρωτόνια και 2 ηλεκτρόνια. Το θετικά φορτισμένο μοριακό ιόν H_2^+ έχει 2 πρωτόνια και 1 ηλεκτρόνιο.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.2.1.** Το άτομο του άνθρακα έχει 6 πρωτόνια, 6 νετρόνια και 6 ηλεκτρόνια.
(α) Ποιό είναι το συνολικό φορτίο του ατόμου του άνθρακα;
(β) Εάν ένα άτομο άνθρακα χάσει ένα ηλεκτρόνιο, τι φορτίο θα αποκτήσει;
- 7.2.2.** Το άτομο του σιδήρου έχει 26 πρωτόνια. Πόσα ηλεκτρόνια έχει, όταν το ηλεκτρικό του φορτίο ισούται με $+2e$;
- 7.2.3.** Το άτομο του οξυγόνου έχει 8 πρωτόνια. Πόσα ηλεκτρόνια έχει συνολικά το ηλεκτρικά ουδέτερο μόριο του νερού (H_2O), που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου;
- 7.2.4.** Πόσα ηλεκτρόνια έχει το μόριο OH^- , το οποίο έχει αρνητικό φορτίο ίσο με $-e$;

7.3. Η Κβάντωση του Ηλεκτρικού Φορτίου

Επειδή ένα ηλεκτρόνιο δεν διαιρείται σε πιο στοιχειώδη σωματίδια, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ενός φορτισμένου ατόμου ή μορίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους φορτίου e . Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται **κβάντωση του ηλεκτρικού φορτίου**, από τη λατινική λέξη *quantum*, που σημαίνει “πόσο”.

Τα φορτία όλων των σωματιδίων, που παρατηρούνται ελεύθερα στη φύση, είναι ακέραια πολλαπλάσια του φορτίου e :

$$q = ke, \text{ όπου } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια αποτελούνται από πιο στοιχειώδη σωματίδια, τα *quarks*, τα οποία έχουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο $\pm(1/3)e$ ή $\pm(2/3)e$. Τα *quarks* δεν έχουν απομονωθεί ελεύθερα.

Όταν ένα σώμα έχει διαφορετικό αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων, είναι ηλεκτρικά φορτισμένο. Εάν το φορτίο του σώματος είναι μεγάλο, κατ' απόλυτη τιμή, σε σύγκριση με το στοιχειώδες φορτίο e , η κβάντωση του φορτίου του είναι αμελητέα. Για παράδειγμα, εάν ένας γυάλινος βόλος έχει έλλειμμα 10^{10} ηλεκτρονίων (σε σχέση με τον συνολικό αριθμό πρωτονίων του), το φορτίο του είναι $+(10^{10} \times e) = +1,602 \times 10^{-9} \text{ C}$. Εάν ο βόλος χάσει ένα επιπρόσθετο ηλεκτρόνιο, η μεταβολή του φορτίου του (ίση με $+e$) είναι αμελητέα σε σύγκριση με το συνολικό του φορτίο.

Σημείωση

Ένα παράδειγμα κβαντισμένου μεγέθους, που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή, είναι το νόμισμα: η μικρότερη μονάδα νομίσματος στη χώρα μας είναι το ένα εκατοστό του ευρώ, το οποίο ονομάζουμε λεπτό ή σεντ. Όταν ανταλλάσσουμε νομίσματα ή χαρτονομίσματα του ευρώ, όλα τα ποσά εκφράζονται σαν πολλαπλάσια του λεπτού.



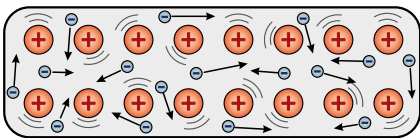
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.3.1. Ένας πλαστικός βόλος έχει συνολικό φορτίο $q = -3,2 \times 10^{-12} \text{ C}$. Έχει περίσσεια ή έλλειμμα ηλεκτρονίων; Σε πόσα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί το φορτίο του;
- 7.3.2. Εάν μία γυάλινη σφαίρα χάσει 3 δισεκατομμύρια ηλεκτρόνια, τι φορτίο αποκτά; Εάν χάσει ένα ακόμα ηλεκτρόνιο, μπορούμε να αντιληφθούμε ότι μεταβλήθηκε το φορτίο της;

Τα υλικά που **δεν** ευνοούν την ελεύθερη κίνηση φορέων φορτίου στο εσωτερικό τους, όπως το γυαλί, το ξύλο, το χαρτί και τα διάφορα πλαστικά, ονομάζονται **μονωτές**.

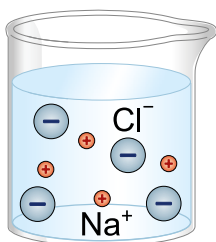
Τα υλικά που επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση φορέων φορτίου στο εσωτερικό τους, όπως ο σίδηρος, ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο άργυρος, και ο χρυσός, ονομάζονται **αγωγοί**.

Τα άτομα των **μετάλλων** δεν είναι ισχυρά συνδεδεμένα με όλα τα ηλεκτρόνιά τους. Ένας συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτρονίων ανά άτομο αποδесμούνται και μπορούν να κινούνται σε όλο τον όγκο του μεταλλικού αντικειμένου. Τα ηλεκτρόνια αυτά ονομάζονται **ελεύθερα**. Ο αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά άτομο αλλάζει από μέταλλο σε μέταλλο. Για παράδειγμα, ο χαλκός (Cu) συνεισφέρει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ανά άτομο ενώ ο ψευδάργυρος (Zn) συνεισφέρει δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά άτομο.



Όταν ένα άτομο χάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, μετατρέπεται σε θετικό ιόν. Συνεπώς, ένα μεταλλικό σώμα μπορεί να περιγραφεί σαν ένα σύνολο από θετικά ιόντα, που δονούνται γύρω από συγκεκριμένες θέσεις, και έναν αριθμό ελευθέρων ηλεκτρονίων, που κινούνται ελεύθερα σε όλο τον όγκο του σώματος.

Σε ένα ηλεκτρικά ουδέτερο μεταλλικό σώμα, το συνολικό θετικό φορτίο των μεταλλικών ιόντων ισούται κατ' απόλυτη τιμή με το συνολικό αρνητικό φορτίο των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Εάν ασκηθούν ηλεκτρικές δυνάμεις στο σώμα, παρατηρείται κατευθυνόμενη κίνηση (ροή) των ελευθέρων ηλεκτρονίων *σε όλο τον όγκο του σώματος*.



Εκτός από τα μέταλλα υπάρχουν και άλλα παραδείγματα αγωγών του ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα, **ένα διάλυμα νερού και μαγειρικού άλατος** (χλωριούχου νατρίου) περιέχει κατιόντα νατρίου Na^+ , ανιόντα χλωρίου Cl^- και έναν μικρό αριθμό κατιόντων H^+ και ανιόντων υδροξυλίου OH^- που προέρχονται από τη διάσπαση μορίων νερού. Εάν δράσουμε με ηλεκτρικές δυνάμεις στο διάλυμα, παρατηρείται κίνηση αυτών των ιόντων σε όλο τον όγκο του διαλύματος. Συνεπώς, το διάλυμα αποτελεί αγωγό.

Σημείωση

1. Τα μόρια των μονωτών είναι ισχυρά συνδεδεμένα με τα ηλεκτρόνια τους. Εάν δράσουμε με ηλεκτρικές δυνάμεις σε ένα μονωτή (π.χ. πλησιάζοντας σε αυτό ένα φορτισμένο σώμα), προκαλούνται μικρές παραμορφώσεις στα μόριά του, αλλά τα ηλεκτρόνια παραμένουν δεσμευμένα στα μόρια, χωρίς να μπορούν να μετακινηθούν ελεύθερα μέσα στο υλικό.
2. Τα ηλεκτρόνια των ατόμων ή μορίων των μονωτών διαφεύγουν, εάν εφαρμοσθούν σε αυτά πολύ ισχυρές ηλεκτρικές δυνάμεις.

Στις λυχνίες εκκένωσης αερίου και στους λαμπτήρες φθορισμού τα άτομα ή μόρια ενός αερίου (π.χ. νέου Ne, αργού Ar, κρυπτού Kr) χάνουν ηλεκτρόνια εξαιτίας ισχυρών ηλεκτρικών δυνάμεων, και μετατρέπονται σε θετικά ιόντα. Η κίνηση ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων εξαιτίας των ηλεκτρικών δυνάμεων έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτός.



Ένα αντίστοιχο φυσικό φαινόμενο είναι ο κεραυνός, που οφείλεται στον ιονισμό των μορίων του αέρα και στην κίνηση ηλεκτρονίων και ιόντων στην ατμόσφαιρα.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.4.1. Ένα πλαστικό ραβδί είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Τι συμπεραίνετε για το ηλεκτρικό φορτίο των μορίων του; Να αναφέρετε δύο πιθανά ενδεχόμενα.
- 7.4.2. Είναι σωστό να πούμε ότι σε ένα μονωτικό υλικό δεν παρατηρείται ροή φορέων φορτίου υπό καμία συνθήκη;
- 7.4.3. Ποιά είναι η βασική διαφορά ανάμεσα σε ένα μονωτικό και ένα αγώγιμο υλικό;

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Το φορτίο ενός ηλεκτρονίου εξαρτάται από το άτομο, στο οποίο ανήκει.	
2	Ένα άτομο φορτίζεται θετικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των πρωτονίων του.	
3	Ένα άτομο φορτίζεται αρνητικά, όταν αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων του.	

4	Ένα φορτισμένο σώμα έχει πάντοτε περισσότερα πρωτόνια από ηλεκτρόνια.	
5	Το φορτίο ενός σώματος μεταβάλλεται πάντοτε κατά ακέραια πολλαπλάσια του φορτίου του ηλεκτρονίου.	
6	Ένα υλικό συμπεριφέρεται σαν μονωτής όταν δεν διαθέτει ελεύθερους φορείς φορτίου.	
7	Ένα υλικό συμπεριφέρεται σαν αγωγός όταν διαθέτει ελεύθερους φορείς φορτίου.	
8	Οι ελεύθεροι φορείς φορτίου στους αγωγούς αντιστοιχούν πάντοτε σε ηλεκτρόνια.	

Ερωτήσεις

1. Πόσα πρωτόνια και πόσα ηλεκτρόνια περιέχει το ιόν του αμμωνίου NH_4^+ , το οποίο αποτελείται από 1 άτομο αζώτου και 4 άτομα υδρογόνου, και έχει συνολικό φορτίο $+e$; Το άτομο του αζώτου έχει ατομικό αριθμό $Z = 7$.
2. Κατά την εμφάνιση ενός κεραυνού αναπτύσσεται ροή ηλεκτρικού φορτίου στην ατμόσφαιρα. Αφού ο αέρας είναι μονωτής, πώς είναι δυνατή η ροή φορτίου διαμέσου του;

7.5. Φόρτιση με Επαφή ή Τριβή

Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν διαπιστώσει ότι οι λίθοι από κεχριμπάρι ηλεκτρίζονταν μέσω της τριβής στη γούνα κάποιου ζώου, γιατί μπορούσαν να έλκουν και να μετακινούν ελαφρά αντικείμενα, όπως κομματάκια από άχυρο και πούπουλα.

Όταν δύο σώματα από διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή, μερικά από τα άτομα ή μόριά τους αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με τελικό αποτέλεσμα το ένα σώμα να αποκτά περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικό φορτίο) και το δεύτερο να έχει έλλειμμα ηλεκτρονίων (θετικό φορτίο). Το πρόσημο του φορτίου, που αποκτούν δύο σώματα κατά την επαφή τους, εξαρτάται από το υλικό τους. Για παράδειγμα:

- Κατά το τρίψιμο μίας γυάλινης ράβδου με ένα μεταξωτό ύφασμα, η ράβδος φορτίζεται **θετικά** και το ύφασμα **αρνητικά**.

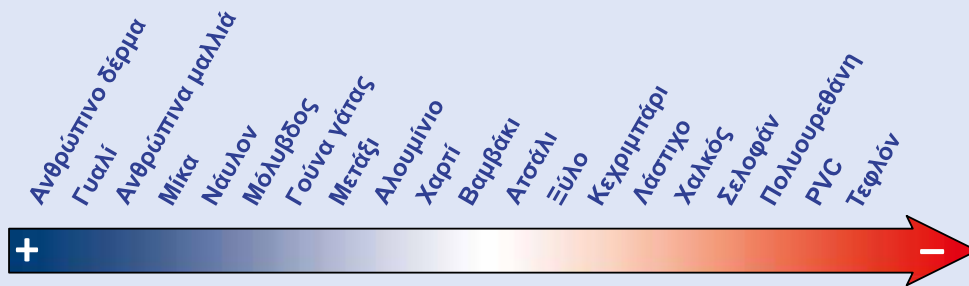
- Κατά το τρίψιμο μίας πλαστικής χτένας με τα μαλλιά μας, η χτένα φορτίζεται **αρνητικά** και τα μαλλιά μας **θετικά**.

Σημείωση

Δύο σώματα μπορούν να φορτισθούν με απλή επαφή. Η τριβή μεταξύ των σωμάτων εντείνει το φαινόμενο, διευκολύνοντας τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας φορτίου μεταξύ τους.

Τριβοηλεκτρική Σειρά Υλικών

Στην επόμενη λίστα (τριβοηλεκτρική σειρά), διάφορα υλικά αναφέρονται με βάση την τάση τους να φορτίζονται θετικά ή αρνητικά, κατά την επαφή ή τριβή μεταξύ τους.



Πηγή: http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Triboelectric_series

Υλικά που αναφέρονται στην αρχή της πιο πάνω σειράς υλικών φορτίζονται **θετικά**, και υλικά στο τέλος της σειράς φορτίζονται **αρνητικά**. Για παράδειγμα, εάν τρίψουμε ένα γυάλινο ραβδί με μεταξωτό ύφασμα, το γυαλί θα φορτιστεί θετικά και το ύφασμα αρνητικά. Εάν τρίψουμε έναν λίθο από κεχριμπάρι με μεταξωτό ύφασμα, το κεχριμπάρι θα φορτισθεί αρνητικά και το ύφασμα θετικά.

Γειτονικά υλικά στη σειρά αποκτούν μικρό φορτίο εάν τα τρίψουμε μεταξύ τους, ενώ υλικά που απέχουν περισσότερο αποκτούν μεγαλύτερο φορτίο.

➡ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.5.1. Όταν βγάζουμε τα ρούχα από το στεγνωτήριο, παρατηρούμε συχνά ότι έλκονται μεταξύ τους και κολλούν το ένα στο άλλο. Γιατί συμβαίνει αυτό;
- 7.5.2. Τι θα συμβεί εάν τρίψουμε μία ναύλον σακούλα με **(α)** έναν λίθο από κεχριμπάρι, **(β)** έναν γυάλινο βόλο;

Όταν δύο σώματα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και φορτίζονται, μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το ένα σώμα στο άλλο. Επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν συγκεκριμένο φορτίο, **το συνολικό φορτίο των δύο σωμάτων παραμένει σταθερό**. Για παράδειγμα, εάν τρίψουμε ένα αφόρτιστο γυάλινο ραβδί με ένα αφόρτιστο μεταξωτό ύφασμα, μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το γυαλί στο μετάξι. Το γυαλί αποκτά κάποιο θετικό φορτίο $+q$ και το μετάξι αποκτά αντίθετο φορτίο $-q$. Το άθροισμα των φορτίων των δύο σωμάτων παραμένει ίσο με μηδέν.



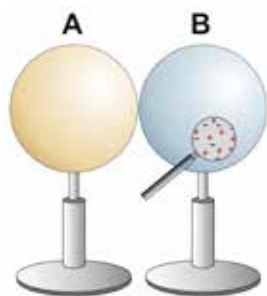
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.6.1.** Τρίβουμε έναν αφόρτιστο λίθο από κεκριμπάρι στο αφόρτιστο τρίχωμα μίας γάτας. Εάν ο λίθος αποκτά φορτίο -3 nC , τι φορτίο αποκτά το τρίχωμα;
- 7.6.2.** Δύο μεταλλικές σφαίρες A και B, με φορτία $q_A = -4 \text{ nC}$ και $q_B = +7 \text{ nC}$ έρχονται σε επαφή και κατόπιν αποχωρίζονται. Εάν το τελικό φορτίο της σφαίρας A είναι $q_A = +1 \text{ nC}$, ποίο θα είναι το φορτίο της σφαίρας B;

7.7. Φόρτιση Αγώγιμων Σωμάτων

Φόρτιση με Επαφή

Εάν φέρουμε σε επαφή ένα θετικά φορτισμένο σώμα και ένα αφόρτιστο μεταλλικό αντικείμενο, ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου προσλαμβάνονται από τα μόρια του σώματος. Το μέταλλο φορτίζεται θετικά, ενώ το φορτίο του σώματος μειώνεται. Ομοίως, εάν αγγίξουμε ένα αρνητικά φορτισμένο σώμα με ένα αφόρτιστο μεταλλικό αντικείμενο, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το σώμα στο μέταλλο. Το μέταλλο φορτίζεται αρνητικά και το φορτίο του σώματος μειώνεται (κατ' απόλυτη τιμή).



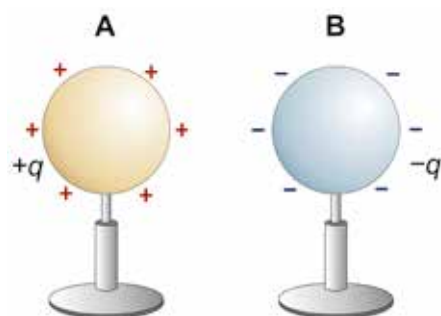
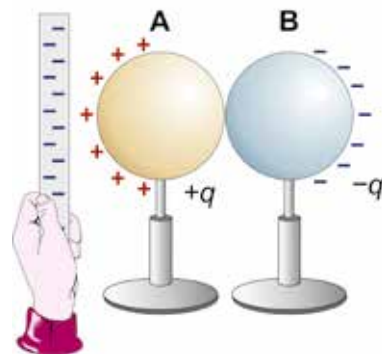
Φόρτιση με Επαγωγή

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει δύο μεταλλικές σφαίρες **A** και **B**, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή. Οι μπάλες στηρίζονται σε βάσεις από μονωτικό υλικό και είναι **ηλεκτρικά μονωμένες** από το περιβάλλον τους.

Έστω ότι οι σφαίρες είναι αρχικά αφόρτιστες. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων κάθε σφαίρας ισούται με τον αριθμό των μεταλλικών της ιόντων.

Εκτελούμε τώρα τα εξής βήματα:

- (α) Πλησιάζουμε από τη μεριά της σφαίρας A ένα αρνητικά φορτισμένο πλαστικό ραβδί. Το ηλεκτρικό φορτίο του ραβδιού απωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των δύο σφαιρών, προκαλώντας μετακίνηση ηλεκτρονίων από τη σφαίρα A προς τη σφαίρα B. Στη σφαίρα A εμφανίζεται **έλλειμμα** ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ στη σφαίρα B εμφανίζεται **περίσσεια** ελεύθερων ηλεκτρονίων. Συνεπώς, η σφαίρα A αποκτά θετικό φορτίο $+q$ και η σφαίρα B αποκτά αντίθετο φορτίο $-q$. Το άθροισμα των φορτίων των δύο σφαιρών ισούται με μηδέν, επειδή αρχικά οι σφαίρες ήταν αφόρτιστες.
- (β) Απομακρύνουμε τις σφαίρες έτσι ώστε να μην είναι σε επαφή. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας φροντίζουμε να παραμένουν **ηλεκτρικά μονωμένες** από το περιβάλλον. Οι σφαίρες διατηρούν το φορτίο που είχαν αποκτήσει στο βήμα (α).



Να παρατηρήσετε ότι κάθε σφαίρα φορτίσθηκε χωρίς να έρθει σε επαφή με το ραβδί. Ο τρόπος αυτός φόρτισης ονομάζεται **φόρτιση με επαγωγή**.

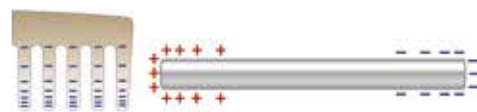


Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.7.1. Να περιγράψετε τι θα συμβεί εάν στο βήμα (α) πλησιάσουμε από τη μεριά της σφαίρας A ένα θετικά φορτισμένο γυάλινο ραβδί, και κατόπιν απομακρύνουμε τις δύο σφαίρες.

7.8. Ηλέκτριση ενός Αγωγού

Εάν πλησιάσουμε μία αρνητικά φορτισμένη πλαστική χτένα στη μία άκρη ενός μονωμένου, ηλεκτρικά ουδέτερου μεταλλικού ραβδιού, η χτένα απωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ραβδιού, και προκαλεί μετακίνησή τους στην απομακρυσμένη άκρη του ραβδιού. Η κοντινή άκρη του ραβδιού φορτίζεται θετικά (έλλειμμα ηλεκτρονίων) και η μακρινή άκρη φορτίζεται αρνητικά (περίσσεια ηλεκτρονίων). Το συνολικό φορτίο του ραβδιού παραμένει ίσο με μηδέν. Η κατάσταση αυτή είναι **προσωρινή**: Εάν η χτένα απομακρυνθεί, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ανακατανέμονται ομοιόμορφα στο ραβδί, και οι άκρες του ραβδιού γίνονται ηλεκτρικά ουδέτερες.



Όταν προκαλούμε ανομοιόμορφη κατανομή θετικού και αρνητικού φορτίου σε έναν αφόρτιστο και ηλεκτρικά μονωμένο αγωγό, λέμε ότι ο αγωγός ηλεκτρίζεται.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.8.1. Εάν πλησιάσουμε στην άκρη του μεταλλικού ραβδιού μία θετικά φορτισμένη γυάλινη σφαίρα, το ραβδί θα ηλεκτρισθεί; Εξηγήστε πώς θα κατανοηθεί το φορτίο στο ραβδί, με τη βοήθεια κατάλληλου σχήματος.

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Εάν φέρουμε σε επαφή ένα θετικά φορτισμένο σώμα με έναν ουδέτερο μεταλλικό αγωγό, μεταφέρονται ελεύθερα ηλεκτρόνια από τον αγωγό στο σώμα.	
2	Εάν φέρουμε σε επαφή ένα αρνητικά φορτισμένο σώμα με έναν ουδέτερο μεταλλικό αγωγό, μεταφέρονται πρωτόνια από τον αγωγό στο σώμα.	
3	Εάν φέρουμε σε επαφή ένα αρνητικά φορτισμένο σώμα με έναν ουδέτερο μεταλλικό αγωγό, μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το σώμα στον αγωγό.	
4	Είναι δυνατόν να φορτίσουμε έναν αγωγό, χωρίς να τον φέρουμε σε επαφή με ένα φορτισμένο σώμα.	
5	Εάν πλησιάσουμε μία φορτισμένη μπάλα σε ένα ηλεκτρικά μονωμένο μεταλλικό ραβδί, οι δύο άκρες του ραβδιού αποκτούν αντίθετο φορτίο.	

7.9. Όργανα Ανίχνευσης Ηλεκτρικού Φορτίου

Εικόνα 7-1

Όργανα ανίχνευσης ηλεκτρικού φορτίου.
(α) Ηλεκτροσκόπιο.



Για να ανιχνεύσουμε εάν κάποιο σώμα είναι ηλεκτρικά φορτισμένο, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε όργανα όπως το **ηλεκτροσκόπιο** και το **ηλεκτρικό εκκρεμές**.

Μία τυπική διάταξη **ηλεκτροσκοπίου** απεικονίζεται στην **Εικόνα 7-1(α)**. Αποτελείται από ένα μεταλλικό στέλεχος, το οποίο περιέχει στη μία άκρη του ένα μεταλλικό σφαιρίδιο και στην άλλη άκρη του διαχωρίζεται σε δύο μεταλλικά ελάσματα. Τουλάχιστον ένα από τα ελάσματα μπορεί να κινείται. Το στέλεχος είναι στερεωμένο σε μία βάση από μονωτικό υλικό, έτσι ώστε να είναι ηλεκτρικά μονωμένο. Όταν το ηλεκτροσκόπιο αλληλεπιδρά με ηλεκτρικές δυνάμεις με ένα σώμα, τα ελάσματα απωθούνται και απομακρύνονται.

Ένα τυπικό **ηλεκτρικό εκκρεμές** απεικονίζεται στην **Εικόνα 7-1(β)**. Το εκκρεμές αποτελείται από ένα σφαιρίδιο, αναρτημένο από ένα ηλεκτρικά μονωτικό νήμα. Όταν το σφαιρίδιο αλληλεπιδρά με ηλεκτρικές δυνάμεις με ένα σώμα, αποκλίνει από την κατακόρυφη διεύθυνση.

Στα επόμενα θα περιγράψουμε την **ηλεκτρίση με επαγωγή** και τη **φόρτιση με επαφή** ή με **επαγωγή** του ηλεκτροσκοπίου.

Ηλεκτρίση με Επαγωγή

- Εάν πλησιάσουμε το θετικά φορτισμένο γυάλινο ραβδί στο μεταλλικό σφαιρίδιο του στελέχους του ηλεκτροσκοπίου, το στέλεχος ηλεκτρίζεται: Ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακινούνται από τα ελάσματα προς το σφαιρίδιο, οπότε τα ελάσματα φορτίζονται θετικά και το σφαιρίδιο φορτίζεται αρνητικά (το συνολικό φορτίο του στελέχους είναι ίσο με μηδέν). Επειδή τα ελάσματα έχουν ομόσημα (θετικά) φορτία, απωθούνται μεταξύ τους και απομακρύνονται. Όσο πιο κοντά προσεγγίζουμε το ραβδί στο στέλεχος, τόσο πιο έντονη γίνεται η ηλεκτρίση του στελέχους: το φορτίο των ελασμάτων μεγαλώνει και η απόσταση μεταξύ τους αυξάνεται.
- Εάν απομακρύνουμε το γυάλινο ραβδί σε αρκετά μεγάλη απόσταση από το ηλεκτροσκόπιο, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στελέχους ανακατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το στέλεχος και οι δύο άκρες γίνονται ηλεκτρικά ουδέτερες. Τα ελάσματα επανέρχονται στην αρχική τους θέση.
- Ομοίως, εάν **πλησιάσουμε** στο μεταλλικό σφαιρίδιο του στελέχους του ηλεκτροσκοπίου ένα αρνητικά φορτισμένο πλαστικό ραβδί, ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακινούνται από το σφαιρίδιο προς τα ελάσματα, και το στέλεχος **ηλεκτρίζεται**. Επειδή τα ελάσματα φορτίζονται αρνητικά, απωθούνται μεταξύ τους και απομακρύνονται. Η απομάκρυνση των ελασμάτων αυξάνεται καθώς το ραβδί προσεγγίζει το στέλεχος, και εξαφανίζεται εάν το ραβδί απομακρυνθεί σε αρκετά μεγάλη απόσταση.

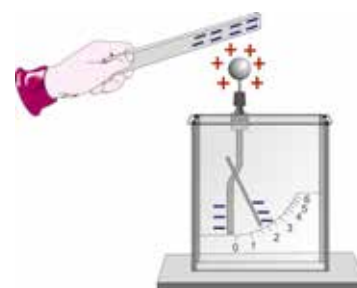
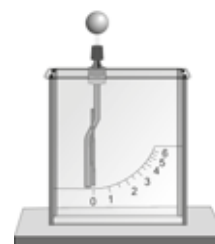
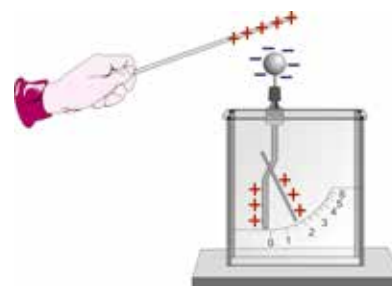
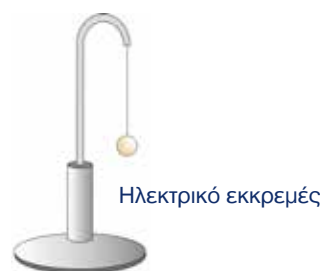
Φόρτιση με Επαφή

Εάν **αγγίξουμε** το στέλεχος του ηλεκτροσκοπίου με ένα θετικά φορτισμένο γυάλινο ραβδί, κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του στελέχους προσλαμβάνονται από τα θετικά φορτισμένα μέρη του ραβδιού.

- Το έλλειμμα ηλεκτρονίων προσδίδει θετικό φορτίο, το οποίο *διανομίζεται σε όλο το στέλεχος*. Επειδή τα ελάσματα έχουν ομόση-

Εικόνα 7-1

Όργανα ανίχνευσης ηλεκτρικού φορτίου.
(β) Ηλεκτρικό εκκρεμές.



μο (θετικό) φορτίο, απωθούν το ένα το άλλο και απομακρύνονται. Η απομάκρυνση των ελασμάτων αποτελεί ένδειξη ότι το στέλεχος φορτίσθηκε.



- Εάν **αγγίξουμε** το στέλεχος με ένα αρνητικά φορτισμένο πλαστικό ραβδί, ηλεκτρόνια από κάποια μέρη του ραβδιού μεταφέρονται στο στέλεχος. Τα ηλεκτρόνια αυτά προσδίδουν αρνητικό φορτίο, το οποίο διαμοιράζεται σε όλο το στέλεχος. Επειδή τα ελάσματα έχουν αρνητικό φορτίο, απωθούνται μεταξύ τους και απομακρύνονται.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.9.1.** Να εξηγήσετε με ποιο τρόπο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα αρνητικά φορτισμένο ραβδί από εβονίτη για να φορτίσουμε αρνητικά το στέλεχος ενός αφόρτιστου ηλεκτροσκοπίου.
- 7.9.2.** Εάν αγγίξουμε το μεταλλικό σφαιρίδιο του ηλεκτροσκοπίου με ένα θετικά φορτισμένο γυάλινο ραβδί και απομακρύνουμε το ραβδί, η απομάκρυνση μεταξύ των ελασμάτων θα διατηρηθεί;

Φόρτιση με επαγωγή

Εάν συνδέσουμε το στέλεχος του ηλεκτροσκοπίου με τη Γη με ένα αγωγίμο σύρμα, λέμε ότι το ηλεκτροσκόπιο είναι **γειωμένο**.

Η Γη συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος αγωγός, ο οποίος μπορεί να παρέχει ή να απορροφά ηλεκτρικό φορτίο. Μπορούμε να φορτίσουμε το γειωμένο στέλεχος ενός ηλεκτροσκοπίου με επαγωγή, ακολουθώντας τα πιο κάτω βήματα:

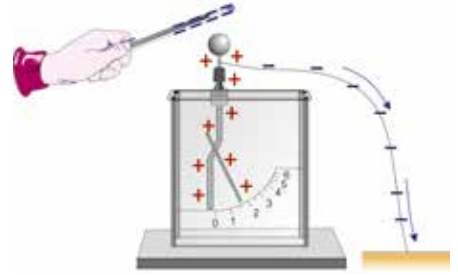


- Εάν **πλησιάσουμε** στο στέλεχος του ηλεκτροσκοπίου ένα θετικά φορτισμένο γυάλινο ραβδί, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τη Γη στο στέλεχος. Το στέλεχος αποκτά αρνητικό φορτίο.



- Εάν διακόψουμε τη σύνδεση στελέχους - Γης και απομακρύνουμε το ραβδί, το στέλεχος παραμένει αρνητικά φορτισμένο.

- Ομοίως, εάν **πλησιάσουμε** στο στέλεχος του ηλεκτροσκοπίου μία αρνητικά φορτισμένη πλαστική πένα, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το στέλεχος στη Γη, επειδή απωθούνται από την πένα. Το στέλεχος φορτίζεται θετικά.



Ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το στέλεχος στο έδαφος

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.9.3.** Εάν πλησιάσουμε (χωρίς να αγγίξουμε) ένα αρνητικά φορτισμένο ραβδί σε ένα γειωμένο ηλεκτροσκόπιο, το συνολικό φορτίο του ραβδιού μεταβάλλεται; Να εξηγήσετε την απάντησή σας.
- 7.9.4.** Εάν πλησιάσουμε (χωρίς να αγγίξουμε) μία θετικά φορτισμένη γυάλινη μπάλα σε ένα γειωμένο ηλεκτροσκόπιο, το συνολικό φορτίο της μπάλας μεταβάλλεται; Να εξηγήσετε την απάντησή σας.

Ασκήσεις

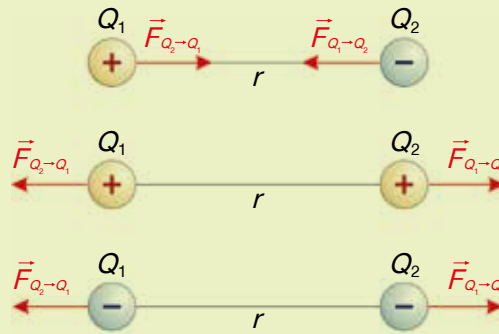
- 1 Μία αφόρτιστη μεταλλική σφαίρα κρέμεται από ένα μονωτικό νήμα.
 - (α) Εάν πλησιάσουμε στη σφαίρα μία αρνητικά φορτισμένη πλαστική ράβδο, η σφαίρα έλκεται και πλησιάζει τη ράβδο. Να εξηγήσετε από πού προέρχεται αυτή η έλξη, με τη βοήθεια κατάλληλου σχήματος στο οποίο να συμπεριλάβετε την κατανομή φορτίου στη σφαίρα. Η σφαίρα αποκτά ηλεκτρικό φορτίο ή παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερη;
 - (β) Ακουμπάμε τη ράβδο στη σφαίρα και την απομακρύνουμε. Εάν πλησιάσουμε ξανά τη ράβδο στη σφαίρα, παρατηρούμε ότι τα δύο σώματα απωθούνται. Να εξηγήσετε από πού προέρχεται η άπωση.
- 2 Έχετε στη διάθεσή σας μία γυάλινη ράβδο, μεταξωτό ύφασμα και δύο όμοιες μεταλλικές σφαίρες, οι οποίες στηρίζονται σε βάσεις από μονωτικό υλικό. Να περιγράψετε μία μέθοδο, με την οποία μπορείτε να φορτίσετε τις δύο σφαίρες με αντίθετα φορτία.
- 3 Τα ελαστικά των βυτιοφόρων εύφλεκτων υλικών είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να συμπεριφέρονται σαν αγωγοί. Γιατί είναι επιθυμητό αυτό;
- 4 Στην επόμενη άσκηση σας προτείνουμε να κατασκευάσετε το δικό σας ηλεκτροσκόπιο:
Υλικά: Ένα χοντρό χαρτόνι, ένας βιδωτός γάντζος, ένα σύρμα που είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, δύο κομμάτια αλουμινόχαρτου (1 cm) x (5 cm), κολλητική ταινία, γυάλινο δοχείο, πλαστικός χάρακας.



Διαδικασία: Να ακολουθήσετε τα βήματα της πιο πάνω εικόνας.

Ο **Νόμος του Coulomb** περιγράφει τις ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ οποιωνδήποτε σημειακών φορτίων:

Νόμος του Coulomb



Το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο **σημειακών** φορτίων Q_1 και Q_2 είναι ανάλογο με το γινόμενο των απολύτων τιμών των φορτίων και **αντιστρόφως ανάλογο** με το **τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης**:

$$|\vec{F}_{Q_1-Q_2}| = |\vec{F}_{Q_2-Q_1}| = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}$$

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις **Coulomb** $\vec{F}_{Q_1-Q_2}$ και $\vec{F}_{Q_2-Q_1}$ είναι **ζεύγος δράσης - αντίδρασης** και έχουν τη διεύθυνση της ευθείας που ενώνει τα δύο φορτία. Είναι **ελκτικές** όταν τα φορτία είναι **ετερόσημα** και **απωστικές** όταν τα φορτία είναι **ομόσημα**. Είναι δυνάμεις **από απόσταση**, και μηδενίζονται όταν η απόσταση μεταξύ των φορτίων γίνει άπειρη.

Η σταθερά k εκφράζεται σε μονάδες $\frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2}$ και ισούται με $k = 8,98755 \times 10^9 \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

Θα χρησιμοποιούμε την τιμή της σταθεράς k με δύο σημαντικά ψηφία, $k = 9,0 \times 10^9 \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2}$.

Η σταθερά k ισούται αριθμητικά με το μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb ανάμεσα σε δύο σημειακά φορτία $|Q_1| = |Q_2| = 1,0 \text{ C}$, όταν αυτά απέχουν μεταξύ τους κατά $1,0 \text{ m}$:

$$|\vec{F}_{Q_1-Q_2}| = |\vec{F}_{Q_2-Q_1}| = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(1,0 \text{ C}) \times (1,0 \text{ C})}{(1,0 \text{ m})^2} = 9,0 \times 10^9 \text{ N}$$

➔ Παρατήρηση

Η δύναμη αυτή είναι **τεράστια** (αντιστοιχεί με το βάρος ενός σώματος μάζας 900 χιλιάδων τόνων). Επειδή οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ φορτισμένων σωμάτων στην καθημερινή ζωή είναι μικρές, συμπεραίνουμε ότι τα φορτία αυτών των σωμάτων αντιστοιχούν σε πολύ μικρά κλάσματα του Coulomb (π.χ. μC ή nC).

Σημείωση

- Στις εφαρμογές του **Κεφαλαίου 7** θεωρούμε ότι **όλα** τα φορτισμένα σώματα συμπεριφέρονται σαν φορτισμένα υλικά σημεία.
- Σε κάποιες περιπτώσεις, η προσέγγιση υλικού σημείου είναι **ακριβής**: Οι δυνάμεις Coulomb που ασκούν ορισμένα φορτισμένα **στερεά** σώματα, όπως μία ομοιόμορφα φορτισμένη σφαίρα, μία ομοιόμορφα φορτισμένη σφαιρική επιφάνεια ή ένας ομοιόμορφα φορτισμένος σφαιρικός φλοιός, είναι ίδιες με τις δυνάμεις που θα ασκούσαν αυτά τα σώματα, εάν όλο το φορτίο τους ήταν τοποθετημένο στο γεωμετρικό κέντρο τους.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.10.1. Δύο φορτία $Q_1 = +1$ C και $Q_2 = -2$ C αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb. Ποιό/ά από τα επόμενα είναι σωστό:

- (α) Η δύναμη $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow Q_1}$, από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο φορτίο, έχει μεγαλύτερο μέτρο από τη δύναμη $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow Q_2}$.
- (β) Οι δύο δυνάμεις $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow Q_2}$ και $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow Q_1}$ έχουν ίσα μέτρα.
- (γ) Οι δύο δυνάμεις έχουν την ίδια διεύθυνση.
- (δ) Οι δύο δυνάμεις έχουν την ίδια κατεύθυνση.

7.10.2. Δύο φορτία ασκούν μεταξύ τους ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb μέτρου $|\vec{F}|$. Πώς θα μεταβληθεί το μέτρο των δυνάμεων μεταξύ των φορτίων, εάν:

- (α) Τα φορτία διπλασιασθούν.
- (β) Η απόσταση μεταξύ των φορτίων διπλασιασθεί.
- (γ) Μόνο ένα από τα φορτία διπλασιασθεί.

7.10.3. Δύο φορτία $+1$ C, που απέχουν μεταξύ τους κατά 1 m, αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb μέτρου

- (α) 10^{-9} N (β) 1 N, ή (γ) 9×10^9 N;

7.10.4. Το άτομο του σιδήρου περιέχει 26 πρωτόνια. Ποιά ασκεί μεγαλύτερη δύναμη, ο πυρήνας του σιδήρου σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου, ή το ηλεκτρόνιο στον πυρήνα του ατόμου;

Σύγκριση των Νόμων Coulomb και Παγκόσμιας Έλξης

- Η ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{\eta\lambda}$ μεταξύ δύο σημειακών φορτίων Q_1 και Q_2 έχει **δύο σημαντικές ομοιότητες** με την δύναμη παγκόσμιας έλξης $\vec{F}_{\beta\alpha\pi}$ μεταξύ δύο σωμάτων με μάζες m_1 και m_2 , που μπορούν να θεωρηθούν ως υλικά σημεία.
 1. Το μέτρο της $\vec{F}_{\eta\lambda}$ είναι ανάλογο με το γινόμενο των δύο φορτίων και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης. Ομοίως, το μέτρο της δύναμης παγκόσμιας έλξης

είναι ανάλογο με το γινόμενο των μαζών των σωμάτων και αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης:

$$|\vec{F}_{\eta\lambda}| = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2} \quad \text{και} \quad |\vec{F}_{\beta\alpha\mu}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

2. Τόσο η ηλεκτρική δύναμη, όσο και η δύναμη παγκόσμιας έλξης έχουν τη διεύθυνση της ευθείας, που ενώνει τα δύο σώματα.

- Εκτός από τις πιο πάνω δύο ομοιότητες, η ηλεκτρική δύναμη και η δύναμη παγκόσμιας έλξης έχουν και **μία σημαντική διαφορά**: Η δύναμη παγκόσμιας έλξης είναι πάντα **ελκτική**. Η ηλεκτρική δύναμη είναι **απωστική για ομόσημα φορτία** ($Q_1 Q_2 > 0$) και **ελκτική για ετερόσημα φορτία** ($Q_1 Q_2 < 0$).

Παράδειγμα 1

Να υπολογίσετε το μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb ανάμεσα στο πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου. Να υποθέσετε ότι τα δύο σωματίδια αντιστοιχούν σε σημειακά φορτία $q_1 = +e = +1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ και $q_2 = -e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$, που απέχουν μεταξύ τους κατά μέση απόσταση $r = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$.

Το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης είναι:

$$|\vec{F}_{\eta\lambda}| = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \times \frac{|1,602 \times 10^{-19} \text{ C}| \times |-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}|}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} =$$

$$\frac{9,0 \times (1,602)^2}{(5,3)^2} \times 10^{9-19-19+22} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}^2} = 8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$



Προσοχή

Όπως και στους υπολογισμούς των προβλημάτων Παγκόσμιας Έλξης, **μεταφέρουμε τις δυνάμεις του 10 στο τέλος κάθε έκφρασης, και εκτελούμε ξεχωριστά τις πράξεις μεταξύ τους**. Σας συνιστούμε να μην κάνετε πράξεις δυνάμεων του 10 με υπολογιστική, διότι είναι πιο δύσκολο να επιβεβαιώσετε εάν το τελικό αποτέλεσμα είναι ορθό.

Παράδειγμα 2

Να υπολογίσετε το μέτρο της δύναμης παγκόσμιας έλξης ανάμεσα στο πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου, και να το συγκρίνετε με το μέτρο της δύναμης Coulomb μεταξύ των δύο σωματιδίων.

Η δύναμη παγκόσμιας έλξης ανάμεσα στο πρωτόνιο και στο ηλεκτρόνιο έχει μέτρο:

$$|\vec{F}_{\beta\alpha\rho}| = \left(6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}\right) \times \frac{(1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (9,1094 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} =$$

$$\frac{6,67 \times 1,6726 \times 9,1094}{(5,3)^2} \times 10^{-11-27-31+22} \frac{\text{Nm}^2 \text{ kg}^2}{\text{kg}^2 \text{ m}^2} = 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

Ο λόγος των μέτρων των δύο δυνάμεων είναι:

$$\frac{|\vec{F}_{\eta\lambda}|}{|\vec{F}_{\beta\alpha\rho}|} = \frac{8,2 \times 10^{-8} \text{ N}}{3,6 \times 10^{-47} \text{ N}} = 2,3 \times 10^{39}$$

Άρα, η ηλεκτρική δύναμη είναι **πολύ ισχυρότερη** από τη δύναμη παγκόσμιας έλξης.

Ερώτηση

Ποιά θα έπρεπε να είναι η μάζα του πρωτονίου, για να ασκεί στο ηλεκτρόνιο δύναμη παγκόσμιας έλξης ίσου μέτρου με την ηλεκτρική;

Αφού η δύναμη παγκόσμιας έλξης είναι ανάλογη με τη μάζα, συμπεραίνουμε ότι η μάζα του πρωτονίου θα έπρεπε να γίνει $2,3 \times 10^{39}$ φορές μεγαλύτερη, δηλαδή ίση με:

$$(2,3 \times 10^{39}) \times (1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 3,8 \times 10^{12} \text{ kg} \cong 4 \times 10^9 \text{ t.}$$

Παράδειγμα 3

Να υπολογίσετε το μέτρο της δύναμης Coulomb ανάμεσα σε δύο πρωτόνια στον πυρήνα του ατόμου του χρυσού. Να υποθέσετε ότι η μέση απόσταση μεταξύ των πρωτονίων ισούται με τη διάμετρο του πυρήνα του ατόμου του χρυσού ($r \cong 7,5 \times 10^{-15} \text{ m}$).

Η δύναμη Coulomb ανάμεσα σε δύο πρωτόνια είναι απωστική και έχει μέτρο:

$$|\vec{F}_{\eta\lambda}| = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \times \frac{(1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{(7,5 \times 10^{-15} \text{ m})^2} =$$

$$\frac{9,0 \times (1,602)^2}{(7,5)^2} \times 10^{9-19-19+30} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}^2} = 4,1 \text{ N}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη τη μικρή μάζα του πρωτονίου, συμπεραίνουμε ότι η δύναμη αυτή είναι **τεράστια**: Η δύναμη αυτή θα μπορούσε να προσδώσει τεράστια επιτάχυνση σε ένα πρωτόνιο:

$$\frac{|\vec{F}_{\eta\lambda}|}{m_p} = \frac{4,1 \text{ N}}{1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 2,5 \times 10^{27} \text{ m/s}^2$$

Για να συγκρατούνται τα πρωτόνια στον πυρήνα του ατόμου, πρέπει να ασκείται μεταξύ τους μία **ελκτική** δύναμη, η οποία εξουδετερώνει την ηλεκτρική άπωση. Η αλληλεπίδραση αυτή είναι η **ισχυρή πυρηνική**.

Παράδειγμα 4

Ένα γυάλινο ραβδί και ένα πλαστικό κουμπί έχουν **αντίθετα** φορτία $Q_p = -Q_k$. Το κουμπί είναι ακουμπισμένο σε ένα τραπέζι. Εάν πλησιάσουμε το γυάλινο ραβδί σε απόσταση 0,50 cm από το κουμπί, παρατηρούμε ότι το κουμπί ανασπώνεται και κολλά στο ραβδί. Να υπολογίσετε τα φορτία του ραβδιού και του κουμπιού, υποθέτοντας ότι κατά καλή προσέγγιση τα δύο σώματα συμπεριφέρονται σαν σημειακά φορτία. Θεωρήστε ότι το κουμπί έχει μάζα $m_k = 0,010$ kg.

Το ραβδί ανασπώνει το κουμπί όταν η ελκτική ηλεκτρική δύναμη μεταξύ τους γίνει ίση κατά μέτρο με το βάρος του κουμπιού. Άρα:

$$|\vec{F}_{\eta\lambda}| = m_k g \Rightarrow k \frac{|Q_k||Q_p|}{r^2} = m_k g \Rightarrow |Q_k| = |Q_p| = \sqrt{\frac{(m_k g)r^2}{k}} =$$

$$\sqrt{\frac{(0,010 \text{ kg}) \times (9,81 \text{ m/s}^2) \times (0,0050 \text{ m})^2}{9,0 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2}} = \sqrt{\frac{1,0 \times 10^{-2} \times 9,81 \times (5,0 \times 10^{-3})^2}{0,90 \times 10^{10}} \frac{\text{N m}^2}{\text{N m}^2/\text{C}^2}} =$$

$$\sqrt{272,5 \cdot 10^{-18} \text{ C}} = 1,7 \times 10^{-8} \text{ C}$$

Να παρατηρήσετε ότι τα φορτία του ραβδιού και του κουμπιού είναι **πολύ μικρά κλάσματα** του φορτίου Coulomb.

Ερώτηση

Σε πόσα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί το φορτίο του κουμπιού;

Για να βρούμε τον αριθμό ηλεκτρονίων, διαιρούμε το φορτίο του κουμπιού με το φορτίο ανά ηλεκτρόνιο:

$$N = \frac{|Q_k|}{|-e|} = \frac{1,7 \times 10^{-8} \text{ C}}{1,602 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1,1 \times 10^{11}$$

Ερώτηση

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσδιορίσαμε είναι τεράστιος. Θα υποθέσουμε ότι το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του κουμπιού. Ποιό είναι το ποσοστό των ατόμων της επιφάνειας του κουμπιού, που έχουν φορτισθεί αρνητικά, εάν το κουμπί έχει ακτίνα $r_k = 1,0$ cm;

Ο υπολογισμός που θα κάνουμε είναι προσεγγιστικός. Το κουμπί μπορεί να προσεγγισθεί σαν ένας δίσκος με δύο επιφάνειες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εμβαδόν ενός κυκλικού δίσκου ακτίνας r ισούται με πr^2 , η συνολική επιφάνεια του κουμπιού είναι $2\pi r_{\kappa}^2$.

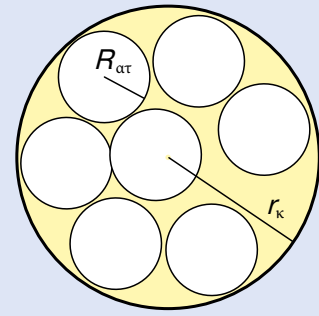
Ομοίως, η επιφάνεια που αναλογεί σε κάθε άτομο του κουμπιού είναι ίση με $\pi R_{\text{ατ}}^2$, όπου $R_{\text{ατ}}$ είναι η τυπική ακτίνα ενός ατόμου $R_{\text{ατ}} \cong 10^{-8} \text{ cm}$. Άρα, ο αριθμός ατόμων της επιφάνειας του κουμπιού είναι περίπου

$$\frac{2\pi r_{\kappa}^2}{\pi R_{\text{ατ}}^2} = 2 \left(\frac{r_{\kappa}}{R_{\text{ατ}}} \right)^2 \cong 2 \times \left(\frac{1,0 \text{ cm}}{1,0 \times 10^{-8} \text{ cm}} \right)^2 = 2,0 \times 10^{16}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη την περίσσεια ηλεκτρονίων, που υπολογίσαμε στην προηγούμενη ερώτηση, συμπεραίνουμε ότι το ποσοστό φορτισμένων ατόμων είναι:

$$\frac{1,1 \times 10^{11}}{2,0 \times 10^{16}} = \frac{1}{2 \times 10^5}$$

Άρα, σε κάθε 200 000 άτομα της επιφάνειας, μόλις ένα άτομο είναι φορτισμένο.



Υπολογισμός της Συνολικής Ηλεκτρικής Δύναμης σε ένα Φορτίο από δύο ή περισσότερα Φορτία - Αρχή της Υπέρθωσης

Η Εικόνα 7-2(α) απεικονίζει ένα σημειακό φορτίο Q_1 , το οποίο είναι ακίνητο σε κάποιο σημείο A του χώρου.

1. Έστω ότι τοποθετούμε ένα σημειακό φορτίο q στο σημείο Γ. Στο φορτίο q θα ασκηθεί ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ κατά τη διεύθυνση ΑΓ, με μέτρο που υπολογίζεται από τον νόμο του Coulomb:

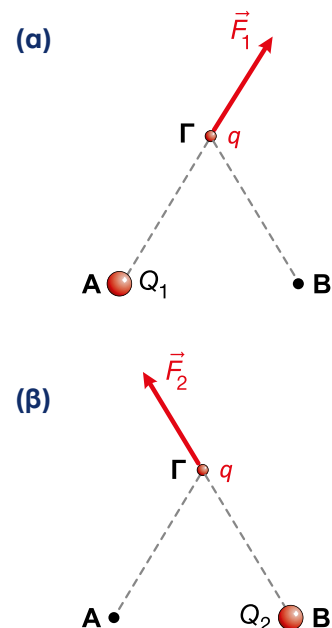
$$|\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}| = k \frac{|Q_1||q|}{r_{\text{ΑΓ}}^2}$$

2. Αφαιρούμε το φορτίο Q_1 και τοποθετούμε ένα νέο σημειακό φορτίο Q_2 στο σημείο B (σχήμα 7-2(β)). Μετρούμε ότι στο φορτίο q ασκείται ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$ κατά τη διεύθυνση ΒΓ, με μέτρο που υπολογίζεται επίσης από τον νόμο του Coulomb:

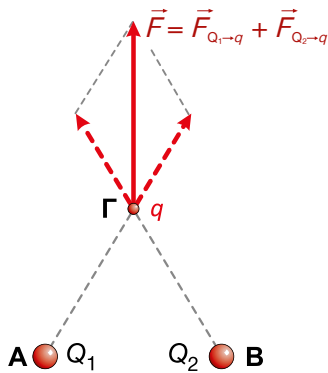
$$|\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}| = k \frac{|Q_2||q|}{r_{\text{ΒΓ}}^2}$$

Εικόνα 7-2

Η συνολική ηλεκτρική δύναμη \vec{F} στο φορτίο q , λόγω των φορτίων Q_1 και Q_2 , ισούται με το **διανυσματικό άθροισμα** των ηλεκτρικών δυνάμεων $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ και $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$, που ασκούν τα φορτία Q_1 και Q_2 ξεχωριστά στο q .



(γ)



3. Επαναφέρουμε το φορτίο Q_1 στο σημείο Α, **διατηρώντας** το φορτίο Q_2 στο σημείο Β (σχήμα 7-2(γ)). **Διαπιστώνουμε πειραματικά** ότι στο φορτίο q ασκείται **συνισταμένη** ηλεκτρική δύναμη \vec{F} , η οποία αντιστοιχεί στο διανυσματικό άθροισμα των $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ και $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$, που υπολογίσαμε προηγουμένως:

$$\vec{F} = \vec{F}_{Q_1 \rightarrow q} + \vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$$

Η πειραματική αυτή διαπίστωση αντιστοιχεί στην αρχή της **υπέρθεσης** για την ηλεκτρική δύναμη, και ισχύει γενικότερα για αυθαίρετο αριθμό φορτίων:

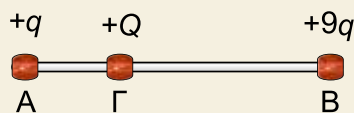
Αρχή της Υπέρθεσης

Η ηλεκτρική δύναμη, που δρα σε ένα σημειακό φορτίο από μία κατανομή σημειακών φορτίων Q_1, Q_2, Q_3, \dots , ισούται με το **διανυσματικό** άθροισμα των ηλεκτρικών δυνάμεων Coulomb από κάθε φορτίο ξεχωριστά:

$$\vec{F} = \vec{F}_{Q_1 \rightarrow q} + \vec{F}_{Q_2 \rightarrow q} + \vec{F}_{Q_3 \rightarrow q} + \dots$$

Παράδειγμα 1

Δύο μικρές χάντρες Α και Β, με θετικά φορτία $+q$ και $+9q$ αντίστοιχα, στερεώνονται στις άκρες μίας ράβδου από μονωτικό υλικό, μήκους L . Μια τρίτη χάντρα Γ έχει θετικό φορτίο $+Q$ και μπορεί να κινείται ελεύθερα πάνω στη μονωμένη ράβδο, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Σε ποια απόσταση από τις δύο χάντρες μπορεί να ισορροπεί η χάντρα Γ;



Έστω ότι στη θέση ισορροπίας, η χάντρα Γ απέχει κατά x από την Α και κατά $L-x$ από την Β. Τα μέτρα των δυνάμεων από τις Α και Β στη Γ είναι:

$$|\vec{F}_{A \rightarrow \Gamma}| = k \frac{qQ}{x^2} \quad \text{και} \quad |\vec{F}_{B \rightarrow \Gamma}| = k \frac{(9q)Q}{(L-x)^2}$$

Επειδή οι δυνάμεις $\vec{F}_{A \rightarrow \Gamma}$ και $\vec{F}_{B \rightarrow \Gamma}$ έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, η συνισταμένη τους μηδενίζεται όταν τα μέτρα τους είναι ίσα:

$$|\vec{F}_{A \rightarrow \Gamma}| = |\vec{F}_{B \rightarrow \Gamma}| \Rightarrow k \frac{qQ}{x^2} = k \frac{(9q)Q}{(L-x)^2} \Rightarrow \frac{1}{x^2} = \frac{9}{(L-x)^2} \Rightarrow (L-x)^2 = (3x)^2 \Rightarrow L-x = \pm 3x \Rightarrow \begin{matrix} x = L/4 \\ x = -L/2 \end{matrix}$$

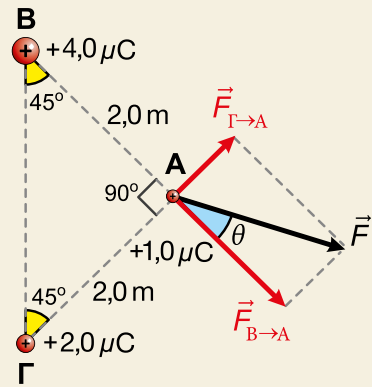
Από τις πιο πάνω λύσεις, αποδεκτή είναι η θετική. Άρα, η χάντρα Γ απέχει κατά $L/4$ από την Α.

Παράδειγμα 2

Τρία φορτία είναι τοποθετημένα στις κορυφές ενός ορθογωνίου ισοσκελούς τριγώνου ABΓ, όπως στο σχήμα.

Να υπολογίσετε τη συνολική ηλεκτρική δύναμη \vec{F} στο φορτίο του σημείου A.

Τα τρία φορτία είναι θετικά, οπότε μεταξύ τους ασκούνται **απωστικές** δυνάμεις. Η δύναμη από το φορτίο B στο φορτίο A έχει την κατεύθυνση της ευθείας BA και μέτρο:



$$|\vec{F}_{B \rightarrow A}| = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times \frac{(4,0 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (1,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2,0 \text{ m})^2} =$$

$$\frac{9,0 \times 4,0 \times 1,0}{4,0} \times 10^{9-6-6} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}^2} = 9,0 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Ομοίως, η δύναμη από το φορτίο Γ στο φορτίο A έχει την κατεύθυνση της ευθείας ΓA και μέτρο:

$$|\vec{F}_{\Gamma \rightarrow A}| = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times \frac{(2,0 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (1,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2,0 \text{ m})^2} =$$

$$\frac{9,0 \times 2,0 \times 1,0}{4,0} \times 10^{9-6-6} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}^2} = 4,5 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Επειδή οι ευθείες BA και ΓA είναι κάθετες μεταξύ τους, τα διανύσματα των δυνάμεων $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ και $\vec{F}_{\Gamma \rightarrow A}$ είναι κάθετα μεταξύ τους. Το μέτρο της συνισταμένης δύναμης \vec{F} υπολογίζεται από το Πυθαγόρειο θεώρημα:

$$|\vec{F}| = \sqrt{(9,0 \times 10^{-3} \text{ N})^2 + (4,5 \times 10^{-3} \text{ N})^2} = \sqrt{9,0^2 + 4,5^2} \times 10^{-3} \text{ N} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

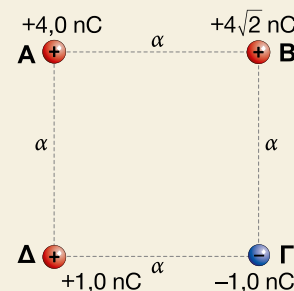
Η γωνία θ της \vec{F} με την ευθεία BA υπολογίζεται από τη σχέση:

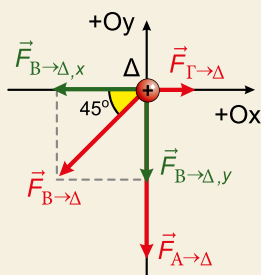
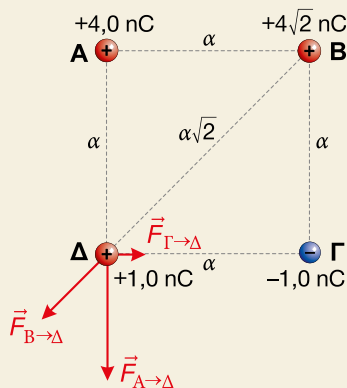
$$\varepsilon\varphi\theta = \frac{|\vec{F}_{\Gamma \rightarrow A}|}{|\vec{F}_{B \rightarrow A}|} = 0,5 \Rightarrow \theta = 26,6^\circ$$

Παράδειγμα 3

Τέσσερα φορτία $q_A = +4,0 \text{ nC}$, $q_B = +4\sqrt{2} \text{ nC}$, $q_\Gamma = -1,0 \text{ nC}$, $q_\Delta = +1,0 \text{ nC}$ είναι τοποθετημένα στις κορυφές τετραγώνου πλευράς $\alpha = 3 \text{ cm}$. Να υπολογίσετε τη συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη στο φορτίο q_Δ .

Για την επίλυση ακολουθούμε την εξής πορεία:





A. Σχεδιάζουμε σε διάγραμμα ελεύθερου σώματος τις δυνάμεις που ασκούνται στο φορτίο q_{Δ} από τα άλλα τρία φορτία.

B. Υπολογίζουμε τα μέτρα των δυνάμεων στο φορτίο q_{Δ} με τον Νόμο του Coulomb:

$$|\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}| = k \frac{|q_A| |q_{\Delta}|}{\alpha^2} =$$

$$\left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \times \frac{(4,0 \times 10^{-9} \text{ C}) \times (1,0 \times 10^{-9} \text{ C})}{(3,0 \times 10^{-2} \text{ m})^2} =$$

$$4,0 \times 10^{9-9-4} \text{ N} = 4,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

$$|\vec{F}_{B \rightarrow \Delta}| = k \frac{|q_B| |q_{\Delta}|}{(\alpha\sqrt{2})^2} = k \frac{|q_B| |q_{\Delta}|}{2\alpha^2} = \frac{|q_B|}{2|q_A|} |\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}| = 2\sqrt{2} \times 10^{-5} \text{ N}$$

$$|\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Delta}| = k \frac{|q_{\Gamma}| |q_{\Delta}|}{\alpha^2} = \frac{|q_{\Gamma}|}{|q_A|} |\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}| = 1,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Γ. Αναλύουμε τις δυνάμεις σε συνιστώσες ως προς κατάλληλο σύστημα αξόνων.

Η δύναμη $\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}$ έχει την κατεύθυνση του αρνητικού άξονα Oy, οπότε $F_{A \rightarrow \Delta, x} = 0$ και

$$F_{A \rightarrow \Delta, y} = -|\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}| \sin 0^\circ = -|\vec{F}_{A \rightarrow \Delta}| = -4,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Η δύναμη $\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Delta}$ έχει την κατεύθυνση του θετικού άξονα Ox, οπότε ισχύει:

$$F_{\Gamma \rightarrow \Delta, x} = |\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Delta}| \sin 0^\circ = |\vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Delta}| = 1,0 \times 10^{-5} \text{ N}, \quad F_{\Gamma \rightarrow \Delta, y} = 0 \text{ N}$$

Η διανυσματική συνιστώσα $\vec{F}_{B \rightarrow \Delta, x}$ έχει την κατεύθυνση του αρνητικού άξονα Ox:

$$F_{B \rightarrow \Delta, x} = -|\vec{F}_{B \rightarrow \Delta}| \sin 45^\circ = -(2\sqrt{2} \times 10^{-5} \text{ N}) \frac{\sqrt{2}}{2} = -2,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Ομοίως, η διανυσματική συνιστώσα $\vec{F}_{B \rightarrow \Delta, y}$ έχει την κατεύθυνση του αρνητικού άξονα Oy, οπότε:

$$F_{B \rightarrow \Delta, y} = -|\vec{F}_{B \rightarrow \Delta}| \sin 45^\circ = -2,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Δ. Προσδιορίζουμε τις συνιστώσες της συνισταμένης δύναμης με τον κανόνα των συνιστωσών:

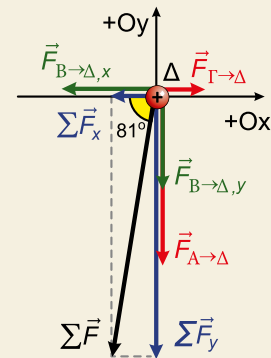
$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{A \rightarrow \Delta} + \vec{F}_{B \rightarrow \Delta} + \vec{F}_{\Gamma \rightarrow \Delta}$$

Άρα:
$$\sum F_x = F_{A \rightarrow \Delta, x} + F_{B \rightarrow \Delta, x} + F_{\Gamma \rightarrow \Delta, x} =$$

$$0 \text{ N} - (2,0 \times 10^{-5} \text{ N}) + (1,0 \times 10^{-5} \text{ N}) = -1,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$

$$\sum F_y = F_{A \rightarrow \Delta, y} + F_{B \rightarrow \Delta, y} + F_{\Gamma \rightarrow \Delta, y} =$$

$$(-4,0 \times 10^{-5} \text{ N}) - (2,0 \times 10^{-5} \text{ N}) + 0 \text{ N} = -6,0 \times 10^{-5} \text{ N}$$



Ε. Από το Πυθαγόρειο θεώρημα βρίσκουμε το μέτρο της συνισταμένης δύναμης:

$$|\sum \vec{F}| = \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} = \sqrt{(-1,0 \times 10^{-5} \text{ N})^2 + (-6,0 \times 10^{-5} \text{ N})^2} = \sqrt{1,0^2 + 6,0^2} \times 10^{-5} \text{ N} = 6,1 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Η γωνία θ , που σχηματίζει η συνισταμένη $\sum \vec{F}$ με τον άξονα Ox , είναι:

$$\varepsilon\varphi\theta = \frac{|\sum F_y|}{|\sum F_x|} = \frac{6,0 \times 10^{-5} \text{ N}}{1,0 \times 10^{-5} \text{ N}} = 6,0 \Rightarrow \theta \cong 81^\circ$$



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.10.5. Δύο φορτία $Q_1 = +1 \text{ C}$ και $Q_2 = +2 \text{ C}$ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις Coulomb. Εάν προσθέσουμε ένα τρίτο φορτίο Q_3 στο χώρο, χωρίς να μεταβάλλουμε την απόσταση μεταξύ των Q_1 και Q_2 , ποιά από τα επόμενα είναι σωστό:

- (α) Τα μέτρα των δυνάμεων μεταξύ των Q_1 και Q_2 θα αυξηθούν.
- (β) Οι δυνάμεις μεταξύ των Q_1 και Q_2 θα παραμείνουν αμετάβλητες.

7.10.6. Σε ένα φορτίο q δρουν ηλεκτρικές δυνάμεις μέτρου 1 N από δύο άλλα φορτία. Στον χώρο δεν υπάρχουν άλλα φορτία. Ποιά από τα επόμενα είναι **πάντοτε** σωστό;

- (α) Η συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη στο q έχει μέτρο 2 N .
- (β) Η συνισταμένη δύναμη στο q είναι μηδενική.
- (γ) Το q ασκεί σε κάθε ένα από τα άλλα δύο φορτία ηλεκτρική δύναμη μέτρου 1 N .

7.10.7. Σε ένα φορτίο q δρουν ηλεκτρικές δυνάμεις μέτρου 1 N από δύο άλλα φορτία. Η συνισταμένη δύναμη στο q είναι μηδενική. Τι μπορείτε να συμπεράνετε για το μέτρο και την κατεύθυνση των δυνάμεων, που ασκεί το q στα δύο φορτία;



Ο Ζυγός Στρέψης του Coulomb

Ο Γάλλος μηχανικός και Φυσικός Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) κατασκεύασε το 1785 μία πειραματική διάταξη εκπληκτικής ακρίβειας για την εποχή του, με την οποία πραγματοποίησε ακριβείς μετρήσεις των ηλεκτρικών δυνάμεων ανάμεσα σε δύο μικρές φορτισμένες σφαίρες Α και Β.

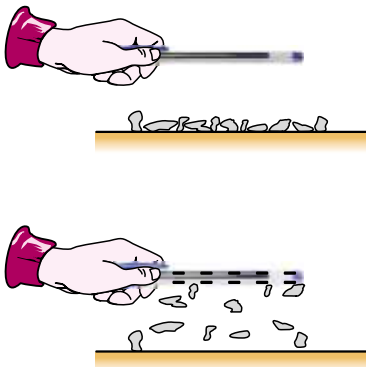
Ο Coulomb μετέβαλλε τα φορτία ή την απόσταση των σφαιρών Α και Β και διαπίστωσε ότι:

- (α) τα μέτρα των ηλεκτροστατικών δυνάμεων μεταξύ των σφαιρών ήταν αντίστροφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης μεταξύ των κέντρων τους.
- (β) Τα μέτρα των ηλεκτροστατικών δυνάμεων ήταν ανάλογα με το ηλεκτρικό φορτίο κάθε σφαίρας και επομένως και με το γινόμενο των φορτίων.

Με βάση τα συμπεράσματα αυτά, ο Coulomb διατύπωσε τον σχετικό νόμο.

7.11. Πόλωση ενός Μονωτή

Με βάση την εξάρτηση του μέτρου της δύναμης Coulomb από την απόσταση μεταξύ φορτίων μπορούμε να ερμηνεύσουμε πώς **ένα φορτισμένο σώμα είναι δυνατόν να έλκει και να έλκεται από ένα ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα.**



Ας φαντασθούμε ότι εκτελούμε το πιο κάτω πείραμα:

- (α) Πλησιάζουμε μία αφόρτιστη πένα σε κομματάκια χαρτιού, αλλά δεν παρατηρούμε κάποια έλξη μεταξύ τους. Η πένα και τα χαρτάκια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.
- (β) Τρίβουμε την πένα στα μαλλιά μας, οπότε φορτίζεται. Εάν πλησιάσουμε την πένα κοντά στα χαρτάκια, τα ανασπκώνει. Συμπεραίνουμε ότι η πένα και τα χαρτάκια αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικές δυνάμεις.

Η τελευταία διαπίστωση δεν είναι αναμενόμενη. Από το βήμα **(α)** γνωρίζουμε ότι τα χαρτάκια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Επειδή το χαρτί είναι μονωτής, τα κομματάκια του χαρτιού δεν είναι δυνατόν να φορτισθούν με επαγωγή από το έδαφος, μόλις πλησιάσουμε σε αυτά τη φορτισμένη πένα (στο βήμα **(β)**). Πώς έλκεται το χαρτί από την πένα;

Για να ερμηνεύσουμε την έλξη αυτή, θα εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν ένα **φορτισμένο** σωματίο πλησιάζει ένα **ηλεκτρικά ουδέτερο** άτομο με συμμετρική κατανομή θετικού και αρνητικού φορτίου (**Εικόνα 7-3**).

Στο σχήμα **7-3(α)**, το άτομο δεν αλληλεπιδρά με κάποιο φορτισμένο σώμα, και το “γεωμετρικό κέντρο” του θετικού του φορτίου (πυρήνας) και του αρνητικού του φορτίου (ηλεκτρόνια) συμπίπτουν.

Στο σχήμα **7-3(β)**, ένα αρνητικά φορτισμένο σωματίο πλησιάζει το άτομο. Επειδή το σωματίο απωθεί τα ηλεκτρόνια και έλκει τον πυρήνα του ατόμου, το “κέντρο” του αρνητικού φορτίου του ατόμου απομακρύνεται από το σωματίο, ενώ ο πυρήνας του ατόμου κινείται προς το σωματίο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **πόλωση** του ατόμου. Η απόσταση μεταξύ του κέντρου θετικού φορτίου και του κέντρου αρνητικού φορτίου αποκτά κάποια μέγιστη τιμή d , όταν οι ελκτικές ηλεκτρικές δυνάμεις πυρήνα - ηλεκτρονίων εξισορροπήσουν τις εξωτερικές ηλεκτρικές δυνάμεις από το σωματίο. Η τιμή d είναι πολύ μικρή (συγκρίσιμη με το μέγεθος του ατομικού πυρήνα, περίπου 10^{-15} m, δηλαδή 100 000 φορές μικρότερη από την τυπική ακτίνα του ατόμου).

Εξαιτίας της πόλωσης του ατόμου, το σωματίο βρίσκεται πιο κοντά στον πυρήνα σε σχέση με το κέντρο αρνητικού φορτίου. Συνεπώς, η ελκτική δύναμη Coulomb σωματίου - πυρήνα έχει μεγαλύτερο μέτρο από την απωστική δύναμη Coulomb σωματίου - αρνητικού φορτίου, με αποτέλεσμα στο άτομο να δρα μία **συνολική ελκτική δύναμη** από το σωματίο. Από τον Τρίτο Νόμο του Νεύτωνα προκύπτει ότι στο σωματίο δρα μία αντίθετη (επίσης ελκτική) δύναμη από το άτομο.

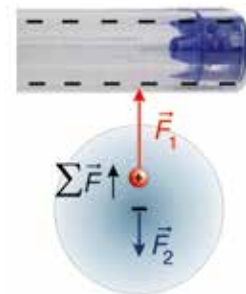
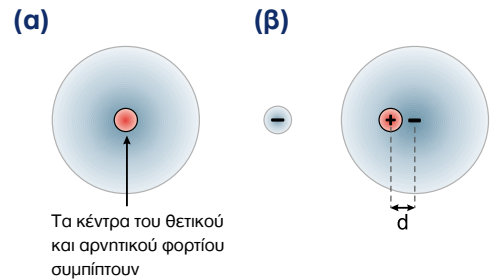
Η συμπεριφορά που περιγράψαμε χαρακτηρίζει όλα τα άτομα και μόρια. Με αυτό τον τρόπο εξηγείται η έλξη μεταξύ των ηλεκτρικά ουδέτερων μορίων του χαρτιού και της φορτισμένης πένα.

Συμβολίζουμε συνήθως ένα **πολωμένο** άτομο ή μόριο ως ένα μακρόστενο σφαιροειδές σώμα, με αντίθετα φορτία στα άκρα του.

Εικόνα 7-3

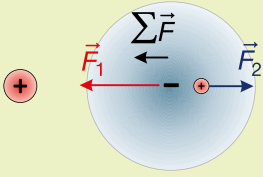
(α) Σε ένα ουδέτερο άτομο με συμμετρική κατανομή φορτίου, τα «γεωμετρικά κέντρα» του θετικού και αρνητικού φορτίου συμπίπτουν.

(β) Το φορτισμένο σωματίο προκαλεί **πόλωση** του ατόμου, δηλαδή μετακίνηση του κέντρου θετικού φορτίου ως προς το κέντρο αρνητικού φορτίου του ατόμου.



Παρατήρηση

Εάν ένα **θετικά φορτισμένο** σωματίο πλησιάσει ένα ηλεκτρικά ουδέτερο μόριο ή άτομο, προκαλεί προσέγγιση των ηλεκτρονίων και απομάκρυνση των πυρήνων του μορίου ή ατόμου. Η συνισταμένη ηλεκτρι-



κή δύναμη από το φορτίο είναι πάλι ελκτική. Από τον Τρίτο Νόμο του Νεύτωνα προκύπτει ότι το πολωμένο μόριο ή άτομο ασκεί μία αντίθετη, επίσης ελκτική δύναμη στο φορτίο.

Οι ελκτικές δυνάμεις ανάμεσα σε ένα φορτισμένο μόριο και ένα πολωμένο, ηλεκτρικά ουδέτερο μόριο είναι πολύ ασθενείς. Όμως, όταν ένα φορτισμένο σώμα **A** πλησιάζει ένα ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα **B**, ένας μεγάλος αριθμός μορίων του **B** πολώνονται.

Η συνισταμένη όλων των ελκτικών δυνάμεων ανάμεσα στα μόρια των σωμάτων **A** και **B** μπορεί να γίνει σημαντική. Για παράδειγμα, όταν η φορτισμένη πένα ανασπκώνει ένα κομμάτι χαρτιού, η συνισταμένη ελκτική δύναμη γίνεται συγκρίσιμη με το βάρος του χαρτιού.

Σημείωση

Όλες οι δυνάμεις που αντιλαμβανόμαστε στην καθημερινή ζωή είναι **ηλεκτρομαγνητικές**, με εξαίρεση το βάρος των σωμάτων.

Όταν τα σώματα της καθημερινής μας ζωής είναι **ηλεκτρικά φορτισμένα**, αποκτούν ένα πολύ μικρό ποσοστό φορτισμένων ατόμων ή μορίων, και το συνολικό τους φορτίο είναι ένα πολύ μικρό υποπολλαπλάσιο του φορτίου Coulomb. Οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ **φορτισμένων** σωμάτων ακολουθούν τον νόμο του Coulomb, και γίνονται αισθητές **από απόσταση**.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ηλεκτρικές δυνάμεις γίνονται αισθητές μόνο όταν τα σώματα εφάπτονται. Για παράδειγμα, δύο επιφάνειες ασκούν στατική τριβή μεταξύ τους μόνο όταν εφάπτονται και τείνουν να κινηθούν η μία ως προς την άλλη. Όταν τουλάχιστον το ένα από τα σώματα που αλληλεπιδρούν είναι **ηλεκτρικά ουδέτερο**, οι ηλεκτρικές δυνάμεις συμπεριφέρονται σαν **δυνάμεις επαφής**.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.11.1.** Μια θετικά φορτισμένη γυάλινη ράβδος έλκει ένα μικρό πλαστικό σφαιρίδιο, στερεωμένο στην άκρη ενός μονωτικού νήματος. Μπορούμε από αυτή την παρατήρηση να συμπεράνουμε ότι το σφαιρίδιο είναι αρνητικά φορτισμένο;
- 7.11.2.** Ένας φορτισμένος λίθος κεκριμπαριού μπορεί να έλκει ηλεκτρικά ουδέτερα κομματάκια από άχυρο. Πώς είναι δυνατόν αυτό;
- 7.11.3.** Τα ηλεκτρικά ουδέτερα κομματάκια του άχυρου έλκουν τον λίθο από κεκριμπαρι; Ποιά από τις δύο δυνάμεις έχει μεγαλύτερο μέτρο, του άχυρου προς το κεκριμπαρι ή του κεκριμπαριού προς το άχυρο;

Ερωτήσεις Κατανόησης

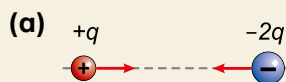
Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **απολογηθείτε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Δύο φορτία Q_A και Q_B αλληλεπιδρούν με δυνάμεις Coulomb. Εάν διπλασιασθεί το φορτίο Q_A και το φορτίο Q_B παραμείνει αμετάβλητο:	
α	Το μέτρο της δύναμης $ \vec{F}_{Q_A \rightarrow Q_B} $ διπλασιάζεται, αλλά το μέτρο της δύναμης $ \vec{F}_{Q_B \rightarrow Q_A} $ παραμένει σταθερό.	
β	Τα μέτρα και των δύο δυνάμεων διπλασιάζονται.	
γ	Τα μέτρα και των δύο δυνάμεων θα αλλάξουν μόνο εάν μεταβληθούν και τα δύο φορτία.	
2	Δύο σημειακά φορτία Q_A και Q_B απέχουν μεταξύ τους κατά r . Εάν κρατήσουμε το Q_B ακίνητο και μετακινήσουμε το φορτίο Q_A σε απόσταση $10r$:	
α	Το μέτρο της δύναμης $ \vec{F}_{Q_A \rightarrow Q_B} $ γίνεται 100 φορές μικρότερο, αλλά το μέτρο της $ \vec{F}_{Q_B \rightarrow Q_A} $ παραμένει σταθερό.	
β	Τα μέτρα και των δύο δυνάμεων γίνονται 100 φορές μικρότερα.	
γ	Τα μέτρα και των δύο δυνάμεων γίνονται 10 φορές μικρότερα.	

Ασκήσεις

Νόμος του Coulomb

- 1 Να επιλέξετε ποιο από τα κάτω σχήματα (α) - (γ) αποδίδει σωστά τις ηλεκτρικές δυνάμεις, που ασκούνται μεταξύ των σημειακών φορτίων του διπλανού σχήματος.

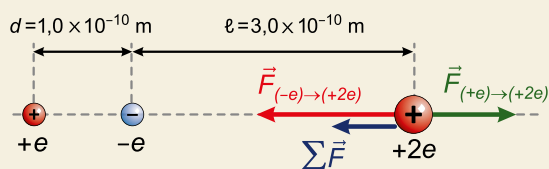


- 2 Δύο σημειακά φορτία $q_1 = +0,2 \mu\text{C}$ και $q_2 = -0,4 \mu\text{C}$ βρίσκονται σε απόσταση $0,40 \text{ m}$. Να υπολογίσετε τα μέτρα των ηλεκτρικών δυνάμεων ανάμεσα στα δύο φορτία και να σχεδιάσετε τα διανύσματά τους.

- 3 Δύο μικροί όμοιοι γυάλινοι βόλοι είναι ομοιόμορφα φορτισμένοι με το ίδιο θετικό φορτίο, και τα κέντρα τους απέχουν κατά 2,0 cm. Οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ των δύο βόλων έχουν μέτρο 0,1 N. Να θεωρήσετε ότι οι βόλοι αποτελούν σημειακά φορτία, και να υπολογίσετε το φορτίο κάθε βόλου.
- 4 Δύο φορτισμένα σφαιρίδια απέχουν κατά 0,20 m και απωθούνται μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις μέτρου $9,0 \times 10^{-2}$ N.
- (α) Εάν απομακρύνουμε τα σφαιρίδια σε απόσταση 1,20 m, ποιά θα είναι το νέο μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων μεταξύ τους;
- (β) Εάν το μέτρο των δυνάμεων γίνει $3,6 \times 10^{-1}$ N, ποια θα είναι η μεταξύ τους απόσταση;
- 5 Δύο αρνητικά φορτισμένες πλαστικές σφαίρες απωθούνται με ηλεκτρικές δυνάμεις μέτρου $2,6 \times 10^{-3}$ N. Οι σφαίρες αλληλεπιδρούν με τα μόρια της ατμόσφαιρας, και εκφορτίζονται σταδιακά. Εάν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα κάθε σφαίρα έχει χάσει το 50% του αρχικού της φορτίου, ποιά θα είναι το μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων μεταξύ των σφαιρών;
- 6 Δύο φορτισμένα σωματίδια σκόνης φέρουν το ίδιο φορτίο και απωθούνται μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις μέτρου $1,0 \times 10^{-4}$ N. Εάν η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων μεγαλώσει κατά $5,0 \times 10^{-3}$ m, το μέτρο των απωστικών δυνάμεων γίνεται $2,5 \times 10^{-6}$ N. Να υπολογίσετε την αρχική απόσταση και το φορτίο των σωματιδίων.
- 7 Η Γη φέρει αρνητικό φορτίο της τάξης των -5×10^5 C. Το φορτίο αυτό συντηρείται από τους κεραυνούς, οι οποίοι μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες αρνητικού φορτίου από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της Γης.
- (α) Προσεγγίζοντας τη Γη σαν ένα σημειακό φορτίο συγκεντρωμένο στο κέντρο της, να υπολογίσετε την ηλεκτρική δύναμη που ασκεί σε μία αρνητικά φορτισμένη σταγόνα νερού με φορτίο -1×10^{-9} C.
- (β) Να υπολογίσετε τη μάζα πρέπει να έχει η σταγόνα νερού, έτσι ώστε να μπορεί να ισορροπεί υπό την επίδραση του βάρους της και της ηλεκτρικής άπωσης από τη Γη.

Υπολογισμός της Συνολικής Δύναμης Coulomb με την Αρχή της Υπέρθεσης

- 8 Δύο σφαιρίδια φορτισμένα με θετικά φορτία q και $4q$ είναι στερεωμένα στις άκρες ενός οριζόντιου ραβδίου μήκους α . Μία χάντρα μπορεί να γλυστρά κατά μήκος του ραβδίου χωρίς τριβές. Εάν η χάντρα είναι φορτισμένη, σε ποιά σημείο του ραβδίου θα ισορροπεί; Παίξει ρόλο το πρόσημο ή το μέγεθος του φορτίου της χάντρας;
- 9 Δύο άτομα με φορτία $-e$ και $+e$ απέχουν μεταξύ τους κατά $1,0 \times 10^{-10}$ m. Ένα τρίτο άτομο με φορτίο $+2e$ πλησιάζει σε απόσταση $3,0 \times 10^{-10}$ m από το αρνητικό φορτίο, όπως φαίνεται στο σχήμα της διπλανής σελίδας.

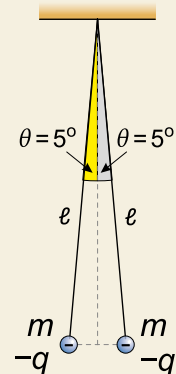


- (α) Να υπολογίσετε τα μέτρα των ηλεκτρικών δυνάμεων $\vec{F}_{(-e) \rightarrow +2e}$ και $\vec{F}_{e \rightarrow +2e}$, που ασκούν τα δύο άτομα στο φορτίο $+2e$, καθώς και το μέτρο της συνισταμένης δύναμης $\Sigma \vec{F}$.
- (β) Να συγκρίνετε το μέτρο της $\Sigma \vec{F}$ με τα μέτρα των $\vec{F}_{(-e) \rightarrow +2e}$ και $\vec{F}_{e \rightarrow +2e}$. Τι παρατηρείτε;

Σημείωση

Ένα σύστημα αντίθετων φορτίων $-q$ και $+q$ λειτουργεί **ως μοντέλο ενός ηλεκτρικά ουδέτερου διατομικού μορίου AB**, που αποτελείται από τα αντίθετα φορτισμένα άτομα A και B. Παράδειγμα τέτοιου μορίου είναι το υδροχλώριο (HCl). Το ουδέτερο μόριο HCl **μπορεί να έλκει** ένα φορτισμένο άτομο. Η συνισταμένη ελκτική δύναμη είναι όμως μικρότερη από τις δυνάμεις, που ασκούν ξεχωριστά τα άτομα H και Cl στο άτομο.

- 10 Δυο ίσα σημειακά φορτία $q_A = q_B = +1,6 \mu\text{C}$ απέχουν κατά απόσταση α . Στο μέσο της απόστασης των δυο φορτίων τοποθετούμε ένα τρίτο σημειακό φορτίο Q . Ποιά πρέπει να είναι η τιμή του Q , έτσι ώστε και τα τρία φορτία να ισορροπούν στις θέσεις τους;
- 11 Δύο μικρές πλαστικές σφαίρες με μάζες $0,03 \text{ kg}$ φέρουν ίσα αρνητικά φορτία και ισορροπούν αναρτημένες από νήματα μήκους $l = 0,15 \text{ m}$, όπως στο διπλανό σχήμα. Κάθε νήμα σχηματίζει με την κατακόρυφο γωνία $\theta = 5^\circ$.



- (α) Να υπολογίσετε το φορτίο κάθε σφαίρας.
- (β) Να υπολογίσετε την περίσσεια ηλεκτρονίων κάθε σφαίρας.

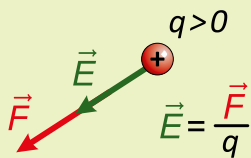
7.12. Η Έννοια του Ηλεκτρικού Πεδίου

Άς θεωρήσουμε μία περιοχή του χώρου, στην οποία υπάρχουν κάποια ηλεκτρικά φορτία. Εάν τοποθετήσουμε ένα **νέο** ηλεκτρικό φορτίο q στην ίδια περιοχή, μετρούμε μία **συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη** \vec{F} στο q .

Επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις βάζοντας το φορτίο q και σε άλλα σημεία της περιοχής. Διαπιστώνουμε τα εξής:

- Η ηλεκτρική δύναμη στο φορτίο q μεταβάλλεται γενικά από σημείο σε σημείο.
- Στο ίδιο σημείο:
 - Το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης είναι ανάλογο με το φορτίο q , δηλαδή το μέτρο της δύναμης ανά μονάδα φορτίου δεν εξαρτάται από το φορτίο q .
 - Η διεύθυνση της ηλεκτρικής δύναμης δεν εξαρτάται από το φορτίο q .
 - Η φορά της ηλεκτρικής δύναμης αντιστρέφεται, εάν αλλάξει το πρόσημο του φορτίου q .

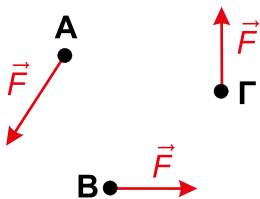
Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, ορίζουμε ένα νέο διανυσματικό φυσικό μέγεθος, την **ηλεκτρική δύναμη ανά μονάδα φορτίου**. Ονομάζουμε αυτό το μέγεθος **Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου**:



ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \text{ } q \text{ μικρό θετικό φορτίο}$$

Για να προσδιορίσουμε την ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο του χώρου, τοποθετούμε ένα σώμα με μικρό¹ **θετικό** φορτίο σε αυτό το σημείο και μετρούμε τη συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη \vec{F} που δρα στο σώμα. Ως ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου ορίζουμε ένα **διάνυσμα** ομόρροπο με τη συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη στο θετικό φορτίο, με μέτρο ίσο με **τη δύναμη ανά μονάδα φορτίου**. Η Ένταση εκφράζεται σε μονάδες N/C.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.12.1. Στο σχήμα απεικονίζεται η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη που δρα σε ένα **θετικό** φορτίο q όταν το τοποθετήσουμε σε διάφορα σημεία A, B, Γ του χώρου. Να ζωγραφίσετε το διάνυσμα της έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε αυτά τα σημεία (χρησιμοποιώντας αυθαίρετη κλίμακα για το διάνυσμα της έντασης).

7.12.2. Πώς θα μεταβληθεί το διάνυσμα της έντασης, εάν οι σημειωμένες ηλεκτροστατικές δυνάμεις δρουν σε αρνητικό φορτίο $-q$;

¹ Το φορτίο q πρέπει να είναι μικρό, για να μην επηρεάσει την κατανομή των υπολοίπων φορτίων.

Εάν γνωρίζουμε την ένταση \vec{E} σε κάποιο σημείο του χώρου, υπολογίζουμε τη συνολική ηλεκτρική δύναμη, που δρά σε ένα **σημειακό φορτίο** q στο ίδιο σημείο, από τη σχέση:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

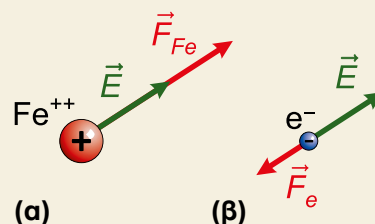
Συμπεραίνουμε ότι:

- Η δύναμη σε ένα θετικό σημειακό φορτίο είναι πάντοτε **ομόρροπη** με την ένταση ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο που βρίσκεται το φορτίο.
- Η δύναμη σε ένα **αρνητικό** σημειακό φορτίο είναι πάντοτε **αντίρροπη** με την ένταση ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο που βρίσκεται το φορτίο.

Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ηλεκτρικά φορτία. Όταν τα φορτία είναι ακίνητα στο χώρο (**στατικά**), το πεδίο ονομάζεται **ηλεκτροστατικό** και είναι ανεξάρτητο του χρόνου. Στο παρόν κεφάλαιο μελετούμε το πεδίο που παράγεται από ακίνητα φορτία.

Παράδειγμα

Ένα θετικό ιόν (κατιόν) σιδήρου Fe^{++} έχει φορτίο $q = +2e = +3,204 \times 10^{-19} \text{ C}$ και δέχεται συνισταμένη ηλεκτροστατική δύναμη μέτρου $|\vec{F}| = 41,7 \times 10^{-12} \text{ N}$ σε κάποιο σημείο, στη διεύθυνση του σχήματος **(α)**.



A. Να προσδιορίσετε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο που βρίσκεται το κατιόν σιδήρου.

Επειδή το κατιόν σιδήρου έχει θετικό φορτίο, η ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση του κατιόντος είναι ομόρροπη με την ηλεκτροστατική δύναμη, που δρα σε αυτό. Το μέτρο της έντασης ισούται με:

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q} = \frac{41,7 \times 10^{-12} \text{ N}}{3,204 \times 10^{-19} \text{ C}} = 13,0 \times 10^7 \text{ N/C}$$

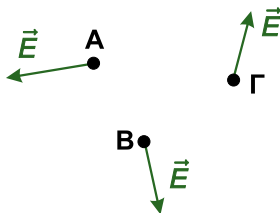
B. Να προσδιορίσετε τη συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο, εάν τοποθετηθεί στην ίδια θέση, αντί για το ιόν σιδήρου.

Το ηλεκτρόνιο έχει αρνητικό φορτίο $-e$. Άρα, η δύναμη στο ηλεκτρόνιο έχει **αντίθετη φορά** από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (σχήμα **(β)**), και μέτρο:

$$|\vec{F}_e| = |(-e)\vec{E}| = |(-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (13,0 \times 10^7 \text{ N/C})| = 20,8 \times 10^{-12} \text{ N}$$

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.12.3.** Σε μία περιοχή του χώρου υπάρχει μη μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο. Τοποθετούμε διαδοχικά σε ένα σημείο αυτής της περιοχής ένα πρωτόνιο και ένα σωματίδιο α, που αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Ποιο σωματίδιο δέχεται ηλεκτρική δύναμη μεγαλύτερου μέτρου από το ηλεκτρικό πεδίο;
- 7.12.4.** Σε ένα σημείο του χώρου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει μέτρο $4,0 \times 10^{10}$ N/C.
- (i) Να υπολογίσετε το μέτρο της συνολικής ηλεκτρικής δύναμης που δρά σε ένα φορτίο $q = +3,0 \times 10^{-12}$ C, εάν το τοποθετήσουμε στο ίδιο σημείο. Πώς συγκρίνεται η κατεύθυνση της Έντασης με την κατεύθυνση της ηλεκτρικής δύναμης στο φορτίο;
- (ii) Να επαναλάβετε το ερώτημα για ένα φορτίο $q = -6,0 \times 10^{-13}$ C.
- 7.12.5.** Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζεται η ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορα σημεία του χώρου. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα της δύναμης που θα δράσει σε ένα κατιόν νατρίου Na^+ , εάν τοποθετηθεί σε αυτά τα σημεία.



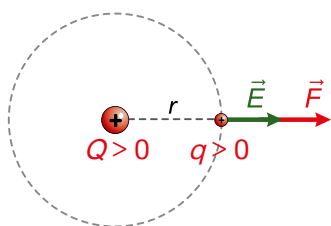
- 7.12.6.** Να επαναλάβετε το ερώτημα **7.12.5.** για ένα ανιόν χλωρίου Cl^- .

Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου Στατικού Σημειακού Φορτίου

Εικόνα 7-4

Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργείται σε απόσταση r από ένα στατικό (α) θετικό και (β) αρνητικό σημειακό φορτίο Q .

(α)



Η Εικόνα **7-4(α)** απεικονίζει ένα **θετικό** σημειακό φορτίο Q , το οποίο βρίσκεται σε κάποιο σημείο του χώρου.

Για να υπολογίσουμε την ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο, που βρίσκεται σε απόσταση r από το Q , τοποθετούμε στο σημείο αυτό ένα μικρό **θετικό** φορτίο q .

Σύμφωνα με τον Νόμο του Coulomb, στο φορτίο q θα δράσει μία ηλεκτρική δύναμη \vec{F} η οποία έχει ακτινική διεύθυνση, φορά **προς** το q (απωστική) και μέτρο:

$$|\vec{F}| = k \frac{Qq}{r^2}$$

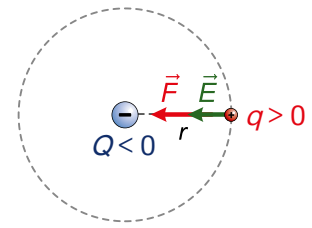
Το διάνυσμα της έντασης ηλεκτρικού πεδίου είναι **ομόρροπο** με το διάνυσμα της δύναμης. Άρα, η ένταση ηλεκτρικού πεδίου ενός **θετικού σημειακού φορτίου Q** έχει ακτινική διεύθυνση, φορά **μακριά από το Q** και μέτρο

$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{q} = k \frac{Q}{r^2}$$

Εάν το σημειακό φορτίο Q είναι αρνητικό, η φορά της ηλεκτρικής δύναμης στο φορτίο q αντιστρέφεται (**σχήμα 7-4(β)**). Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου ενός **αρνητικού σημειακού φορτίου Q** έχει ακτινική διεύθυνση, φορά **προς το Q** και μέτρο

$$|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2}$$

(β)

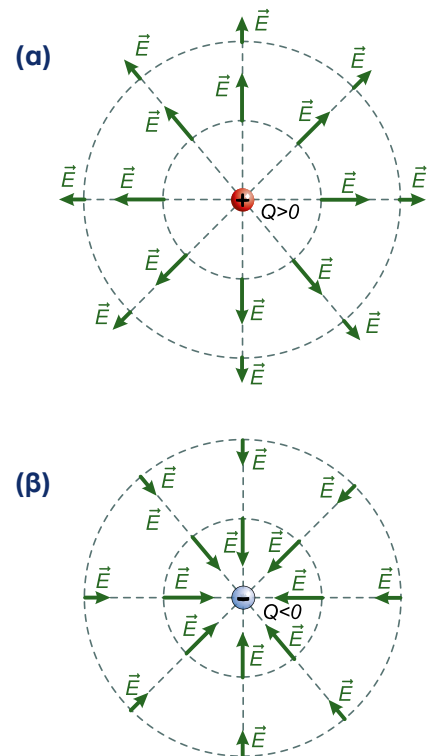


Να **παρατηρήσετε** ότι το μέτρο της έντασης, που παράγεται από το σημειακό φορτίο Q , **δεν** εξαρτάται από το φορτίο q .

Το διάνυσμα της έντασης ηλεκτρικού πεδίου σε διάφορα σημεία του χώρου γύρω από ένα θετικό ή αρνητικό σημειακό φορτίο απεικονίζεται στην **Εικόνα 7-5**.

Εικόνα 7-5

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου ενός (α) θετικού, και ενός (β) αρνητικού σημειακού φορτίου.



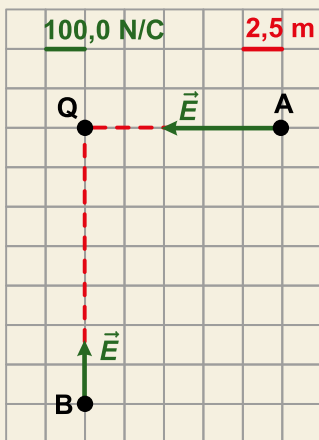
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.12.7. Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου ενός στατικού σημειακού φορτίου $+Q$ έχει μέτρο $|\vec{E}|$ σε απόσταση r από το φορτίο.

- (α) Ποιό θα είναι το μέτρο της έντασης σε απόσταση $r/2$;
- (β) Σε ποια απόσταση το μέτρο της έντασης γίνεται $|\vec{E}|/4$;
- (γ) Αν το σημειακό φορτίο ήταν τριπλάσιο, ποιό θα ήταν το μέτρο της έντασης σε απόσταση r ;

Παράδειγμα

Το φορτίο Q δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, η ένταση του οποίου στο σημείο **A** έχει μέτρο $300,0 \text{ N/C}$.



A. Να υπολογίσετε το φορτίο Q .

Από την κλίμακα του σχήματος προκύπτει ότι το σημείο **A** βρίσκεται σε απόσταση $12,5 \text{ m}$ από το φορτίο Q . Άρα, η απόλυτη τιμή του φορτίου είναι ίση με:

$$|Q| = \frac{|\vec{E}| r^2}{k} = \frac{(300,0 \text{ N/C}) \times (12,5 \text{ m})^2}{9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2} = 5,2 \mu\text{C}$$

Το πρόσημο του φορτίου είναι **αρνητικό** επειδή το διάνυσμα της έντασης έχει φορά **προς** το φορτίο. Έτσι, $Q = -5,2 \mu\text{C}$.

B. Να σχεδιάσετε το διάνυσμα της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργεί το φορτίο Q στο σημείο **B**.

Το σημείο **B** απέχει από το φορτίο Q κατά $17,5 \text{ m}$. Άρα, το μέτρο της έντασης στο **B** είναι:

$$|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2} = (9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2) \frac{5,21 \times 10^{-6} \text{ C}}{(17,5 \text{ m})^2} = 1,53 \times 10^2 \text{ N/C}$$

Το διάνυσμα της έντασης έχει διεύθυνση την ευθεία, που ενώνει το σημείο **B** με το σημειακό φορτίο Q , και φορά προς το φορτίο Q .

Υπολογισμός της Συνολικής Έντασης Ηλεκτρικού Πεδίου δύο ή περισσότερων Σημειακών Φορτίων

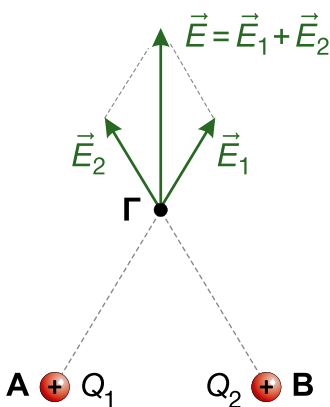
Το επόμενο σχήμα απεικονίζει δύο ακίνητα σημειακά φορτία.

Το φορτίο Q_1 δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E}_1 σε κάποιο σημείο Γ του χώρου. Ομοίως, το φορτίο Q_2 δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E}_2 στο σημείο Γ .

Χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης των ηλεκτρικών δυνάμεων, μπορούμε να δείξουμε ότι η συνολική ένταση στο σημείο Γ ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των εντάσεων \vec{E}_1 και \vec{E}_2 :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Η αρχή της υπέρθεσης για την ένταση ηλεκτρικού πεδίου γενικεύεται για οποιοδήποτε αριθμό φορτίων:



Αρχή της Υπέρθωσης για την Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου

Η συνολική ένταση ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργείται σε ένα σημείο του χώρου από μια στατική κατανομή σημειακών φορτίων Q_1, Q_2, Q_3, \dots , ισούται με το **διανυσματικό** άθροισμα των εντάσεων των φορτίων στο ίδιο σημείο:

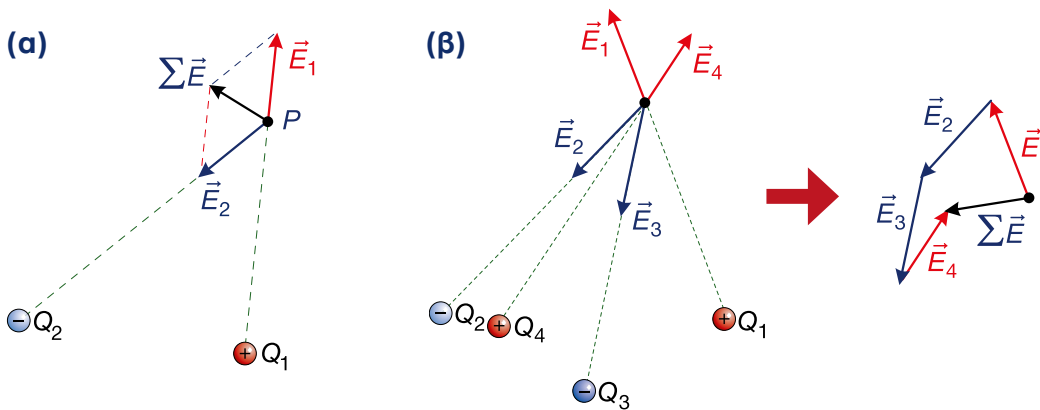
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

Σημείωση

Επειδή η ένταση ηλεκτρικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος, για τον υπολογισμό της συνισταμένης έντασης χρησιμοποιούμε τον κανόνα του παραλληλογράμμου ή του πολυγώνου, ή την πρόσθεση διανυσμάτων με τη χρήση συνιστωσών. Μερικά παραδείγματα απεικονίζονται στην **Εικόνα 7-6**.

Εικόνα 7-6

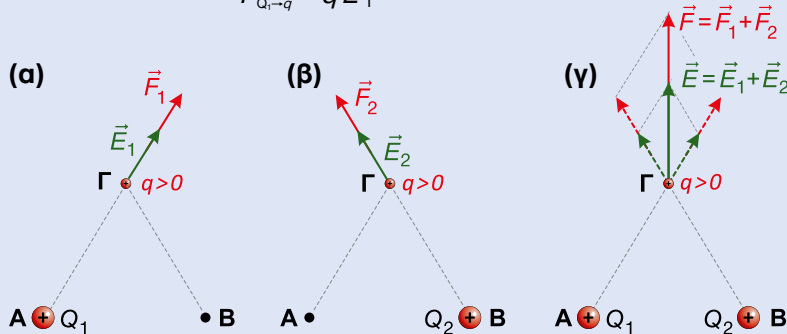
Γραφικός υπολογισμός της συνισταμένης έντασης **(α)** δύο σημειακών ηλεκτρικών φορτίων με τον κανόνα του παραλληλογράμμου, και **(β)** τεσσάρων σημειακών ηλεκτρικών φορτίων με τον κανόνα του πολυγώνου.



ΕΝΘΕΤΟ: Απόδειξη της Αρχής της Υπέρθωσης για την Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου από την Αρχή της Υπέρθωσης για την Ηλεκτροστατική Δύναμη.

Έστω ότι τοποθετούμε στο σημείο Α του χώρου ένα φορτίο Q_1 (**Εικόνα 7-7(α)**). Το φορτίο Q_1 δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο με ένταση \vec{E}_1 στο σημείο Γ. Εάν τοποθετήσουμε ένα μικρό θετικό φορτίο q στο σημείο Γ, θα δράσει σε αυτό ηλεκτρική δύναμη

$$\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q} = q\vec{E}_1$$



Εικόνα 7-7

Η συνολική ένταση \vec{E} στο σημείο Γ λόγω των φορτίων Q_1 και Q_2 ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των εντάσεων \vec{E}_1 και \vec{E}_2 , που δημιουργούν τα φορτία Q_1 και Q_2 εάν υπάρχουν μόνο τους στο χώρο.

Αφαιρούμε το φορτίο Q_1 και τοποθετούμε ένα φορτίο Q_2 στο σημείο Β (**Εικόνα 7-7(β)**). Το φορτίο Q_2 προκαλεί ένταση \vec{E}_2 στο σημείο Γ. Εάν τοποθετήσουμε ένα μικρό θετικό φορτίο q στο σημείο Γ (**Εικόνα 7-7(β)**), δρά σε αυτό ηλεκτρική δύναμη

$$\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q} = q\vec{E}_2$$

Ορίζουμε τη συνολική ένταση στο σημείο Γ, λόγω των Q_1 και Q_2 , ως

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Από την **αρχή της υπέρθεσης της ηλεκτρικής δύναμης** γνωρίζουμε ότι η **συνισταμένη** ηλεκτρική δύναμη στο φορτίο q από τα φορτία Q_1 και Q_2 είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα $\vec{F} = \vec{F}_{Q_1 \rightarrow q} + \vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$.

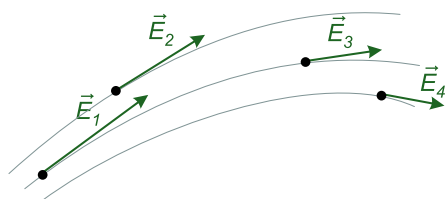
Συνδυάζοντας τις πιο πάνω σχέσεις, προκύπτει:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q} + \vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}}{q} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Άρα, η συνολική ένταση ηλεκτρικού πεδίου, λόγω των φορτίων Q_1 και Q_2 , ισούται με το **διανυσματικό άθροισμα** των εντάσεων που δημιουργούν τα φορτία, εάν υπάρχουν μόνο τους στο χώρο. Η διαπίστωση αυτή αντιστοιχεί στην αρχή της **υπέρθεσης** για την ένταση ηλεκτρικού πεδίου, και ισχύει γενικότερα για αυθαίρετο αριθμό φορτίων.

7.13. Ηλεκτρικές Δυναμικές Γραμμές

Για να απεικονίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο σε μία περιοχή του χώρου, χρησιμοποιούμε την έννοια των **ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών** (ΗΔΓ). Οι γραμμές αυτές σχεδιάζονται ώστε να υποδεικνύουν τη **διεύθυνση** του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου.



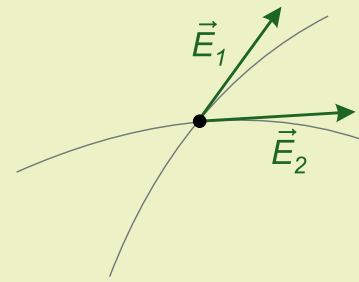
Συγκεκριμένα, η εφαπτομένη σε οποιοδήποτε σημείο μίας δυναμικής γραμμής έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στο ίδιο σημείο.

Προσοχή

Οι ΗΔΓ **δεν αντιστοιχούν γενικά στις τροχιές** που ακολουθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο, αν αφεθεί ελεύθερο να κινηθεί μέσα στο πεδίο.

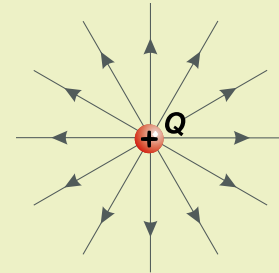
Οι δυναμικές γραμμές έχουν τις εξής ιδιότητες:

- **Δύο ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές δεν είναι δυνατόν να τέμνονται σε σημεία όπου δεν υπάρχουν φορτία.** Εάν δύο δυναμικές γραμμές τέμνονταν, το διάνυσμα της έντασης στο σημείο τομής τους θα είχε δύο διευθύνσεις, που θα ήταν παράλληλες με τις εφαπτομένες των δύο δυναμικών γραμμών σε εκείνο το σημείο.

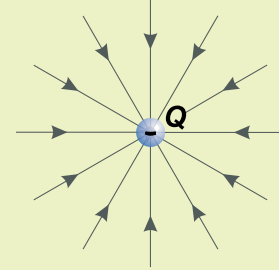


- **Οι ΗΔΓ ξεκινούν από κάποιο θετικό φορτίο (ή το άπειρο), και καταλήγουν σε κάποιο αρνητικό φορτίο ή στο άπειρο.** Το διπλανό σχήμα απεικονίζει τις δυναμικές γραμμές της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργείται από ένα **(α)** θετικό και **(β)** αρνητικό σημειακό φορτίο.

(α)



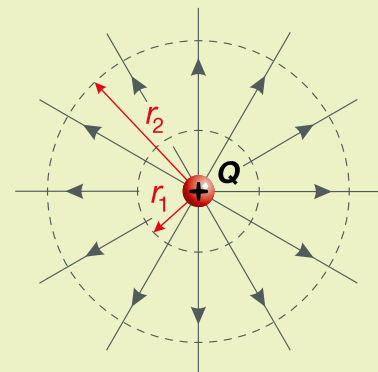
(β)



- **Απεικονίζουμε** τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, έτσι ώστε να **φαίνονται** πιο πυκνές σε σημεία όπου η ένταση έχει μεγαλύτερο μέτρο.

Για παράδειγμα, στο διπλανό σχήμα σχεδιάζουμε $N = 12$ δυναμικές γραμμές να αναδύονται από ένα θετικό σημειακό φορτίο.

Θεωρούμε δύο σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το φορτίο και ακτίνες r_1, r_2 . Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών, που τέμνουν τη σφαιρική επιφάνεια ακτίνας r_1 , ανά μονάδα επιφάνειας, ισούται με $N/(4\pi r_1^2)$.



Ομοίως, ο αριθμός δυναμικών γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας, που τέμνουν την επιφάνεια ακτίνας $r_2 > r_1$, ισούται με $N/(4\pi r_2^2)$.

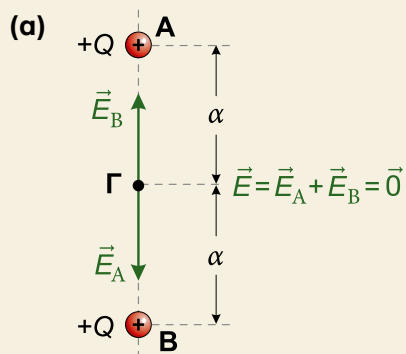
Άρα, ο αριθμός των **απεικονιζόμενων ανά μονάδα επιφάνειας** δυναμικών γραμμών μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης, όπως και το μέτρο της Έντασης του σημειακού φορτίου. (Στην πραγματικότητα, ανάμεσα στις 12 γραμμές του σχήματος υπάρχουν **άπειρες** δυναμικές γραμμές, οι οποίες διέρχονται και από τις δύο επιφάνειες).

7.14. Παραδείγματα Υπολογισμού της Συνισταμένης Έντασης Περισσότερων Σημειακών Φορτίων

Παράδειγμα 1

Το Ηλεκτρικό Πεδίο δύο Ίσων Φορτίων

Το διπλανό σχήμα **(α)** απεικονίζει δύο ίσα θετικά φορτία Q τα οποία βρίσκονται στα σημεία **A** και **B** και απέχουν μεταξύ τους κατά 2α . Θα υπολογίσουμε τη συνολική ένταση ηλεκτρικού πεδίου:

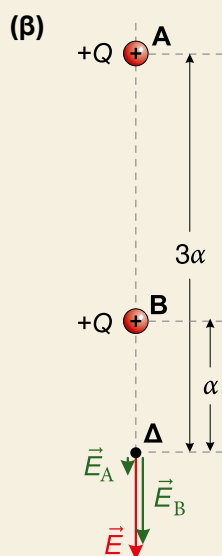


A. Στο μέσο Γ του ευθύγραμμου τμήματος AB .

Τα δύο φορτία δημιουργούν ακτινικά ηλεκτρικά πεδία \vec{E}_A και \vec{E}_B . Στο σημείο Γ , τα διανύσματα \vec{E}_A και \vec{E}_B έχουν τη διεύθυνση του ευθύγραμμου τμήματος AB , είναι αντίρροπα και έχουν μέτρο

$$|\vec{E}_A| = |\vec{E}_B| = k \frac{Q}{\alpha^2}$$

Συνεπώς, τα διανύσματα \vec{E}_A και \vec{E}_B είναι αντίθετα και η συνολική ένταση στο σημείο Γ μηδενίζεται: $\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B = \vec{0}$.



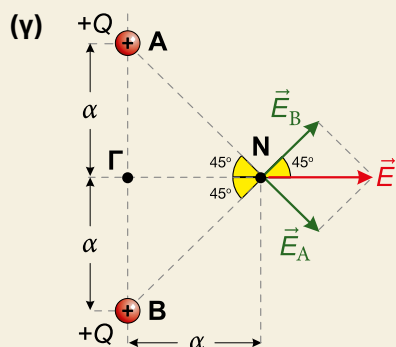
B. Στο σημείο Δ , το οποίο βρίσκεται στην ευθεία που ενώνει τα δύο φορτία, σε αποστάσεις $B\Delta = \alpha$ από το φορτίο Q_B και $A\Delta = 3\alpha$ από το φορτίο Q_A .

Στο σημείο Δ , τα διανύσματα \vec{E}_A και \vec{E}_B έχουν την ίδια διεύθυνση με το ευθύγραμμο τμήμα AB , είναι ομόρροπα (και τα δύο κατευθύνονται μακριά από τα φορτία), και έχουν μέτρα:

$$|\vec{E}_A| = k \frac{Q}{(3\alpha)^2}, \quad |\vec{E}_B| = k \frac{Q}{\alpha^2}$$

Η Ένταση έχει την κατεύθυνση των \vec{E}_A, \vec{E}_B , και μέτρο:

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_A| + |\vec{E}_B| = k \frac{Q}{(3\alpha)^2} + k \frac{Q}{\alpha^2} = \frac{10}{9} k \frac{Q}{\alpha^2}$$



Γ. Στο σημείο N , το οποίο βρίσκεται στη μεσοκάθετο του ευθύγραμμου τμήματος AB , σε απόσταση $\Gamma N = \alpha$ από το μέσο Γ .

Τα διανύσματα των Εντάσεων έχουν μέτρα

$$|\vec{E}_A| = |\vec{E}_B| = k \frac{Q}{\alpha^2 + \alpha^2} = k \frac{Q}{2\alpha^2}$$

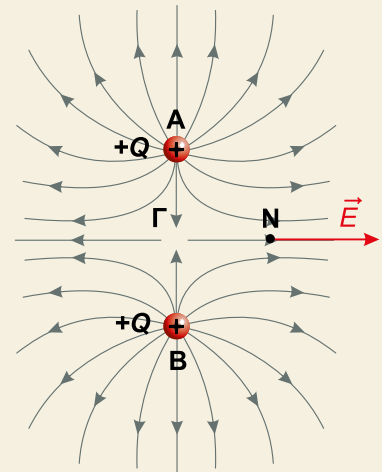
Επειδή τα ορθογώνια τρίγωνα $B\Gamma N$ και $A\Gamma N$ είναι ισοσκελή ($B\Gamma = A\Gamma = \Gamma N = \alpha$) οι γωνίες $\hat{A}\hat{N}\hat{\Gamma} = \hat{\Gamma}\hat{N}\hat{B} = 45^\circ$. Άρα, τα δια-

νύσματα των Εντάσεων σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90° . Το μέτρο της συνισταμένης Έντασης είναι:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|\vec{E}_A|^2 + |\vec{E}_B|^2} = \sqrt{\left(k \frac{Q}{2\alpha^2}\right)^2 + \left(k \frac{Q}{2\alpha^2}\right)^2} = k \frac{Q}{2\alpha^2} \sqrt{2}$$

Να παρατηρήσετε ότι το διάνυσμα της Έντασης στο σημείο N έχει τη διεύθυνση της μεσοκαθέτου ΓN. Το ίδιο ισχύει για οποιοδήποτε σημείο της μεσοκαθέτου. Άρα, η μεσοκάθετος αντιστοιχεί σε δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου των δύο φορτίων.

Μερικές δυναμικές γραμμές του πεδίου των δύο φορτίων απεικονίζονται στο διπλανό σχήμα.



Παράδειγμα 2

Το Ηλεκτρικό Πεδίο δύο Αντίθετων Φορτίων $\pm Q$ (Ηλεκτρικό Δίπολο).

Θα μελετήσουμε τώρα την περίπτωση, στην οποία τα φορτία στα σημεία A και B είναι αντίθετα: $Q_A = +Q > 0$, $Q_B = -Q < 0$. Ένα ζεύγος αντίθετων μεταξύ τους φορτίων ονομάζεται **ηλεκτρικό δίπολο**.

A. Στο μέσο Γ του ευθύγραμμου τμήματος AB.

Στο σημείο Γ, τα διανύσματα \vec{E}_A και \vec{E}_B είναι παράλληλα με το ευθύγραμμο τμήμα AB, είναι ομόρροπα (και τα δύο κατευθύνονται προς το αρνητικό φορτίο) και έχουν ίσα μέτρα

$$|\vec{E}_A| = |\vec{E}_B| = k \frac{|Q|}{\alpha^2}$$

Η Ένταση έχει την κατεύθυνση των \vec{E}_A και \vec{E}_B , και μέτρο

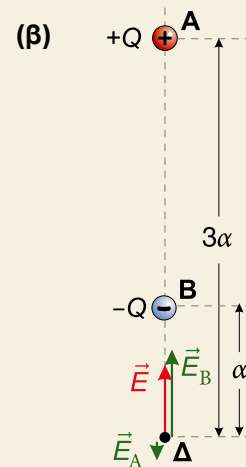
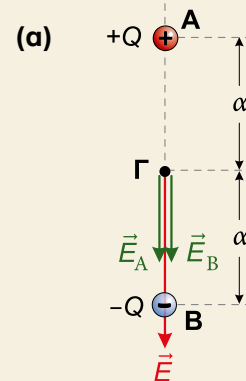
$$|\vec{E}| = |\vec{E}_A| + |\vec{E}_B| = 2k \frac{|Q|}{\alpha^2}$$

B. Στο σημείο Δ:

Τα διανύσματα των εντάσεων των δύο φορτίων έχουν μέτρα

$$|\vec{E}_A| = k \frac{|Q|}{(3\alpha)^2}, \quad |\vec{E}_B| = k \frac{|Q|}{\alpha^2}$$

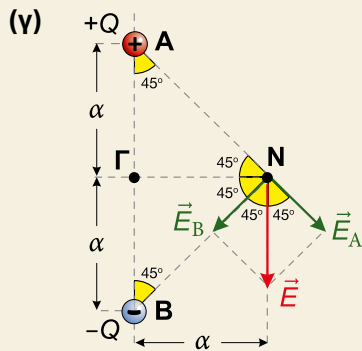
και είναι **αντίρροπα**: το διάνυσμα \vec{E}_A κατευθύνεται μακριά από το A, ενώ το \vec{E}_B κατευθύνεται προς το B. Η συνισταμένη ένταση



έχει μέτρο

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_B| - |\vec{E}_A| = k \frac{|Q|}{\alpha^2} - k \frac{|Q|}{(3\alpha)^2} = \frac{8}{9} k \frac{|Q|}{\alpha^2}$$

και την κατεύθυνση του μεγαλύτερου διανύσματος (του \vec{E}_B).



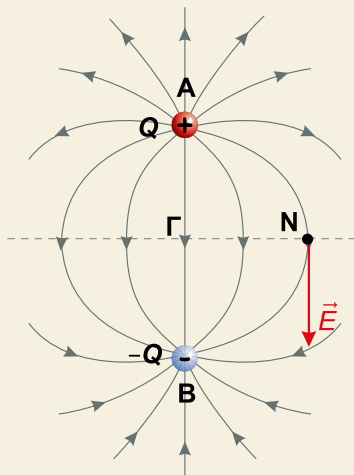
Γ. Στο σημείο N:

Τα διανύσματα των εντάσεων έχουν μέτρα

$$|\vec{E}_A| = |\vec{E}_B| = k \frac{|Q|}{\alpha^2 + \alpha^2} = k \frac{|Q|}{2\alpha^2}$$

και σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 90° όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα. Άρα, το μέτρο της συνισταμένης έντασης είναι:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|\vec{E}_A|^2 + |\vec{E}_B|^2} = \sqrt{\left(k \frac{Q}{2\alpha^2}\right)^2 + \left(k \frac{Q}{2\alpha^2}\right)^2} = k \frac{|Q|}{2\alpha^2} \sqrt{2}$$

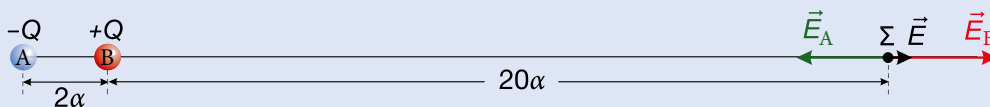


Σε αντίθεση με το προηγούμενο παράδειγμα, το διάνυσμα \vec{E}_B κατευθύνεται **προς** το αρνητικό φορτίο $Q_B = -Q$. Το διάνυσμα της συνισταμένης έντασης είναι κάθετο στη μεσοκάθετο ΓN του ευθύγραμμου τμήματος AB, στο σημείο N. Το ίδιο ισχύει για το διάνυσμα της συνισταμένης έντασης σε **οποιοδήποτε** σημείο της μεσοκάθετου ΓN. Άρα, οι δυναμικές γραμμές του συνολικού πεδίου των δύο φορτίων τέμνουν κάθετα την ευθεία ΓN.

Μερικές από τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές του πεδίου του ζεύγους φορτίων $\pm Q$ απεικονίζονται στο διπλανό σχήμα.

ΕΝΘΕΤΟ: Συνολική Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου που δημιουργείται σε μεγάλη απόσταση από ένα Ζεύγος Φορτίων $\pm Q$ (ηλεκτρικό δίπολο).

Θα υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο Σ της ευθείας AB, το οποίο απέχει κατά 20α από το φορτίο Q_B , το οποίο επιλέγουμε να είναι θετικό.



Τα διανύσματα \vec{E}_A και \vec{E}_B είναι **αντίρροπα**, με διεύθυνση την ευθεία AB, και έχουν μέτρα:

$$|\vec{E}_A| = k \frac{|Q|}{(22\alpha)^2}, \quad |\vec{E}_B| = k \frac{|Q|}{(20\alpha)^2}$$

Η συνισταμένη ένταση ηλεκτρικού πεδίου έχει μέτρο

$$|\vec{E}| = |\vec{E}_B| - |\vec{E}_A| = \left(\frac{1}{20^2} - \frac{1}{22^2} \right) k \frac{|Q|}{\alpha^2} = \frac{21}{121} k \frac{|Q|}{(20\alpha)^2}$$

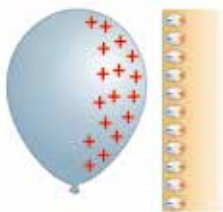
Η συνισταμένη ένταση στο σημείο Σ είναι **σημαντικά μικρότερη** κατά μέτρο από τις εντάσεις, που δημιουργούν στο ίδιο σημείο τα δύο φορτία. Για παράδειγμα, είναι ίση με το 17% της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του φορτίου Q_B :

$$\frac{|\vec{E}|}{|\vec{E}_B|} = \frac{\frac{21}{121} k \frac{|Q|}{(20\alpha)^2}}{k \frac{|Q|}{(20\alpha)^2}} = \frac{21}{121} \cong 17\%$$

Η μικρότερη τιμή της συνισταμένης έντασης οφείλεται στο ότι τα δύο φορτία είναι αντίθετα, και οι εντάσεις τους **αλληλοαναιρούνται** σε μεγάλο βαθμό. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει όταν πλησιάζουμε μία φορτισμένη πλαστική πένα σε κομματάκια χαρτιού. Τα φορτισμένα άτομα της πέννας έλκονται από **μοριακά δίπολα** του χαρτιού. Η έλξη αυτή είναι ασθενής, γι' αυτό γίνεται αντιληπτή μόνο εάν η πένα πλησιάσει αρκετά κοντά στο χαρτί.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.14.1. Να εξηγήσετε γιατί η έλξη μεταξύ του θετικά φορτισμένου μπαλονιού και του τοίχου γίνεται αισθητή μόνο όταν το μπαλόνι πλησιάσει πολύ κοντά στον τοίχο.



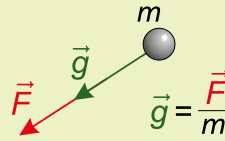
7.15. Η Έννοια του Βαρυτικού Πεδίου

Στο Κεφάλαιο της Παγκόσμιας Έλξης μάθαμε ότι τα υλικά σώματα έλκονται μεταξύ τους με δυνάμεις παγκόσμιας έλξης. Κατ' αναλογία με το ηλεκτρικό πεδίο, συμπεραίνουμε ότι ο χώρος γύρω από ένα υλικό σώμα **A** αποκτά την εξής ιδιότητα: Εάν τοποθετήσουμε κάποιο άλλο υλικό σώμα **B** σε αυτό το χώρο, στο **B** θα δρα μία συνισταμένη

δύναμη παγκόσμιας έλξης. Η ιδιότητα αυτή περιγράφεται από ένα νέο φυσικό μέγεθος, την **Ένταση του Βαρυτικού Πεδίου**:

ΕΝΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad m \text{ μάζα υλικού σώματος}$$

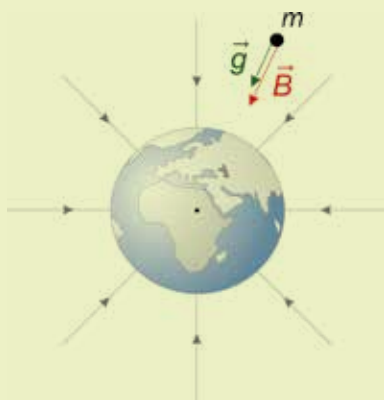


Για να προσδιορίσουμε την ένταση \vec{g} του πεδίου βαρύτητας σε κάποιο σημείο του χώρου, τοποθετούμε ένα σώμα μάζας m σε αυτό το σημείο και μετρούμε τη **συνισταμένη** δύναμη παγκόσμιας έλξης \vec{F} που δρα στο σώμα. Ως ένταση \vec{g} του βαρυτικού πεδίου ορίζουμε ένα **διάνυσμα** ομόρροπο με τη συνισταμένη δύναμη παγκόσμιας έλξης στο σώμα, με μέτρο ίσο με το μέτρο αυτής της δύναμης ανά μονάδα μάζας. Η ένταση του πεδίου βαρύτητας εκφράζεται σε μονάδες $\text{N/kg} = \text{m/s}^2$.

Παρατήρηση

Η Ένταση \vec{g} του βαρυτικού πεδίου εκφράζεται σε μονάδες επιτάχυνσης m/s^2 . Αυτό **δεν** είναι τυχαίο. Ένα σώμα μάζας m έλκεται από τη Γη με δύναμη παγκόσμιας έλξης **ίση** με το βάρος του: $\vec{B} = m\vec{g}$, όπου \vec{g} είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Άρα, η δύναμη παγκόσμιας έλξης στο σώμα από τη Γη, ανά μονάδα μάζας, **ισούται** με την επιτάχυνση της βαρύτητας:

$$\text{Ένταση } \vec{g} \text{ του Βαρυτικού πεδίου της Γης} = \frac{\vec{B}}{m} = \text{Επιτάχυνση της βαρύτητας}$$



Όπως και η επιτάχυνση της βαρύτητας, η ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης, σε κάποιο σημείο **A** στο εξωτερικό της Γης, είναι διάνυσμα με κατεύθυνση ακτινική προς το κέντρο της Γης και μέτρο

$$|\vec{g}| = G \frac{M}{r^2}$$

Στην τελευταία σχέση, M είναι η μάζα της Γης και r είναι η απόσταση του σημείου **A** από το κέντρο της Γης.

Σε αναλογία με τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, μπορούμε να απεικονίσουμε την ένταση του πεδίου βαρύτητας χρησιμοποιώντας **βαρυτικές δυναμικές γραμμές** (ΒΔΓ). Κάθε ΒΔΓ σχεδιάζεται έτσι ώστε σε κάθε σημείο του χώρου να είναι εφαπτομενική στο διάνυσμα της συνισταμένης έντασης βαρυτικού πεδίου \vec{g} . Για παράδειγμα, οι ΒΔΓ του βαρυτικού πεδίου της Γης έχουν την διεύθυνση των ακτίνων της Γης.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

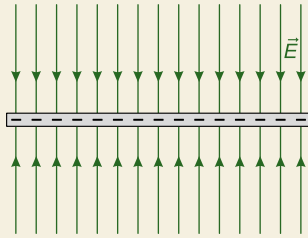
- 7.15.1.** Ποια είναι η μέση τιμή της έντασης του πεδίου βαρύτητας της Γης στην επιφάνεια της Γης;
- 7.15.2.** Σε ποιά απόσταση από τη Γη η ένταση του πεδίου βαρύτητας γίνεται ίση με το $1/4$ της τιμής της έντασης στην επιφάνεια της Γης; Να εκφράσετε αυτή την απόσταση σε Γήινες ακτίνες.
- 7.15.3.** Πώς θα μεταβάλλονταν η ένταση του πεδίου βαρύτητας της Γης, εάν η μάζα της Γης ήταν διπλάσια;
- 7.15.4.** Τοποθετούμε διαδοχικά δύο σώματα με μάζες m_1 και $m_2 = 5m_1$ σε κάποιο σημείο Α κοντά στη Γη. Εξαρτάται η ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης από τη μάζα των σωμάτων αυτών;
- 7.15.5.** Στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ΔΔΣ) οι αστροναύτες ζουν σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης είναι ίση με μηδέν στον ΔΔΣ;
- 7.15.6.** Γνωρίζετε κάποιο φυσικό φαινόμενο που να αποδεικνύει ότι τα σημεία της επιφάνειας της Γης βρίσκονται στο βαρυτικό πεδίο της Σελήνης;

7.16. Το Ομογενές Ηλεκτρικό Πεδίο

Στα προηγούμενα δείξαμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο ενός σημειακού φορτίου μεταβάλλεται ως προς μέτρο και κατεύθυνση, στα διάφορα σημεία του χώρου γύρω από το φορτίο. Εάν τοποθετήσουμε σε κατάλληλες θέσεις μία συλλογή από φορτία, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο που θα είναι κατά προσέγγιση σταθερό κατά μέτρο και κατεύθυνση σε μία περιοχή του χώρου. Αυτό το πεδίο ονομάζεται **ομογενές**.

ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές σε μία περιοχή του χώρου, όταν σε όλα τα σημεία αυτής της περιοχής η ένταση ηλεκτρικού πεδίου έχει το ίδιο μέτρο και κατεύθυνση.



Παράδειγμα

Μία συμμετρική επίπεδη διάταξη ίσων φορτίων χωρίζει τον χώρο σε δύο περιοχές. Σε κάθε περιοχή, η διάταξη δημιουργεί ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, με διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο της διάταξης.

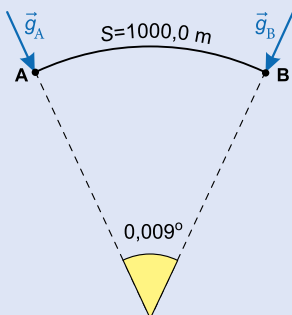
ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΒΑΡΥΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Κατ' αναλογία με το ηλεκτρικό πεδίο, το βαρυτικό πεδίο είναι ομογενές σε μία περιοχή του χώρου, όταν σε όλα τα σημεία αυτής της περιοχής η ένταση του βαρυτικού πεδίου έχει το ίδιο μέτρο και κατεύθυνση.

Παράδειγμα

Εάν επιλέξουμε οποιαδήποτε σχετικά μικρή περιοχή πάνω στην επιφάνεια της Γης, διαπιστώνουμε πειραματικά ότι σε όλα τα σημεία της περιοχής αυτής ένα σώμα πέφτει με την **ίδια επιτάχυνση** της βαρύτητας. Αφού η επιτάχυνση της βαρύτητας ισούται με την ένταση του πεδίου βαρύτητας, συμπεραίνουμε ότι το βαρυτικό πεδίο της Γης είναι ομογενές σε αυτή την περιοχή. **Γιατί συμβαίνει αυτό;**

Στα προηγούμενα εξηγήσαμε ότι η ένταση του βαρυτικού πεδίου της Γης έχει ακτινική διεύθυνση, φορά προς το κέντρο της Γης και μέτρο $|\vec{g}| = GM_T/r^2$. Η Γη αντιστοιχεί κατά πολύ καλή προσέγγιση σε μία σφαίρα με πολύ μεγάλη ακτίνα ($R_T = 6\,370\text{ km}$).



Η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της έντασης βαρυτικού πεδίου \vec{g} στα σημεία A και B είναι περίπου μηδέν (στο σχήμα απεικονίζεται υπερβολικά μεγάλη).

Θεωρούμε δύο σημεία A και B στην επιφάνεια της Γης, που απέχουν μεταξύ τους κατά $s = 1000,0\text{ m}$. Η απόσταση s αντιστοιχεί σε κυκλικό τόξο ακτίνας R_T με επίκεντρη γωνία (σε ακτίνα):

$$\varphi = s/R_T = (1000,0\text{ m})/(6\,370\,000\text{ m})\text{ rad}$$

Όπως μάθαμε στο κεφάλαιο της κυκλικής κίνησης, για να μετατρέψουμε τη γωνία σε μοίρες την πολλαπλασιάζουμε με τον παράγοντα $180/\pi$: $\varphi = (180^\circ/\pi) \times (1000,0\text{ m})/(6\,370\,000\text{ m}) = 0,00900^\circ$. Άρα, τα διανύσματα της έντασης βαρυτικού πεδίου στα σημεία A και B είναι κατά εξαιρετική προσέγγιση παράλληλα μεταξύ τους, με ίσα μέτρα $|\vec{g}_A| = |\vec{g}_B| = (GM_T)/R_T^2$. Το ίδιο συμβαίνει σε όλα τα σημεία της περιοχής γύρω από τα A και B, δηλαδή το βαρυτικό πεδίο της Γης είναι κατά εξαιρετική προσέγγιση ομογενές σε εκείνη την περιοχή.

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **απολογηθείτε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Η Ένταση ηλεκτρικού πεδίου:	
α	Εκφράζεται σε μονάδες Newton.	
β	Είναι μονόμετρο μέγεθος.	
2	Η ηλεκτρική δύναμη σε ένα φορτίο είναι πάντοτε παράλληλη με την ένταση ηλεκτρικού πεδίου, στο σημείο που βρίσκεται το φορτίο.	
3	Η ηλεκτρική δύναμη σε ένα φορτίο είναι πάντοτε ομόρροπη με την ένταση ηλεκτρικού πεδίου, στο σημείο που βρίσκεται το φορτίο.	
4	Η Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός σημειακού φορτίου:	
α	Έχει ακτινική διεύθυνση.	
β	Είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από το φορτίο.	
γ	Είναι ανάλογη με το τετράγωνο του φορτίου.	
δ	Έχει πάντοτε κατεύθυνση προς το φορτίο.	
5	Η Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δύο αντίθετων φορτίων είναι ίση με μηδέν σε όλα τα σημεία του χώρου.	
6	Η Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δύο ίσων φορτίων είναι διαφορετική από μηδέν σε όλα τα σημεία της ευθείας, που ενώνει τα δύο φορτία.	
7	Δύο ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές μπορεί να τέμνονται σε σημείο του χώρου, όπου δεν υπάρχει φορτίο.	
8	Απεικονίζουμε τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές να πυκνώνουν σε περιοχές που αυξάνεται η ένταση του πεδίου.	
9	Όταν οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους, το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι ομογενές.	



Ασκήσεις

- 1 Σε ένα σημείο του χώρου το ηλεκτρικό πεδίο έχει μέτρο $5,0 \times 10^6 \text{ N/C}$. Ποιά είναι το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης που θα δράσει σε ένα φορτίο $-0,2 \text{ nC}$, εάν τοποθετηθεί σε εκείνο το σημείο;
- 2 Στις λυχνίες καθοδικών ακτίνων, που χρησιμοποιούνταν στις τηλεοράσεις παλιάς γενιάς, τα ηλεκτρόνια (καθοδικές ακτίνες) εκπέμπονταν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδο) και κινούνταν με επιταχύνσεις της τάξης των $1 \times 10^{17} \text{ m/s}^2$ προς το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδο). Να υπολογίσετε το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου, που μπορεί να προσδώσει αυτή την επιτάχυνση σε ένα ηλεκτρόνιο. Η μάζα του ηλεκτρονίου είναι $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
- 3 Ο Αμερικανός φυσικός **Robert Millikan** μέτρησε το φορτίο του ηλεκτρονίου, μελετώντας την ισορροπία πολύ μικρών **θετικά** φορτισμένων σταγονιδίων λαδιού σε ηλεκτρικό πεδίο. Έστω ότι ένα σταγονίδιο λαδιού έχει μάζα $1,9 \times 10^{-15} \text{ kg}$ και ισορροπεί σε κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο, έντασης $2,0 \times 10^4 \text{ N/C}$. **(α)** Να εξηγήσετε ποιά είναι η φορά του ηλεκτρικού πεδίου. **(β)** Να υπολογίσετε το φορτίο του σταγονιδίου. Ποιά είναι το έλλειμμα ηλεκτρονίων του σταγονιδίου;
- 4 Η Γη είναι αρνητικά φορτισμένη και ανταλλάσσει συνεχώς φορτισμένα σωματίδια με τη θετικά φορτισμένη ατμόσφαιρα. Πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου της Γης έχει τυπική τιμή $1,1 \times 10^2 \text{ N/C}$ κοντά στην επιφάνεια της Γης. Να υποθέσετε ότι η ένταση του πεδίου της Γης προκαλείται από ένα αρνητικό σημειακό φορτίο τοποθετημένο στο κέντρο της, και να υπολογίσετε το φορτίο αυτό. Η ακτίνα της Γης είναι $6,4 \times 10^3 \text{ km}$.
- 5 Εάν εφαρμοσθεί αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο σε μία περιοχή της ατμόσφαιρας, τα μόρια του αέρα χάνουν ηλεκτρόνια και ιονίζονται. Επειδή τα ηλεκτρόνια και τα θετικά ιόντα κινούνται ελεύθερα, ο αέρας μετατρέπεται σε αγωγό. Η τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, πέρα από την οποία ο αέρας γίνεται αγωγός, ονομάζεται **διηλεκτρική αντοχή** του αέρα, και είναι ίση με $3 \times 10^6 \text{ N/C}$.

Θεωρείστε μία φορτισμένη μεταλλική σφαίρα. Για κάποια χαρακτηριστική τιμή $|q_{\mu\epsilon\gamma}|$ του φορτίου της σφαίρας, το μέτρο της έντασης ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της σφαίρας γίνεται ίσο με τη διηλεκτρική αντοχή του αέρα. Εάν το φορτίο της σφαίρας υπερβεί αυτή την τιμή ($|q| > |q_{\mu\epsilon\gamma}|$), τα μόρια του αέρα ιονίζονται και δημιουργούνται σπινθήρες, και μέρος του φορτίου της σφαίρας μεταφέρεται στον αέρα. Η τιμή $|q_{\mu\epsilon\gamma}|$ είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να κρατά η σφαίρα, χωρίς να ιονίζεται ο αέρας.

(α) Να προσδιορίσετε την τιμή φορτίου $|q_{\mu\epsilon\gamma}|$, εάν η σφαίρα έχει ακτίνα $R = 0,40 \text{ cm}$.

(β) Πώς εξαρτάται η τιμή φορτίου $|q_{\mu\epsilon\gamma}|$ από την ακτίνα της σφαίρας; Τι προκαλεί πιο εύκολα ιονισμό του αέρα, μία μικρή ή μία μεγάλη σφαίρα;

Σημείωση

Ο ιονισμός του αέρα μπορεί να είναι έντονος κοντά στις ακίδες των αγωγών. Για να περιορισθεί ο ιονισμός του αέρα, οι διαστάσεις των ακίδων μεγαλώνουν (π.χ. στην άκρη μίας κεραίας αυτοκινήτου μπορεί να τοποθετηθεί ένα σφαιρίδιο).

7.17. Το Έργο της Ηλεκτροστατικής Δύναμης

Η **Εικόνα 7-8** απεικονίζει ένα σημειακό φορτίο Q , το οποίο βρίσκεται σε κάποιο σημείο του χώρου.

Αρχικά, στην περιοχή γύρω από το Q δεν υπάρχουν άλλα φορτία. Κρατάμε το Q ακίνητο, και μεταφέρουμε από το άπειρο σε απόσταση r ένα δεύτερο φορτίο q , **ομόσημο με το Q** , με τη βοήθεια μίας εξωτερικής δύναμης $\vec{F}_{εξ}$. Το q μετακινείται κατά μήκος μιας ακτινικής διεύθυνσης, στο σημείο **A**, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7-8**. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του q , ρυθμίζουμε τη δύναμη $\vec{F}_{εξ}$ έτσι ώστε να είναι **συνεχώς αντίθετη** από την απωστική **ηλεκτρική δύναμη** $\vec{F}_{ηλ}$, που ασκείται στο q από το Q . Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε να μεταφέρουμε το φορτίο q στο σημείο A με πολύ μικρή, σταθερή ταχύτητα.

Θέτουμε τώρα το εξής ερώτημα:

Ποιό είναι το έργο της εξωτερικής δύναμης $\vec{F}_{εξ}$ και της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{ηλ}$, κατά τη μετακίνηση του φορτίου q από το άπειρο στο σημείο A, με τον τρόπο που περιγράψαμε;

Επειδή οι δυνάμεις $\vec{F}_{εξ}$ και $\vec{F}_{ηλ}$ είναι αντίθετες, τα έργα τους είναι επίσης αντίθετα:

$$W_{\vec{F}_{εξ}} = -W_{\vec{F}_{ηλ}}$$

Τα μέτρα των $\vec{F}_{εξ}$ και $\vec{F}_{ηλ}$ **δεν** είναι σταθερά, αλλά μεταβάλλονται με την απόσταση μεταξύ των q και Q . Γι' αυτό, τα ζητούμενα έργα **δεν** υπολογίζονται από την απλή σχέση *Έργο = Δύναμη × Μετατόπιση*.

Για να προσδιορίσουμε τα ζητούμενα έργα, συγκρίνουμε τη δύναμη $\vec{F}_{ηλ}$ με τη δύναμη παγκόσμιας έλξης $\vec{F}_{βαρ}$ ανάμεσα σε δύο υλικά σώματα.

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει ένα υλικό σώμα μάζας M . Κρατώντας αυτό το σώμα ακίνητο, μεταφέρουμε ένα δεύτερο σώμα μάζας m από το άπειρο σε απόσταση r .

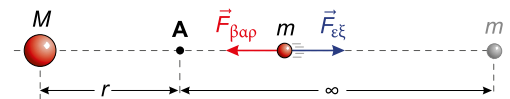
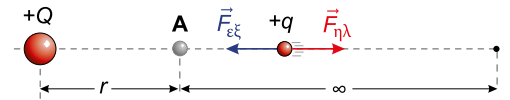
Στο σώμα m δρα μία δύναμη παγκόσμιας έλξης από το M , η οποία έχει μέτρο

$$|\vec{F}_{βαρ}| = G \frac{Mm}{r^2}$$

Συγκρίνοντας με την Εικόνα 7-8, **παρατηρούμε** ότι:

Εικόνα 7-8

Το φορτίο q μεταφέρεται από το άπειρο στο σημείο **A**, στην παρουσία ενός ακίνητου φορτίου Q . Στο φορτίο q δρα μία εξωτερική δύναμη $\vec{F}_{εξ}$, που είναι συνεχώς αντίθετη από την ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{ηλ}$ από το Q στο q .



- Οι δυνάμεις $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$ και $\vec{F}_{\eta\lambda}$ έχουν τη διεύθυνση της ευθείας, που ενώνει τα σώματα. Η $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$ είναι ελκτική αλλά η $\vec{F}_{\eta\lambda}$ είναι απωστική.
- Τα μέτρα και των δύο δυνάμεων είναι αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης r μεταξύ των σωμάτων.

Όπως εξηγήσαμε στο κεφάλαιο του νόμου παγκόσμιας έλξης, το έργο της δύναμης $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$, κατά τη μεταφορά της μάζας m από το άπειρο στο σημείο A, ισούται με την αρνητική μεταβολή στη βαρυτική δυναμική ενέργεια:

$$W_{\beta\alpha\rho}(\infty \rightarrow r) = U_{\delta\upsilon\nu}^{\beta\alpha\rho}(\infty) - U_{\delta\upsilon\nu}^{\beta\alpha\rho}(r) = 0 - \left(-G\frac{Mm}{r}\right) = G\frac{Mm}{r}$$

Το έργο της δύναμης $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$ είναι θετικό, επειδή η βαρυτική δύναμη είναι ελκτική και δεν αντίκειται στη μετακίνηση της μάζας m προς την ακίνητη μάζα M . Επειδή η δύναμη $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$ είναι διατηρητική, το έργο της δεν εξαρτάται από τη διαδρομή της μάζας m από το άπειρο στο σημείο A.

Βασιζόμενοι στις **ομοιότητες** ανάμεσα στις δυνάμεις $\vec{F}_{\beta\alpha\rho}$ και $\vec{F}_{\eta\lambda}$, μπορούμε να δείξουμε ότι το **έργο της ηλεκτρικής δύναμης** που ασκείται στο φορτίο q δίνεται από την ανάλογη σχέση:

$$W_{\eta\lambda}(\infty \rightarrow r) = -k\frac{Qq}{r}, \quad Qq > 0$$

Επειδή τα δύο φορτία είναι ομόσημα ($Qq > 0$) το έργο της δύναμης $\vec{F}_{\eta\lambda}$ είναι αρνητικό. Αυτό είναι αναμενόμενο, επειδή η δύναμη $\vec{F}_{\eta\lambda}$ είναι απωστική και αντίκειται στη μετακίνηση του φορτίου q προς το ακίνητο φορτίο Q .

Όπως φαίνεται από την τελευταία σχέση, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι ανεξάρτητο από τη διαδρομή του φορτίου από το άπειρο στο σημείο A. **Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι διατηρητικές**, όπως και η δύναμη της παγκόσμιας έλξης ανάμεσα σε δύο υλικά σώματα.

Εάν **ένα** από τα δύο φορτία αλλάξει πρόσημο ($Qq < 0$) η κατεύθυνση των $\vec{F}_{\eta\lambda}$ και $\vec{F}_{\varepsilon\lambda}$ αντιστρέφεται, αλλά το μέτρο τους δεν αλλάζει: το έργο $W_{\eta\lambda}(\infty \rightarrow r)$ παραμένει σταθερό κατ' απόλυτη τιμή, αλλά γίνεται θετικό. Συνεπώς, για ετερόσημα φορτία το έργο της ηλεκτρικής δύναμης προσδιορίζεται από την **ίδια** σχέση:

$$W_{\eta\lambda}(\infty \rightarrow r) = -k\frac{Qq}{r}, \quad Qq < 0$$

Εάν επαναφέρουμε το φορτίο q από το σημείο Α στο άπειρο με τον ίδιο τρόπο, η ηλεκτρική και η εξωτερική δύναμη δεν μεταβάλλονται, αλλά η κατεύθυνση της μετατόπισης αντιστρέφεται. Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι

$$W_{\eta\lambda}(r \rightarrow \infty) = -W_{\eta\lambda}(\infty \rightarrow r) = k(Qq)/r$$

Τα πιο πάνω συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

Έργο Ηλεκτρικής Δύναμης σε Σημειακό Φορτίο q , κατά τη Μετατόπισή του ανάμεσα στο Άπειρο και σε Απόσταση r από δεύτερο ακίνητο Σημειακό Φορτίο Q :

$$W_{\eta\lambda}(\infty \rightarrow r) = -k \frac{Qq}{r}, \text{ και } W_{\eta\lambda}(r \rightarrow \infty) = k \frac{Qq}{r}$$

Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι **διατηρητικές**. Το έργο τους **δεν** εξαρτάται από τη διαδρομή του φορτίου, στο οποίο δρούν.

Επειδή η ηλεκτρική δύναμη στο φορτίο q είναι συνεχώς αντίθετη με την εξωτερική, τα έργα των δυνάμεων $\vec{F}_{\varepsilon\xi}$ και $\vec{F}_{\eta\lambda}$ είναι αντίθετα. Άρα:

Έργο Εξωτερικής Δύναμης σε Σημειακό Φορτίο q , κατά τη Μετατόπισή του ανάμεσα στο Άπειρο και σε Απόσταση r από δεύτερο ακίνητο Σημειακό Φορτίο Q :

$$W_{\varepsilon\xi}(\infty \rightarrow r) = k \frac{Qq}{r}, \text{ και } W_{\varepsilon\xi}(r \rightarrow \infty) = -k \frac{Qq}{r}$$



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.17.1. Δύο σημειακά φορτία $Q = +1,00 \times 10^{-6} \text{ C}$ και $q = +2,00 \times 10^{-6} \text{ C}$ βρίσκονται σε απόσταση $6,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ μεταξύ τους.

(α) Με πολύ μικρή, σταθερή ταχύτητα μεταφέρουμε το φορτίο q σε άπειρη απόσταση από το Q , διατηρώντας το φορτίο Q ακίνητο. Να υπολογίσετε τα έργα της ηλεκτρικής και της εξωτερικής δύναμης στο φορτίο q .

(β) Ξεκινώντας από το άπειρο, επαναφέρουμε το φορτίο q σε απόσταση $4,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ από το στατικό φορτίο Q , μετακινώντας το με μικρή, σταθερή ταχύτητα. Να υπολογίσετε τα έργα της ηλεκτρικής και της εξωτερικής δύναμης στο φορτίο q .

7.17.2. Να επαναλάβετε το ερώτημα **7.17.1.** για την περίπτωση που το φορτίο $q = -2,00 \times 10^{-6} \text{ C}$.

7.18. Η Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια Συστήματος δύο Στατικών Σημειακών Φορτίων

Στην προηγούμενη ενότητα δείξαμε ότι το έργο της **εξωτερικής** δύναμης, που απαιτείται για την **προσέγγιση** των φορτίων από το άπειρο σε απόσταση r , ισούται με την ποσότητα

$$W_{\varepsilon\xi}(\infty \rightarrow r) = k \frac{Qq}{r}$$

Ορίζουμε ως ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός συστήματος δύο στατικών **σημειακών** φορτίων q και Q , που απέχουν μεταξύ τους κατά r το πιο πάνω έργο:

Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια Συστήματος Δύο Στατικών Σημειακών Φορτίων σε απόσταση r :

$$U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) = k \frac{Qq}{r}$$

Προσοχή

Στην πιο πάνω σχέση εισέρχονται οι **αλγεβρικές** τιμές των φορτίων. Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια εκφράζεται σε μονάδες Joule, όπως θα έπρεπε:

$$\frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2} \times \frac{\text{C}^2}{\text{m}} = \text{N} \times \text{m} = \text{J}$$

Ισοδύναμα, η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ισούται με το έργο της **ηλεκτρικής** δύναμης, κατά την **απομάκρυνση** των φορτίων από απόσταση r σε άπειρη απόσταση:

$$U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) = W_{\varepsilon\xi}(\infty \rightarrow r) = W_{\eta\lambda}(r \rightarrow \infty)$$

Παρατήρηση

Η σχέση ορισμού της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας είναι **συμμετρική** ως προς τα φορτία q και Q . Έστω ότι κρατούμε ακίνητο το φορτίο q στο σημείο A και μετακινούμε το φορτίο Q στο άπειρο, με χρήση κατάλληλης εξωτερικής δύναμης. Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, που ασκείται στο Q , ισούται πάλι με την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

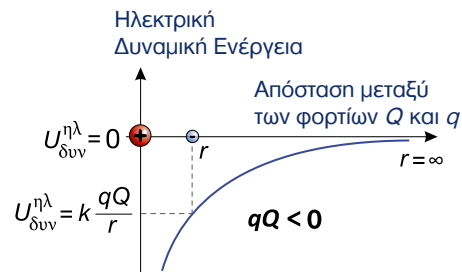
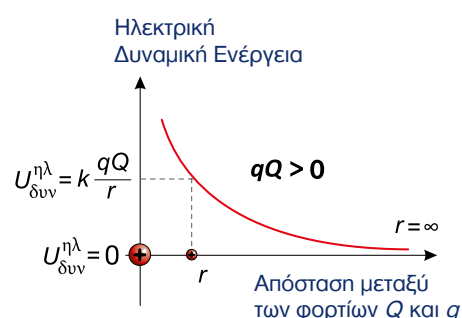
7.18.1. Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός συστήματος στατικών φορτίων Q και q είναι ίση με $2,0 \times 10^{-3}$ J.

- (α) Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που δρά στο φορτίο q , εάν το μεταφέρουμε στο άπειρο; Θεωρείστε ότι το Q παραμένει ακίνητο.
- (β) Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που δρά στο φορτίο Q , εάν το μεταφέρουμε στο άπειρο, διατηρώντας ακίνητο το φορτίο q ;
- (γ) Μετακινούμε και τα δύο φορτία σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους, με χρήση κατάλληλης εξωτερικής δύναμης. Με τι ισούται το συνολικό έργο των δύο ηλεκτρικών δυνάμεων;

Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια δύο **ομόσημων** φορτίων είναι **θετική** (επειδή $Qq > 0$), **ελαττώνεται με την απόσταση r** , και **μηδενίζεται σε άπειρη** απόσταση μεταξύ των φορτίων:

$$r = \infty \Rightarrow U_{\text{δυν}}^{\eta\lambda} = 0$$

Ομοίως, η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια δύο **ετερόσημων** φορτίων είναι **αρνητική** (επειδή $Qq < 0$), **αυξάνεται** (γίνεται λιγότερο αρνητική) **με την απόσταση r** , και **μηδενίζεται σε άπειρη** απόσταση μεταξύ των φορτίων.



Σημείωση

Η έκφραση της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας έχει την ίδια μορφή με τη βαρυτική δυναμική ενέργεια συστήματος δύο σωμάτων:

$$U_{\text{δυν}}^{\beta\alpha\rho}(r) = -G \frac{Mm}{r}$$

όπου M και m είναι οι μάζες των σωμάτων και r είναι η μεταξύ τους απόσταση. Το **αρνητικό πρόσημο** της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας **δεν περιλαμβάνεται** στον ορισμό της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας. Η δύναμη παγκόσμιας έλξης είναι **ελκτική** και το μέτρο της εξαρτάται από το **θετικό** γινόμενο (mM) των μαζών των σωμάτων. Αντίθετα, η ηλεκτρική δύναμη είναι ελκτική μόνο όταν τα φορτία είναι ετερόσημα ($Qq < 0$).

Παράδειγμα 1

Θα υπολογίσουμε την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός ζεύγους σημειακών φορτίων $Q = -5,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ και $q = +2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, που απέχουν μεταξύ τους κατά $r = 2,50 \text{ m}$.

$$U_{\text{δυν}}^{\eta\lambda} = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times (-5,00 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (2,00 \times 10^{-6} \text{ C}) \times \frac{1}{0,25 \text{ m}} =$$
$$9,0 \times (-5,00) \times (2,00) \times \frac{1}{0,25} \times 10^{9-6-6} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}} = -3,6 \times 10^{-1} \text{ J}$$

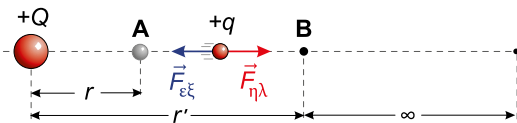
Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια είναι **αρνητική** επειδή τα φορτία είναι **ετερόσημα**.

Παράδειγμα 2

Θα εκτιμήσουμε την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του ζεύγους πρωτονίου - ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Θα υποθέσουμε ότι τα δύο σωματίδια αντιστοιχούν σε σημειακά φορτία $+e = +1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ και $-e = -1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$, που απέχουν μεταξύ τους κατά μέση απόσταση $r = 5,292 \times 10^{-11} \text{ m}$.

$$U_{\text{δυν}}^{\eta\lambda} = k \frac{(+e)(-e)}{r} = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times \frac{(+1,602 \times 10^{-19} \text{ C})(-1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{5,292 \times 10^{-11} \text{ m}} =$$
$$9,0 \times \frac{(+1,602)(-1,602)}{5,292} \times 10^{9-19-19+11} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}} = -4,4 \times 10^{-18} \text{ J}$$

7.19. Σχέση Έργου Ηλεκτρικής Δύναμης και Μεταβολής στην Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια



Θεωρούμε πάλι την περίπτωση που στον χώρο υπάρχουν μόνο δύο στατικά σημειακά φορτία q και Q σε απόσταση r μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Έστω ότι διατηρούμε το φορτίο Q ακίνητο. Χρησιμοποιώντας μία εξωτερική δύναμη $\vec{F}_{\varepsilon\xi} = -\vec{F}_{\eta\lambda}$, μεταφέρουμε το φορτίο q από το σημείο A στο άπειρο κατά μήκος της ευθείας AB, που διέρχεται από τα δύο φορτία. Από τα προηγούμενα, γνωρίζουμε ότι το **έργο της ηλεκτρικής δύναμης** $\vec{F}_{\eta\lambda}$, που ασκείται στο φορτίο q , ισούται με

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow \infty) = U_{\text{δυν}}^{\eta\lambda}(r) = k \frac{Qq}{r}$$

Κατά τη διάρκεια της μετατόπισης, το φορτίο q διέρχεται από το **ενδιάμεσο** σημείο B, το οποίο απέχει κατά r' από το φορτίο Q . Το συνολι-

κό έργο της ηλεκτρικής δύναμης ισούται με το άθροισμα:

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow \infty) = W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) + W_{\eta\lambda}(B \rightarrow \infty)$$

Όμως, γνωρίζουμε ότι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μεταφορά του q από το σημείο B στο άπειρο είναι:

$$W_{\eta\lambda}(B \rightarrow \infty) = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r') = k \frac{Qq}{r'}$$

Από τις τελευταίες σχέσεις υπολογίζουμε το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μεταφορά του q από το σημείο A στο σημείο B:

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) = W_{\eta\lambda}(A \rightarrow \infty) - W_{\eta\lambda}(B \rightarrow \infty) = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) - U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r') = kQq \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$$

Συνοψίζουμε:

Κατά τη μετατόπιση ενός σημειακού φορτίου q στο πεδίο ενός ακίνητου σημειακού φορτίου Q , το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στο q ισούται με την **αρνητική μεταβολή** στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος:

$$W_{\eta\lambda}(r \rightarrow r') = kQq \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) - U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r') = -\Delta U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}$$

Αποδεικνύεται ότι αυτή η σχέση ισχύει ανεξάρτητα από τη διαδρομή του φορτίου q . Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι **διατηρητικές**.

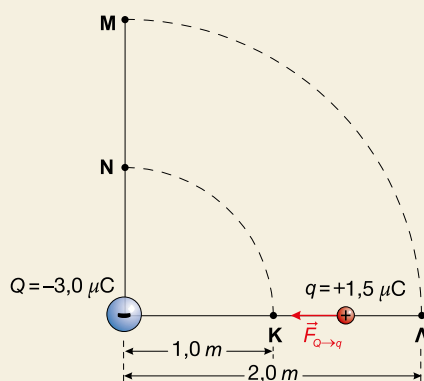
Παρατήρηση

Η πιο πάνω σχέση είναι **συμμετρική** ως προς τα φορτία q και Q . Έστω ότι κρατούμε το φορτίο q ακίνητο, και μετακινούμε το φορτίο Q από αρχική απόσταση r σε τελική απόσταση r' . Η ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}'_{\eta\lambda}$ από το q στο Q παράγει το ίδιο έργο:

$$W_{\eta\lambda}(r \rightarrow r') = kQq \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) = -\Delta U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}$$

Παράδειγμα 1

Να υπολογίσετε το έργο της ηλεκτρικής δύναμης από το φορτίο $Q = -3,0 \times 10^{-6}$ C στο φορτίο $q = +1,5 \times 10^{-6}$ C, εάν το q μετατοπισθεί:



1. από το σημείο **K** στο σημείο **Λ** κατά μήκος της ευθείας ΚΛ.

$$W_{\eta\lambda}(r_K \rightarrow r_\Lambda) = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times (1,50 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (-3,00 \times 10^{-6} \text{ C}) \times \left(\frac{1}{1,0 \text{ m}} - \frac{1}{2,0 \text{ m}} \right) =$$

$$9,0 \times 1,50 \times (-3,00) \times \left(\frac{2,0 - 1,0}{2,0 \times 1,0} \right) \times 10^{9-6-6} \frac{\text{Nm}^2 \text{ C}^2}{\text{C}^2 \text{ m}} = -2,0 \times 10^{-2} \text{ J}$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι **αρνητικό**, επειδή η δύναμη είναι ελκτική και η μετατόπιση του φορτίου q είναι αντίρροπη με τη δύναμη.

2. Από το σημείο **Λ** στο σημείο **M**, κατά μήκος του κυκλικού τόξου ΛΜ.

$$W_{\eta\lambda}(r_\Lambda \rightarrow r_M) = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times (1,50 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (-3,00 \times 10^{-6} \text{ C}) \times \left(\frac{1}{2,0 \text{ m}} - \frac{1}{2,0 \text{ m}} \right) = 0 \text{ J}$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι μηδενικό, επειδή τα σημεία Λ και Μ βρίσκονται στην ίδια απόσταση από το φορτίο Q .

3. Από το σημείο **M** στο σημείο **N**.

$$W_{\eta\lambda}(r_M \rightarrow r_N) = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \times (1,50 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (-3,00 \times 10^{-6} \text{ C}) \times \left(\frac{1}{2,0 \text{ m}} - \frac{1}{1,0 \text{ m}} \right) = +2,0 \times 10^{-2} \text{ J}$$



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 7.19.1.** Ποιό είναι το συνολικό έργο της δύναμης $\vec{F}_{Q \rightarrow q}$ κατά τη μετακίνηση του φορτίου q στη διαδρομή ΚΛ+ΛΜ+ΜΝ του Παραδείγματος 1;
- 7.19.2.** Εάν το φορτίο q μετακινηθεί από το σημείο Κ στο σημείο Ν κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ΚΝ, ποιό θα είναι το έργο της δύναμης $\vec{F}_{Q \rightarrow q}$; Πώς διαφέρει από το αποτέλεσμα της προηγούμενης ερώτησης;

7.19.3. Εάν το φορτίο q του **Παραδείγματος 1** μετακινηθεί από το σημείο Λ στο Κ κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ΛΚ, ποίο θα είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης \vec{F}_{Q-q} ;

Σημείωση

Η ίδια σχέση μεταξύ μεταβολής στη δυναμική ενέργεια και στο **συνολικό** έργο των ηλεκτρικών δυνάμεων ισχύει όταν μετακινούνται **και τα δύο** φορτία του συστήματος. Για να το δείξουμε αυτό, θεωρούμε τα φορτία Q και q , τα οποία βρίσκονται στα σημεία Κ και Λ και απέχουν μεταξύ τους κατά r . Εκτελούμε τα εξής διαδοχικά βήματα. Σε κάθε βήμα υποθέτουμε ότι στο μετακινούμενο φορτίο δρά μία εξωτερική δύναμη, έτσι ώστε η συνισταμένη δύναμη στο φορτίο να μηδενίζεται.

1. Μετακινούμε το φορτίο q από το σημείο Λ στο σημείο Μ, διατηρώντας το φορτίο Q ακίνητο. Η νέα απόσταση μεταξύ των φορτίων είναι r' . Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης \vec{F}_{Q-q} ισούται με:

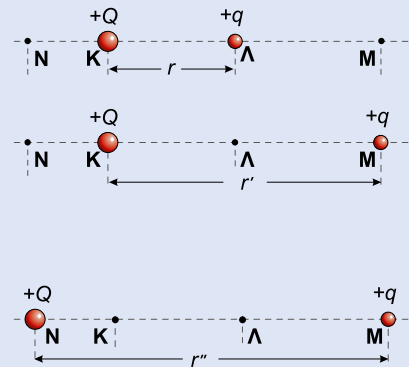
$$W_{\vec{F}_{Q-q}} = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) - U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r')$$

2. Μετακινούμε το φορτίο Q από το σημείο Κ στο σημείο Ν, διατηρώντας το φορτίο q ακίνητο. Η νέα απόσταση μεταξύ των φορτίων είναι ίση με r'' . Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης \vec{F}_{q-Q} ισούται με:

$$W_{\vec{F}_{q-Q}} = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r') - U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r'')$$

Συνδυάζοντας τα βήματα 1 και 2, προκύπτει ότι το **συνολικό έργο** των ηλεκτρικών δυνάμεων στα δύο φορτία είναι ίσο με τη συνολική **αρνητική** μεταβολή της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας:

$$W_{\vec{F}_{Q-q}} + W_{\vec{F}_{q-Q}} = U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r) - U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}(r'') = -\Delta U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda}$$

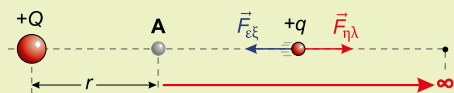


7.20. Η Έννοια του Ηλεκτροστατικού Δυναμικού

Κατά τη μεταφορά του φορτίου q στο άπειρο υπό την παρουσία του φορτίου Q το συνολικό έργο της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{\eta\lambda}$, που ασκείται στο q από το ακίνητο φορτίο Q , μπορεί να γραφεί ως:

Έργο Ηλεκτρικής Δύναμης κατά τη Μετατόπιση του Φορτίου q από το σημείο Α στο Άπειρο:

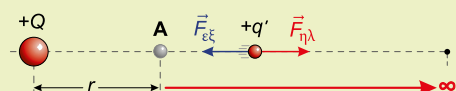
$$W_q(r \rightarrow \infty) = k \frac{qQ}{r} = q \left[k \frac{Q}{r} \right] = qV_A$$



Παρατηρούμε ότι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι **ανάλογο** με την ποσότητα $V_A = kQ/r$, η οποία **δεν** εξαρτάται από το μετατοπιζόμενο φορτίο q . Η ποσότητα V_A εξαρτάται μόνο από το ακίνητο φορτίο Q και την απόσταση r του q από το Q .

Έστω ότι επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία με ένα διαφορετικό φορτίο q' . Το συνολικό έργο της νέας ηλεκτρικής δύναμης, που ασκείται από το Q στο q' , γίνεται:

Έργο Ηλεκτρικής Δύναμης κατά τη Μετατόπιση του Φορτίου q' από το σημείο A στο Άπειρο:



$$W_{q'}(r \rightarrow \infty) = k \frac{q'Q}{r} = q' \left[k \frac{Q}{r} \right] = q'V_A$$

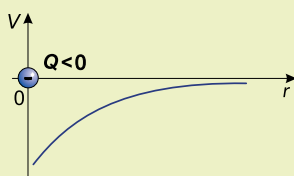
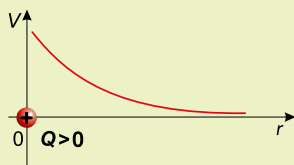
Συμπεραίνουμε: Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, που οφείλεται σε ένα στατικό σημειακό φορτίο Q , μπορεί **πάντοτε** να εκφραστεί ως γινόμενο της ποσότητας V_A επί το μετατοπιζόμενο φορτίο. Συνδέουμε την ποσότητα V_A με ένα νέο φυσικό μέγεθος, που ονομάζουμε **Ηλεκτροστατικό Δυναμικό του Σημειακού Φορτίου Q** .

Ηλεκτροστατικό Δυναμικό Σημειακού Φορτίου Q :

$$V_Q(r) = k \frac{Q}{r}$$

Παρατηρούμε ότι το ηλεκτροστατικό δυναμικό:

- Συνδέεται με **ένα** στατικό σημειακό φορτίο, ενώ η ηλεκτροστατική δυναμική ενέργεια συνδέεται με δύο (ή περισσότερα) στατικά φορτία.
- Ορίζεται σε όλα τα σημεία του χώρου.
- Είναι ανάλογο με το σημειακό φορτίο Q και αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση r από αυτό.
- Το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός **θετικού** σημειακού φορτίου είναι **θετικό**, και μηδενίζεται σε άπειρη απόσταση από το φορτίο.
- Το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός **αρνητικού** σημειακού φορτίου είναι **αρνητικό**, και μηδενίζεται σε άπειρη απόσταση από το φορτίο.



Από τη σχέση $W = qV \Rightarrow V = W/q$ προκύπτει ότι το ηλεκτροστατικό δυναμικό εκφράζεται στη μονάδα J/C. Η μονάδα αυτή είναι γνωστή ως **Volt (V)** ($1V = 1 J/C$), από τον φυσικό **Alessandro Volta**, που εφευρέ την πρώτη ηλεκτρική μπαταρία.

Παράδειγμα 1

- (α) Θα υπολογίσουμε το δυναμικό που δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο $Q = -2,0 \mu\text{C}$ σε ένα σημείο **A**, που βρίσκεται σε απόσταση 10,0 cm από το Q .

Από τη σχέση ορισμού του δυναμικού:

$$V = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(-2,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{0,1 \text{ m}} = -1,8 \times 10^5 \text{ V}$$

- (β) Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που ασκεί το Q σε ένα δεύτερο φορτίο $q = +0,5 \mu\text{C}$, κατά τη μετακίνηση του q από το σημείο A στο άπειρο;

Από τη σχέση έργου - δυναμικού, προκύπτει:

$$W_{\eta\lambda} = qV = (+0,5 \times 10^{-6} \text{ C}) \times (-1,8 \times 10^5 \text{ V}) = -0,9 \times 10^{-1} \text{ J}$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι αρνητικό επειδή η δύναμη είναι **ελκτική** και τα δύο φορτία απομακρύνονται.

Παράδειγμα 2

- (α) Θα εκτιμήσουμε το δυναμικό που δημιουργεί ο πυρήνας του υδρογόνου (πρωτόνιο) σε απόσταση ίση με τη μέση απόσταση πρωτονίου - ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, $r = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$.

Από τη σχέση ορισμού του δυναμικού:

$$V = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(+1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{5,3 \times 10^{-11} \text{ m}} = 2,7 \times 10^1 \text{ V}$$

- (β) Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που ασκεί το πρωτόνιο σε ένα ηλεκτρόνιο, κατά τη μετακίνηση του ηλεκτρονίου από την πιο πάνω μέση απόσταση στο άπειρο;

Από τη σχέση έργου - δυναμικού, προκύπτει:

$$W_{\eta\lambda} = (-e)V = (-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (2,7 \times 10^1 \text{ V}) = -4,4 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι αρνητικό επειδή η δύναμη είναι **ελκτική** και τα δύο φορτία απομακρύνονται.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.20.1. Το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός σημειακού φορτίου Q σε ένα σημείο του χώρου είναι ίσο με $4,0 \text{ V}$. Να απαντήσετε στα εξής ερωτήματα:

- (α) Ποιό είναι το πρόσημο του φορτίου Q ;
- (β) Πώς θα μεταβληθεί το δυναμικό στο σημείο A , εάν το φορτίο Q διπλασιασθεί;
- (γ) Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης που ασκεί το Q σε ένα φορτίο $q = +2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$ κατά τη μεταφορά του q από το σημείο A στο άπειρο;

7.21. Το Συνολικό Ηλεκτροστατικό Δυναμικό Περισσότερων Σημειακών Φορτίων

Εάν σε μία περιοχή του χώρου υπάρχουν περισσότερα από ένα σημειακά φορτία, το **ολικό** ηλεκτροστατικό δυναμικό σε κάποιο σημείο A του χώρου ισούται με το **άθροισμα** των ηλεκτροστατικών δυναμικών όλων των φορτίων στο ίδιο σημείο:

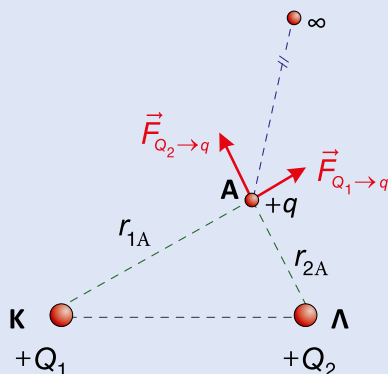
Ηλεκτροστατικό Δυναμικό Περισσότερων Σημειακών Φορτίων

$$V_A^{\text{ολ}} = V_{Q_1A} + V_{Q_2A} + V_{Q_3A} + \dots = k \frac{Q_1}{r_{1A}} + k \frac{Q_2}{r_{2A}} + k \frac{Q_3}{r_{3A}} + \dots$$

Στην τελευταία σχέση, r_{1A} , r_{2A} , r_{3A} , ... είναι οι αποστάσεις των φορτίων Q_1 , Q_2 , Q_3 , ... από το σημείο A .

⚠ Προσοχή

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό είναι **μονόμετρο** μέγεθος, και το άθροισμά του υπολογίζεται όπως για όλα τα μονόμετρα μεγέθη.



Απόδειξη

Στο διπλανό σχήμα απεικονίζονται δύο φορτία Q_1 και Q_2 στα σημεία K και L του χώρου. Εάν τοποθετήσουμε ένα τρίτο φορτίο q στο σημείο A , θα δρουν σε αυτό οι ηλεκτρικές δυνάμεις $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ και $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$, αντίστοιχα, από τα φορτία Q_1 και Q_2 .

Έστω ότι μεταφέρουμε το φορτίο q από το σημείο A στο άπειρο. Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ ισούται με:

Έργο της Ηλεκτρικής Δύναμης $\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}$ κατά τη Μετατόπιση του Φορτίου q από το σημείο A στο Άπειρο:

$$W_{\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}} = kqQ_1 \left(\frac{1}{r_{1A}} - \frac{1}{\infty} \right) = q \left(k \frac{Q_1}{r_{1A}} \right) = qV_{Q_1A}$$

Στην τελευταία σχέση, V_{Q_1A} είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό του σημειακού φορτίου Q_1 στο σημείο A.

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$ ισούται με:

Έργο της Ηλεκτρικής Δύναμης $\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}$ κατά τη Μετατόπιση του Φορτίου q από το σημείο A στο Άπειρο:

$$W_{\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}} = kqQ_2 \left(\frac{1}{r_{2A}} - \frac{1}{\infty} \right) = q \left(k \frac{Q_2}{r_{2A}} \right) = qV_{Q_2A}$$

Στην τελευταία σχέση, V_{Q_2A} είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό του σημειακού φορτίου Q_2 στο σημείο A.

Στην Α' Λυκείου μάθαμε ότι όταν σε ένα σώμα δρουν πολλές δυνάμεις, το άθροισμα των έργων τους ισούται με το έργο της συνισταμένης δύναμης:

$$W_{\Sigma \vec{F}} = \Sigma W_{\vec{F}}$$

Άρα, το **έργο της συνισταμένης ηλεκτρικής δύναμης** στο φορτίο q είναι το άθροισμα των έργων των δύο δυνάμεων από τα φορτία Q_1 και Q_2 :

$$W^{\text{ολ}} = W_{\vec{F}_{Q_1 \rightarrow q}} + W_{\vec{F}_{Q_2 \rightarrow q}} = qV_{Q_1A} + qV_{Q_2A} = q(V_{Q_1A} + V_{Q_2A})$$

Ορίζουμε ως **ολικό** ηλεκτροστατικό δυναμικό στο σημείο A το άθροισμα των ηλεκτροστατικών δυναμικών των δύο φορτίων

$$V_A^{\text{ολ}} = V_{Q_1A} + V_{Q_2A}$$

Τότε, το συνολικό έργο των ηλεκτρικών δυνάμεων στο φορτίο q γράφεται ως

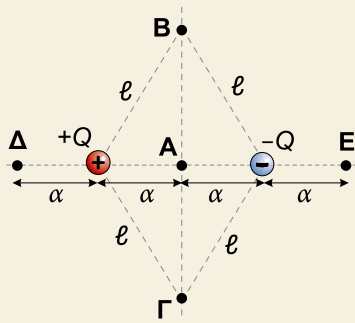
$$W^{\text{ολ}} = qV_A^{\text{ολ}}$$

Καταλήγουμε δηλαδή στην ίδια σχέση, που συνδέει το έργο ηλεκτρικής δύναμης ενός σημειακού φορτίου με το ηλεκτροστατικό δυναμικό του φορτίου.

Παράδειγμα 1

Να υπολογίσετε το ολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό των φορτίων $+Q$ και $-Q$ του σχήματος στην επόμενη σελίδα, στα σημεία A, B, Γ, Δ και E.

$V=0$ κατά μήκος της ευθείας ΒΓ



Για μετακίνηση φορτίου κατά μήκος της ΒΓ, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι μηδενικό.

(i) Στο σημείο Α:

$$V_A^{\text{ολ}} = V_{+QA} + V_{-QA} = k\frac{Q}{\alpha} + k\frac{-Q}{\alpha} = 0$$

(ii) Στα σημεία Β και Γ το ολικό δυναμικό είναι επίσης ίσο με μηδέν:

$$V_B^{\text{ολ}} = V_{\Gamma}^{\text{ολ}} = k\frac{Q}{\ell} + k\frac{-Q}{\ell} = 0$$

Το ολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό ισούται με μηδέν **σε όλα τα σημεία που ισαπέχουν** από τα φορτία $+Q$ και $-Q$. Τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω στη μεσοκάθετο ΒΓ του ευθύγραμμου τμήματος, με άκρα τα $+Q$ και $-Q$.

⚠ Προσοχή

Εάν μετακινήσουμε ένα φορτίο q από οποιοδήποτε σημείο με μηδενικό ολικό δυναμικό μέχρι το άπειρο, το έργο της συνισταμένης ηλεκτρικής δύναμης στο q είναι μηδέν:

$$W^{\text{ολ}} = qV^{\text{ολ}} = 0$$

Κατά τη μετακίνηση ασκούνται στο φορτίο q ηλεκτρικές δυνάμεις από τα φορτία $+Q$ και $-Q$. Τα έργα των δυνάμεων αυτών είναι αντίθετα μεταξύ τους, και το άθροισμά τους (το συνολικό έργο) μηδενίζεται.

(iii) Το ολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό στο σημείο Δ είναι $V_{\Delta}^{\text{ολ}} = k\frac{Q}{\alpha} + k\frac{-Q}{3\alpha} = \frac{2}{3}k\frac{Q}{\alpha}$.

Άρα, εάν μεταφέρουμε ένα θετικό φορτίο $q > 0$ από το σημείο Δ στο άπειρο, η συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη στο q **παράγει** έργο: $W^{\text{ολ}} = qV_{\Delta}^{\text{ολ}} = \frac{2}{3}k\frac{qQ}{\alpha}$.

(iv) Το ολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό στο σημείο Ε είναι $V_E^{\text{ολ}} = k\frac{Q}{3\alpha} + k\frac{-Q}{\alpha} = -\frac{2}{3}k\frac{Q}{\alpha}$.

Εάν μεταφέρουμε ένα θετικό φορτίο $q > 0$ από το σημείο Ε στο άπειρο, η συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη στο q **καταναλώνει** έργο: $W^{\text{ολ}} = qV_E^{\text{ολ}} = -\frac{2}{3}k\frac{qQ}{\alpha}$.

Παράδειγμα 2

Στο προηγούμενο παράδειγμα, να υπολογίσετε το συνολικό έργο της συνισταμένης ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μετατόπιση ενός φορτίου q :

(i) Από το Α στο Δ: $W^{\text{ολ}} = q(V_A^{\text{ολ}} - V_{\Delta}^{\text{ολ}}) = -\frac{2}{3}k\frac{qQ}{\alpha}$.

(ii) Από το Β στο Γ: $W^{\text{ολ}} = q(V_B^{\text{ολ}} - V_\Gamma^{\text{ολ}}) = 0$.

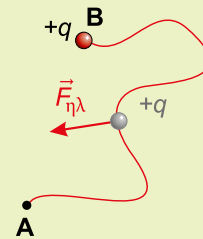
(iii) Από το Δ στο Ε: $W^{\text{ολ}} = q(V_\Delta^{\text{ολ}} - V_E^{\text{ολ}}) = \frac{4}{3}k\frac{qQ}{a}$.

7.22. Η Φυσική Σημασία της Διαφοράς Ηλεκτροστατικού Δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του Χώρου

Εάν γνωρίζουμε τη διαφορά ηλεκτροστατικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων Α και Β, μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο της ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μεταφορά **οποιοδήποτε** φορτίου q από το Α στο Β, από τη σχέση:

Έργο Ηλεκτρικής Δύναμης για τη Μετακίνηση Φορτίου q από αρχικό σημείο Α σε τελικό σημείο Β:

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) = q(V_A - V_B)$$



Προσοχή

Αφαιρούμε **από** το Δυναμικό του **Αρχικού** σημείου το Δυναμικό του **Τελικού** σημείου.



Παρατηρήσεις

- Κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου μεταξύ δύο σημείων (ή από κάποιο σημείο στο άπειρο), το συνολικό έργο των ηλεκτρικών δυνάμεων στο φορτίο υπολογίζεται αμέσως από το ηλεκτροστατικό δυναμικό. Δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε **τις δυνάμεις** που ασκούνται στο φορτίο, ή **τη διαδρομή** που ακολουθεί.
- Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μετακίνηση του φορτίου q από το αρχικό σημείο Α στο τελικό σημείο Β, είναι θετικό όταν:
 - Το φορτίο q είναι **θετικό** και το δυναμικό της αρχικής θέσης είναι **μεγαλύτερο** από το δυναμικό της τελικής θέσης ($V_A > V_B$).
 - Το φορτίο q είναι **αρνητικό** και το δυναμικό της αρχικής θέσης είναι **μικρότερο** από το δυναμικό της τελικής θέσης ($V_A < V_B$).

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) = q(V_A - V_B) > 0 \Rightarrow \begin{cases} q > 0, V_A > V_B \\ q < 0, V_A < V_B \end{cases}$$

Άρα:

- Ένα **θετικό** φορτίο έχει την τάση να κινείται προς σημεία με **χαμηλότερο** δυναμικό.
- Ένα **αρνητικό** φορτίο έχει την τάση να κινείται προς σημεία με **ψηλότερο** δυναμικό.

ΕΝΘΕΤΟ

Η πιο πάνω σχέση ισχύει **γενικά**. Θα την αποδείξουμε για την περίπτωση που η ηλεκτρική δύναμη στο μεταφερόμενο φορτίο q προέρχεται από ένα σημειακό φορτίο Q .

Όπως εξηγήσαμε στην **Ενότητα 7.19.**, κατά τη μετατόπιση του φορτίου q από απόσταση r σε απόσταση r' από το φορτίο Q , το έργο της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{\eta\lambda}$ ισούται με την **αρνητική** μεταβολή της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας των δύο φορτίων:

$$W_{\eta\lambda}(r \rightarrow r') = -\Delta U_{\delta\upsilon\nu}^{\eta\lambda} = kqQ \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$$

Η μεταβολή στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μπορεί να γραφεί και με τον πιο κάτω τρόπο:

$$kqQ \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) = \underbrace{q \left(k \frac{Q}{r} \right)}_{= V_A} - \underbrace{q \left(k \frac{Q}{r'} \right)}_{= V_B}$$

Η ποσότητα $V_A = kQ/r$ είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό του φορτίου Q στο σημείο Α. Ομοίως, η ποσότητα $k \frac{Q}{r'}$ είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό του φορτίου Q στο σημείο Β. Συνδυάζοντας τις πιο πάνω σχέσεις, συμπεραίνουμε ότι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης εκφράζεται ως:

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) = q \left(k \frac{Q}{r} \right) - q \left(k \frac{Q}{r'} \right) = q (V_A - V_B)$$



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.22.1. Η διαφορά ηλεκτροστατικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του χώρου Α και Β είναι $V_A - V_B = 12,5 \text{ V}$.

- Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μεταφορά ενός φορτίου $2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$ **από το Α στο Β**;
- Πώς θα μεταβληθεί το έργο, εάν το φορτίο διπλασιασθεί;
- Πώς θα μεταβληθεί το έργο, εάν αντιστραφεί το πρόσημο του φορτίου;
- Ποιό είναι το έργο κατά τη μεταφορά του φορτίου **από το Β στο Α**;

Σημείωση

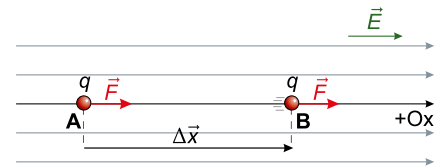
Μία μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται συχνά στην ατομική Φυσική είναι το **ηλεκτρονιοβόλτ (eV)**. Μία ποσότητα ενέργειας 1 eV **ορίζεται** ως το έργο της ηλεκτρικής δύναμης σε ένα ηλεκτρόνιο, κατά τη μεταφορά του μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού $V_{\text{τελ}} - V_{\text{αρχ}} = 1 \text{ V}$ ακριβώς. Μία ποσότητα ενέργειας 1 eV ισούται με $1 \text{ eV} = (1,602 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (1 \text{ V}) = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Παράδειγμα

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μεταφορά ενός ηλεκτρονίου μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού $\Delta V = 1,5 \text{ V}$, ισούται με $W = 1,5 \text{ eV}$.

7.23. Σχέση Έντασης και Διαφοράς Δυναμικού μεταξύ Σημείων Ομογενούς Ηλεκτρικού Πεδίου

Στο διπλανό σχήμα απεικονίζεται ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες, και έχουν την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα της έντασης ηλεκτρικού πεδίου.



Επιλέγουμε δύο σημεία A και B **στην ίδια δυναμική γραμμή**. Ορίζουμε έναν άξονα Ox παράλληλο στο διάνυσμα \vec{AB} , με θετική φορά από το A στο B. Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου έχει **την ίδια διεύθυνση** με το διάνυσμα \vec{AB} .

Έστω ότι μετακινούμε ένα φορτίο q από το A στο B κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος AB. Στο φορτίο δρα μία σταθερή ηλεκτρική δύναμη $\vec{F} = q\vec{E}$. Το έργο της δύναμης αυτής υπολογίζεται από τη διαφορά δυναμικού των σημείων A και B μέσω της σχέσης:

$$W = q(V_A - V_B)$$

Η μετατόπιση Δx είναι θετική και ισούται με το μήκος του AB: $\Delta x = L_{AB}$. Η ηλεκτρική δύναμη είναι παράλληλη με τη μετατόπιση και έχει αλγεβρική τιμή $F = qE$, όπου E είναι η αλγεβρική τιμή της έντασης. Το έργο της \vec{F} μπορεί να υπολογισθεί από τη γνωστή σχέση για το έργο σταθερής δύναμης:

$$W = F\Delta x = (qE) L_{AB}$$

Συνδυάζοντας τις τελευταίες δύο σχέσεις, βρίσκουμε:

$$W = q(V_A - V_B) = qEL_{AB} \Rightarrow E = \frac{V_A - V_B}{L_{AB}} = - \frac{V_B - V_A}{L_{AB}}$$

Άρα, από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B, και την απόσταση που τα χωρίζει, μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση.

Η εφαρμογή αυτής της σχέσης γίνεται με τα εξής βήματα:

- (i) Επιλέγουμε δύο σημεία A και B πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή.
- (ii) Υπολογίζουμε το μέτρο της έντασης από το πηλίκο $|\vec{E}| = \frac{|V_B - V_A|}{L_{AB}}$.
- (iii) Σχεδιάζουμε την ένταση με φορά από το σημείο με το **υψηλότερο** δυναμικό προς το σημείο με το **χαμηλότερο** δυναμικό.

Για να επιβεβαιώσουμε το βήμα (iii), παρατηρούμε ότι η αλγεβρική τιμή της έντασης έχει το ίδιο πρόσημο με τη διαφορά $V_A - V_B$. Άρα, η αλγεβρική τιμή της έντασης είναι θετική (η ένταση κατευθύνεται από το A προς το B) εάν $V_A > V_B$, και αρνητική εάν $V_A < V_B$.

Παρατηρήσεις

1. Από τη σχέση έντασης - διαφοράς δυναμικού συμπεραίνουμε ότι **η ένταση ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να εκφρασθεί σε μονάδες V/m**. Οι δύο τρόποι είναι ισοδύναμοι:

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J/C}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J/m}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

2. Το μέτρο της έντασης ισούται με την (κατ' απόλυτη τιμή) μεταβολή δυναμικού ανά μονάδα μετατόπισης. Για παράδειγμα, έστω ότι το μέτρο της έντασης ενός ομογενούς πεδίου ισούται με 30,0 V/m. Συμπεραίνουμε ότι δύο σημεία που απέχουν κατά 1,0 cm στην ίδια δυναμική γραμμή έχουν διαφορά δυναμικού 0,30 V, εάν απέχουν 2,0 cm έχουν διαφορά δυναμικού 0,60 V κ.ο.κ.

Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

7.23.1. Δύο σημεία A και B βρίσκονται στην ίδια δυναμική γραμμή ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου, απέχουν κατά 1,0 cm και έχουν διαφορά δυναμικού $V_B - V_A = -0,15 \text{ V}$. Να υπολογίσετε το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και να προσδιορίσετε την κατεύθυνσή του.

7.23.2. Ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έχει ένταση μέτρου $|\vec{E}| = 2,0 \text{ V/m}$. Εάν δύο σημεία απέχουν κατά 25,0 cm στην ίδια δυναμική γραμμή, ποιά είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ τους; Μπορείτε να καθορίσετε ποίο σημείο έχει υψηλότερο δυναμικό από τις πληροφορίες που σας δίνονται;

7.24. Η Έννοια της Ισοδυναμικής Επιφάνειας

Στο **Παράδειγμα 1** της **Ενότητας 7.22**, δείξαμε ότι το ηλεκτροστατικό δυναμικό είναι ίσο με μηδέν σε όλα τα σημεία της μεσοκαθέτου ΒΓ του ευθύγραμμου τμήματος με άκρα τα φορτία $+Q$ και $-Q$. Λέμε ότι τα σημεία της ΒΓ ανήκουν σε μία **ισοδυναμική** επιφάνεια, δηλαδή μία επιφάνεια της οποίας όλα τα σημεία έχουν την ίδια τιμή ηλεκτροστατικού δυναμικού.

Για να προσδιορίσουμε τις ισοδυναμικές επιφάνειες ενός σημειακού φορτίου, απαιτούμε το δυναμικό να έχει σταθερή τιμή.

Για παράδειγμα, έστω ότι σε κάποιο σημείο του χώρου βρίσκεται φορτίο $Q = +2,0 \times 10^{-12} \text{ C}$. Τα σημεία του χώρου με σταθερό ηλεκτροστατικό δυναμικό, ίσο με $V = 3,0 \times 10^{-2} \text{ V}$ βρίσκονται σε απόσταση από το φορτίο:

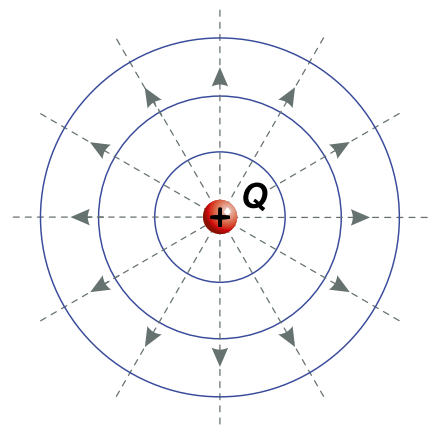
$$V_Q(r) = k \frac{Q}{r} \Rightarrow r = k \frac{Q}{V_Q(r)} = \left(9,0 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{2,0 \times 10^{-12} \text{ C}}{3,0 \times 10^{-2} \text{ J/C}} = 0,60 \text{ m}$$

Επειδή η απόσταση r από το φορτίο Q είναι **σταθερή**, συμπεραίνουμε ότι όλα τα σημεία με ηλεκτροστατικό δυναμικό $3,0 \times 10^{-2} \text{ V}$ ορίζουν μία επιφάνεια **σφαίρας**, με κέντρο το σημειακό φορτίο Q και ακτίνα $R = 0,60 \text{ m}$.

Γενικά, για τιμή δυναμικού $V = c$ η ισοδυναμική επιφάνεια του δυναμικού ενός σημειακού φορτίου είναι **σφαίρα** με ακτίνα

$$V_Q(r) = c = k \frac{Q}{r} \Rightarrow r = k \frac{Q}{c}$$

Μερικές από τις ισοδυναμικές επιφάνειες ενός θετικού σημειακού φορτίου Q απεικονίζονται στο διπλανό σχήμα.



Μία ισοδυναμική επιφάνεια έχει τις εξής **ιδιότητες**:

(i) Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου q μεταξύ οποιωνδήποτε σημείων μίας ισοδυναμικής επιφάνειας, είναι ίσο με μηδέν.

Απόδειξη

Εάν τα σημεία A και B ανήκουν σε μία ισοδυναμική επιφάνεια, το έργο ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μεταφορά του φορτίου q από το A στο B είναι

$$W_{\eta\lambda}(A \rightarrow B) = q (V_A - V_B) = 0$$

- (ii) Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές του πεδίου τέμνουν **κάθετα** την ισοδυναμική επιφάνεια. Για παράδειγμα, οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές του πεδίου του σημειακού φορτίου Q (ακτίνες που ξεκινούν από το Q) είναι **κάθετες** στις ισοδυναμικές επιφάνειες του φορτίου (σφαίρες με κέντρο το Q). Αυτό προκύπτει από την ιδιότητα (i).

Απόδειξη

Εάν μετακινήσουμε ένα φορτίο q κατά μήκος μίας αυθαίρετης διαδρομής, που βρίσκεται πάνω στην ίδια ισοδυναμική επιφάνεια, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης θα είναι συνεχώς ίσο με μηδέν. Επομένως, η ηλεκτρική δύναμη πρέπει να είναι **συνεχώς κάθετη** στη διαδρομή. Επειδή η ένταση του πεδίου είναι παράλληλη με την ηλεκτρική δύναμη, συμπεραίνουμε ότι και η ένταση είναι κάθετη στη διαδρομή. Επειδή η διαδρομή είναι αυθαίρετη και ανήκει στην ισοδυναμική επιφάνεια, **η ένταση είναι αναγκαστικά κάθετη στην ισοδυναμική επιφάνεια**.

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Δύο σημειακά φορτία q και Q βρίσκονται σε απόσταση r μεταξύ τους. Με πολύ μικρή ταχύτητα μεταφέρουμε το φορτίο q σε άπειρη απόσταση, διατηρώντας το φορτίο Q ακίνητο. Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στο q :	
α	Είναι θετικό, εάν τα φορτία ομόσημα.	
β	Είναι ανεξάρτητο από το φορτίο q .	
γ	Διπλασιάζεται εάν διπλασιασθεί το Q .	
δ	Τετραπλασιάζεται, εάν η αρχική απόσταση μεταξύ των φορτίων ελαττωθεί σε $r/2$.	
ε	Εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθεί το φορτίο.	
2	Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός ζεύγους στατικών φορτίων q και Q .	
α	Είναι πάντοτε θετική.	
β	Μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους.	
γ	Τετραπλασιάζεται εάν διπλασιασθούν τα φορτία.	

3	Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ενός ζεύγους ετερόσημων φορτίων αυξάνεται, όταν τα φορτία απομακρύνονται μεταξύ τους.	
4	Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, που ασκείται σε σημειακό φορτίο q , κατά τη μετατόπισή του στο πεδίο δεύτερου στατικού σημειακού φορτίου Q ισούται με την αρνητική μεταβολή της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας του συστήματος των δύο φορτίων:	
α	Μόνο εάν τα φορτία είναι ετερόσημα.	
β	Μόνο εάν τα φορτία είναι ομόσημα.	
5	Το ηλεκτροστατικό δυναμικό:	
α	εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας.	
β	είναι διανυσματικό μέγεθος.	
6	Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι μονάδα μέτρησης ηλεκτρικού δυναμικού.	
7	Το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός απομονωμένου φορτίου είναι παντού ίσο με μηδέν.	
8	Το ηλεκτροστατικό δυναμικό, που δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο, είναι παντού αρνητικό.	
9	Στο εσωτερικό ενός διαλύματος με νερό και μαγειρικό άλας εισάγουμε δύο ηλεκτρόδια. Η άνοδος έχει μεγαλύτερο δυναμικό από την κάθοδο.	
α	Τα ιόντα νατρίου κινούνται προς την κάθοδο.	
β	Τα ιόντα χλωρίου κινούνται προς την άνοδο.	
10	Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι μηδενικό, κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου ανάμεσα σε δύο σημεία ίσου δυναμικού.	
11	Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη στα σημεία μίας ισοδυναμικής επιφάνειας.	



Ασκήσεις

Ηλεκτρική Δυναμική Ενέργεια

- Ένα σύστημα δύο σημειακών φορτίων έχει ηλεκτρική δυναμική ενέργεια $-0,18 \text{ J}$.
 - Τα φορτία είναι ομόσημα ή ετερόσημα;
 - Κρατούμε το ένα φορτίο ακίνητο και μεταφέρουμε με σταθερή ταχύτητα το δεύτερο φορτίο στο άπειρο, με χρήση μίας εξωτερικής δύναμης. Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης και της εξωτερικής δύναμης στο μεταφερόμενο φορτίο;
 - Εξαρτώνται τα έργα των δύο δυνάμεων από τη διαδρομή που ακολούθησε το φορτίο;
- Ο πυρήνας του ατόμου ηλίου περιέχει δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Υποθέτουμε ότι τα πρωτόνια είναι σημειακά, και απέχουν μεταξύ τους κατά μέση απόσταση $1,0 \times 10^{-15} \text{ m}$.
Να εκτιμήσετε την ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο πρωτονίων.
- Δύο γυάλινοι, ομοιόμορφα φορτισμένοι βόλοι έχουν φορτία $+9,0 \mu\text{C}$ και $+18,0 \mu\text{C}$ και βρίσκονται σε απόσταση $25,0 \text{ cm}$ μεταξύ τους. Κρατώντας τον έναν βόλο ακίνητο, μεταφέρουμε τον δεύτερο βόλο σε απόσταση $75,0 \text{ cm}$.
 - Πώς μεταβάλλεται η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος;
 - Ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στον κινούμενο βόλο;

Ηλεκτροστατικό Δυναμικό

- Να υπολογίσετε το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός σημειακού φορτίου $-4,0 \mu\text{C}$ σε απόσταση $2,0 \text{ cm}$ από το φορτίο.
- Το ηλεκτροστατικό δυναμικό ενός σημειακού φορτίου q σε απόσταση $10,0 \text{ m}$ από το φορτίο, είναι ίσο με $3,6 \text{ V}$. Να υπολογίσετε το φορτίο.
- Δύο ίσα θετικά σημειακά φορτία Q απέχουν κατά 2α . Θεωρήστε κάποιο σημείο A , το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό του ευθύγραμμου τμήματος με άκρα τα φορτία και απέχει κατά x από το ένα φορτίο.
 - Να βρείτε το συνολικό ηλεκτροστατικό δυναμικό στο A σαν συνάρτηση του x .
 - Να δείξετε ότι το ηλεκτροστατικό δυναμικό παίρνει τη μικρότερη τιμή για $x = \alpha$.

Διαφορά Δυναμικού

- Ένα σφαιρίδιο με φορτίο $-2,0 \text{ nC}$ μετατοπίζεται από ένα σημείο A σε ένα σημείο B . Εάν η διαφορά δυναμικού των σημείων A και B είναι $V_A - V_B = 3,5 \text{ V}$, ποιό είναι το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στο σφαιρίδιο; Πώς εξαρτάται αυτό το έργο από τη διαδρομή που ακολούθησε το σφαιρίδιο;

- 8 Ένας γυάλινος βόλος φέρει ηλεκτρικό φορτίο $+6,5 \text{ nC}$ και μετατοπίζεται από ένα σημείο **A** σε ένα σημείο **B**, μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Εάν το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στον βόλο είναι $2,6 \times 10^{-7} \text{ J}$, ποιά είναι η διαφορά δυναμικού $V_A - V_B$;

Έργο Ηλεκτρικής Δύναμης

- 9 Ένα σημειακό φορτίο $q = +0,5 \text{ nC}$ μετατοπίζεται ανάμεσα σε δύο σημεία A και B, που βρίσκονται σε αποστάσεις $15,0 \text{ cm}$ και $25,0 \text{ cm}$ από ένα δεύτερο σημειακό φορτίο $Q = +7,5 \text{ } \mu\text{C}$. Να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού $V_A - V_B$ λόγω του φορτίου Q στα σημεία A και B, και το έργο της ηλεκτρικής δύναμης, που δρα από το Q στο q .
- 10 Ένα ηλεκτρόνιο κινείται ανάμεσα στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και την άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) μίας λυχνίας καθοδικών ακτίνων. Το δυναμικό της ανόδου (V_a) είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό της καθόδου (V_c) κατά $25 \times 10^3 \text{ V}$.
- (α) Να υπολογίσετε το έργο της ηλεκτρικής δύναμης στο ηλεκτρόνιο κατά την κίνηση από την κάθοδο στην άνοδο. Είναι θετικό ή αρνητικό; Να δικαιολογήσετε το πρόσημό του.
- (β) Έστω ότι το ηλεκτρόνιο ξεκινά με μηδενική ταχύτητα από την κάθοδο, και το έργο της ηλεκτρικής δύναμης μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου. Να υπολογίσετε την ταχύτητα του ηλεκτρονίου στην άνοδο.
- 11 Δύο σημεία της ατμόσφαιρας A και B έχουν διαφορά δυναμικού $V_B - V_A = 1500,0 \text{ V}$.
- (α) Ένας κόκκος σκόνης αιωρείται στην ατμόσφαιρα και φέρει φορτίο $q = -0,5 \text{ nC}$. Να υπολογίσετε το έργο της ηλεκτρικής δύναμης κατά τη μετατόπιση του κόκκου από το A στο B.
- (β) Με την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης, ο κόκκος τείνει να κινηθεί από το A στο B, ή από το B στο A; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.
- 12 Κατά τη διάρκεια μίας καταιγίδας με κεραυνούς, το κάτω μέρος των νεφών είναι ισχυρά αρνητικά φορτισμένο.

Επειδή η Γη είναι αγωγός, στην επιφάνεια της Γης κάτω από τα νέφη επάγεται θετικό φορτίο. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο κάτω μέρος των νεφών και την επιφάνεια της Γης μπορεί να πάρει τέρασσιες τιμές, της τάξης $V_{\Gamma\eta} - V_{\text{νέφος}} = 1 \times 10^8 \text{ V}$.

Να υπολογίσετε το συνολικό έργο της ηλεκτρικής δύναμης σε φορτίο $-0,5 \text{ C}$, που ρέει από το σύννεφο προς τη Γη μέσω ενός κεραυνού.



Το πείραμα του Rutherford

- 13 Στο πείραμα που οδήγησε στην ανακάλυψη του πυρήνα του ατόμου, οι μαθητές του Rutherford, Geiger και Marsden, βομβάρδισαν φύλλα χρυσού με σωματίδια α , και παρατήρησαν ότι κάποια σωματίδια γυρνούσαν πίσω.

Έστω ότι ένα σωματίδιο α , μάζας $6,64 \times 10^{-27}$ kg και φορτίου $+2e$, κινείται προς την κατεύθυνση ενός ατόμου χρυσού ($Z=79$). Θεωρείστε ότι ο πυρήνας χρυσού παραμένει ακίνητος, επειδή είναι μέρος του μεταλλικού πλέγματος του φύλλου χρυσού.

Όταν το σωματίδιο α είναι πολύ μακριά, κινείται με ταχύτητα μέτρου $2,0 \times 10^7$ m/s. Θεωρούμε ότι στην ελάχιστη απόσταση από τον πυρήνα χρυσού, η αρχική κινητική ενέργεια του σωματιδίου α έχει μετατραπεί εξ' ολοκλήρου σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος «πυρήνα χρυσού - σωματιδίου α ».

- (α) Ποιά είναι η πιο κοντινή απόσταση, στην οποία πλησιάζει το σωματίδιο α τον πυρήνα του ατόμου χρυσού;
- (β) Πώς συγκρίνεται η απόσταση που υπολογίσατε με την ακτίνα του ατόμου του χρυσού ($1,7 \times 10^{-10}$ m);

Υπόδειξη

Να υποθέσετε ότι το σωματίδιο α αλληλεπιδρά μόνο με το θετικό φορτίο του πυρήνα και όχι με τα ηλεκτρόνια του ατόμου του χρυσού.



Απαντήσεις Ελέγχου Κατανόησης Εννοιών

7.2.1. (α) 0, (β) $+e$

7.2.2. 24.

7.2.3. 10.

7.2.4. 10.

7.3.1. Περίσσεια, $2,0 \times 10^7$ ηλεκτρόνια.

7.3.2. $+4,8 \times 10^{-10}$ C. Όχι.

7.4.1. Όλα τα μόρια του ραβδιού είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, ή το ραβδί έχει τον ίδιο αριθμό θετικά και αρνητικά φορτισμένων μορίων.

7.4.2. Στα μονωτικά υλικά μπορεί να παρατηρηθεί μικρή ροή φορέων φορτίου. Τα υλικά μετατρέπονται σε αγωγούς, εάν εφαρμοσθούν στα άτομα/μόριά τους πολύ ισχυρές ηλεκτρικές δυνάμεις.

7.4.3. Το αγώγιμο υλικό διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό φορέων φορτίου που κινούνται ελεύθερα (π.χ. ηλεκτρόνια, φορτισμένα άτομα, φορτισμένα μόρια).

7.5.1. Τα ρούχα ηλεκτρίζονται λόγω τριβής μεταξύ τους.

7.5.2. (α) Η νάυλον σακκούλα φορτίζεται θετικά και το κεχριμπάρι αρνητικά.

(β) Η νάυλον σακκούλα φορτίζεται αρνητικά και ο γυάλινος βόλος θετικά.

7.6.1. $+3$ nC.

7.6.2. $+2$ nC.

7.7.1. Το γυάλινο ραβδί έλκει ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η σφαίρα Α φορτίζεται αρνητικά και η σφαίρα Β θετικά.

7.8.1. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ραβδιού μετακινούνται προς τη σφαίρα. Η άκρη του ραβδιού κοντά στη σφαίρα φορτίζεται αρνητικά, και η μακρινή άκρη θετικά.

7.9.1. Αγγίζουμε με τη ράβδο το σφαιρίδιο του ηλεκτροσκοπίου, οπότε ηλεκτρόνια από τη ράβδο μεταφέρονται στο ηλεκτροσκόπιο.

7.9.2. Όταν το θετικά φορτισμένο ραβδί ακουμπά το στέλεχος, ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το στέλεχος στο ραβδί και το στέλεχος φορτίζεται θετικά. Όταν απομακρύνουμε το ραβδί, το έλλειμμα ηλεκτρονίων (θετικό φορτίο) του στελέχους διατηρείται, και τα ελάσματα συνεχίζουν να απωθούνται. Η απόσταση μεταξύ των ελασμάτων ελαττώνεται κάπως όταν απομακρύνεται το ραβδί, διότι το έλλειμμα ελεύθερων ηλεκτρονίων διαμοιράζεται πιο ομοιόμορφα στο στέλεχος.

7.9.3. Όχι.

7.9.4. Όχι.

7.10.1. (α) Λάθος, (β) Σωστό, (γ) Σωστό, (δ) Λάθος.

7.10.2. (α) Τετραπλασιάζεται, (β) Υποτετραπλασιάζεται, (γ) Διπλασιάζεται.

7.10.3. Σωστό είναι το (γ).

7.10.4. Οι δυνάμεις έχουν ίσα μέτρα (δράση – αντίδραση).

7.10.5. (α) Λάθος, (β) Σωστό.

7.10.6. Το (γ), από τον 3ο νόμο του Νεύτωνα.

7.10.7. Οι δυνάμεις που δέχεται το q είναι αντίθετες μεταξύ τους. Άρα, οι δυνάμεις που ασκεί το q στα q_1 και q_2 είναι αντίθετες μεταξύ τους.

7.11.1. Όχι, το σφαιρίδιο θα μπορούσε να έλκεται επειδή πολώνεται από τη σφαίρα.

7.11.2. Τα κομματάκια από άχυρο πολώνονται από το κεκριμπάρι.

7.11.3. Από τον 3ο νόμο του Νεύτωνα, τα κομματάκια άχυρου έλκουν τον λίθο κεκριμπαριού με δύναμη ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης.

7.12.2. Θα διατηρήσουν το μέτρο τους, αλλά θα αποκτήσουν αντίθετη κατεύθυνση.

- 7.12.3. Το σωματίδιο α δέχεται δύναμη διπλάσιου μέτρου, επειδή έχει διπλάσιο φορτίο από το πρωτόνιο.
- 7.12.4. (i) $12,0 \times 10^{-2} \text{ N}$, ίδια κατεύθυνση. (ii) $2,4 \times 10^{-2} \text{ N}$, αντίθετη κατεύθυνση.
- 7.12.5. Ομόρροπο με την Ένταση.
- 7.12.6. Αντίρροπο με την Ένταση.
- 7.12.7. (α) $4|\vec{E}|$, (β) $2r$, (γ) $r/2$, (δ) $3|\vec{E}|$.
-

7.14.1. Τα μόρια του τοίχου είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και πολώνονται από τα μόρια του μπαλονιού. Ένα θετικά φορτισμένο μόριο του μπαλονιού έλκει το αρνητικό κέντρο φορτίου και απωθεί το θετικό κέντρο φορτίου των πολωμένων μορίων του τοίχου. Η συνισταμένη (ελκτική) δύναμη είναι μικρή, και γίνεται αντιληπτή σε μικρή απόσταση.

- 7.15.1. $9,81 \text{ m/s}^2$.
- 7.15.2. $2 \times R_T$
- 7.15.3. Θα διπλασιάζονταν.
- 7.15.4. Όχι.
- 7.15.5. Όχι, υπάρχει μη μηδενικό πεδίο βαρύτητας. Η φαινόμενη έλλειψη βαρύτητας στον ΔΔΣ συζητήθηκε στο Κεφάλαιο του Νόμου Παγκόσμιας Έλξης.
- 7.15.6. Το φαινόμενο της παλίρροιας.
-

- 7.17.1. (α) $+0,30 \text{ J}$ (ηλεκτρική δύναμη) και $-0,30 \text{ J}$ (εξωτερική δύναμη).
(β) $-0,45 \text{ J}$ (ηλεκτρική δύναμη) και $+0,45 \text{ J}$ (εξωτερική δύναμη).
-

- 7.18.1. $2,0 \times 10^{-3} \text{ J}$ και στις τρεις περιπτώσεις.
-

- 7.19.1. 0 J .
- 7.19.2. Το ίδιο με πριν (ανεξάρτητο της διαδρομής).
- 7.19.3. $+2,0 \times 10^{-2} \text{ J}$.

7.20.1. (α) Θετικό, (β) Διπλασιάζεται, (γ) $+8,0 \times 10^{-6}$ J.

7.22.1. (α) 25×10^{-9} J, (β) Διπλασιάζεται, (γ) Γίνεται αντίθετο, (δ) -25×10^{-9} J.

7.23.1. 15 V/m, με κατεύθυνση προς το σημείο χαμηλότερου δυναμικού (το Β).

7.23.2. 0,5 V. Όχι, για να καθορίσουμε ποιό σημείο έχει υψηλότερο δυναμικό, χρειάζεται να γνωρίζουμε τη φορά της έντασης.



ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Στο Κεφάλαιο 8:

- **Εξηγούμε** ότι η ροή ηλεκτρικού ρεύματος συνδέεται με τρεις διαφορετικές ταχύτητες (ταχύτητα διάδοσης ηλεκτρικού πεδίου, ταχύτητα κίνησης ηλεκτρονίων, ταχύτητα ολίσθησης).
- **Συζητούμε** τις αναγκαίες συνθήκες για να διαρρέεται ένας αγωγός από ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρικό πεδίο, διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού).
- **Ορίζουμε** την ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.
- **Εξηγούμε** ότι σε διάφορα υλικά, που ονομάζονται ωμικά, η ένταση ρεύματος είναι ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού, και διατυπώνουμε τον νόμο του Ohm.
- **Ορίζουμε** την αντίσταση ενός υλικού.
- **Περιγράφουμε** την εξάρτηση της αντίστασης ενός μεταλλικού αγωγού από το μήκος και τη διατομή του.
- **Ορίζουμε** την ειδική αντίσταση ενός υλικού.
- **Συζητούμε** τον ρόλο της ηλεκτρικής πηγής.
- **Παρουσιάζουμε** τον συμβολισμό ενός απλού κυκλώματος.
- **Εξηγούμε** τη λειτουργία του ροοστάτη και του διαιρέτη τάσης (ποτενσιόμετρου).





ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

- **Περιγράφουμε** τη συνδεσμολογία αντιστατών σε σειρά, παράλληλα, ή με συνδυασμό των δύο τρόπων, και υπολογίζουμε την αντίστοιχη ισοδύναμη αντίσταση.
- **Συζητούμε** εφαρμογές της συνδεσμολογίας αντιστατών (το αμπερόμετρο, το βολτόμετρο, το βραχυκύκλωμα και τις ασφάλειες ρεύματος).
- **Ορίζουμε** την γενική έκφραση για την ηλεκτρική ισχύ που παρέχεται σε μία συσκευή.
- **Συζητούμε** την μετατροπή ηλεκτρικής ισχύος σε άλλες μορφές ενέργειας σε έναν αντιστάτη, και εξάγουμε αντίστοιχες εκφράσεις.
- **Εισάγουμε** την έννοια της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης πηγής (ΗΕΔ).
- **Διαφοροποιούμε** ανάμεσα στην ΗΕΔ πηγής και τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων της πηγής.
- **Συζητούμε** τις μεταβολές ενέργειας σε ιδανικές και μη-ιδανικές πηγές, που διαρρέονται από ρεύμα.
- **Εξάγουμε** μία σχέση ανάμεσα στην ΗΕΔ και τη διαφορά δυναμικού μίας πηγής που διαρρέεται από ρεύμα.
- **Ορίζουμε την** εσωτερική αντίσταση πηγής.
- **Διατυπώνουμε** τους κανόνες του Kirchhoff και εξηγούμε πώς εφαρμόζονται στη μελέτη κυκλωμάτων.



Στο προηγούμενο Κεφάλαιο μελετήσαμε τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων και τις φυσικές έννοιες της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας και του ηλεκτρικού δυναμικού. Εξηγήσαμε ότι οι αγωγοί ευνοούν την κίνηση ελεύθερων φορέων φορτίου στο εσωτερικό τους, σε αντίθεση με τους μονωτές.

Στο **Κεφάλαιο 8** μελετούμε το ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή την προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικού φορτίου σε αγωγούς. Η λειτουργία των διαφόρων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών βασίζεται στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τηλεπικοινωνίες βασίζονται στη ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε αγωγούς.

Εικόνα 8-1

(α) Ηλεκτρική ενέργεια μεταδίδεται σε μεγάλες αποστάσεις με κατάλληλες γραμμές μεταφοράς.

(β) Ο ηλιακός άνεμος (δέσμες φορτισμένων σωματιδίων, που εκπέμπονται συνεχώς από τον Ήλιο) προκαλεί φαινόμενα όπως το βόρειο και το νότιο σέλας.

(γ) Ένας υπολογιστής χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά κυκλώματα.

(δ) Τα νευρικά κύτταρα στον ανθρώπινο εγκέφαλο δημιουργούν ένα πολύπλοκο δίκτυο, μέσα στο οποίο διαδίδονται ηλεκτρικά σήματα. (Πηγή: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DTI-sagittalfibers.jpg>).

(α)



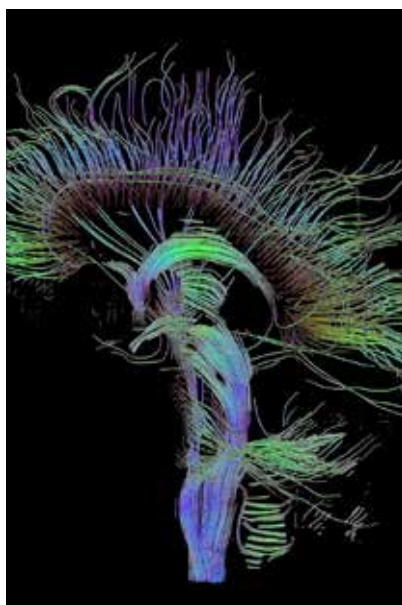
(β)



(γ)



(δ)

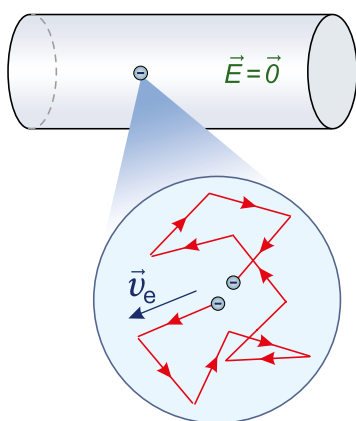


8.1. Το Ηλεκτρικό Πεδίο δημιουργεί προσανατολισμένη Ροή Φορέων Φορτίου σε έναν Αγωγό

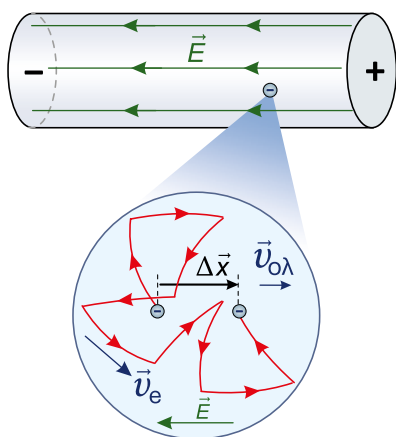
Εικόνα 8-2

Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου στο εσωτερικό ενός αγωγού. Η ταχύτητα \vec{v}_e του ηλεκτρονίου αλλάζει συχνά διεύθυνση. **(α)** Εάν το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται στο εσωτερικό του αγωγού, η **μέση θέση** του ηλεκτρονίου παραμένει σταθερή. **(β)** Υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου έντασης \vec{E} , η μέση θέση του ηλεκτρονίου μετατοπίζεται αντίθετα προς το πεδίο, με ταχύτητα ολίσθησης $\vec{v}_{ολ}$.

(α)



(β)



Όπως εξηγήσαμε στο **Κεφάλαιο 7**, υλικά όπως τα διάφορα μέταλλα, τα διαλύματα νερού και ιόντων και τα ιονισμένα αέρια, ευνοούν την κίνηση ελεύθερων φορέων φορτίου στο εσωτερικό τους και ονομάζονται αγωγοί. Σε έναν αγωγό, οι ελεύθεροι φορείς φορτίου κινούνται συνεχώς προς όλες τις κατευθύνσεις.

Σε έναν μεταλλικό αγωγό, οι φορείς φορτίου είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα μεταλλικά ιόντα δονούνται γύρω από συγκεκριμένες θέσεις, που καθορίζονται από τη δομή του αγωγού (το μεταλλικό πλέγμα). Η **Εικόνα 8-2** απεικονίζει σχηματικά την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε έναν μεταλλικό αγωγό. Η τεθλασμένη γραμμή του σχήματος **8-2(α)** απεικονίζει την τροχιά ενός ηλεκτρονίου, για την περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο στον αγωγό είναι μηδενικό. Το ηλεκτρόνιο κινείται με ταχύτητα \vec{v}_e , της τάξης των 10^6 m/s. Η κατεύθυνση της ταχύτητας \vec{v}_e του ηλεκτρονίου μεταβάλλεται συνεχώς, καθώς το ηλεκτρόνιο συγκρούεται με τα ιόντα του μετάλλου, αλλά η **μέση θέση του ηλεκτρονίου παραμένει αμετάβλητη**. Συμπεραίνουμε ότι εάν το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται στο εσωτερικό του αγωγού, η κίνηση των φορέων φορτίου **δεν** είναι προσανατολισμένη. **Για να διαρρέεται από ρεύμα ένας αγωγός, πρέπει να υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του.**

Η Έννοια της Ταχύτητας Ολίσθησης

Η **Εικόνα 8-2(β)** απεικονίζει σχηματικά την κίνηση ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου σε έναν αγωγό, εάν το ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} στο εσωτερικό του αγωγού δεν είναι μηδενικό.

Σε σύγκριση με την **Εικόνα 8-2(α)**, στο ηλεκτρόνιο δρα η επιπρόσθετη δύναμη $\vec{F} = -e\vec{E}$. Εξαιτίας αυτής της δύναμης, η μέση θέση του ηλεκτρονίου μετατοπίζεται προς τη φορά της δύναμης (αντίθετα από τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου, όπως στο σχήμα **8-2(β)**). Η **μετατόπιση της μέσης θέσης του ηλεκτρονίου ανά μονάδα χρόνου** αντιστοιχεί στην **ταχύτητα ολίσθησης** $\vec{v}_{ολ}$. Συνεπώς, η ταχύτητα ολίσθησης δεν ταυτίζεται με την πραγματική ταχύτητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, αλλά με την ταχύτητα μετατόπισης της μέσης θέσης τους.

Η ταχύτητα ολίσθησης είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα \vec{v}_e των ηλεκτρονίων, με τυπικές τιμές 0,001–0,01 mm/s. Η τιμή της εξαρτάται από παράγοντες όπως το υλικό του αγωγού, η θερμοκρασία, και η ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό.

Η Έννοια της Ταχύτητας Διάδοσης του Ηλεκτρικού Πεδίου

Όταν κλείνουμε τον διακόπτη σε ένα κύκλωμα, παρατηρούμε ότι το κύκλωμα αρχίζει να διαρρέεται από ρεύμα **ακαριαία**, παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα ολίσθησης των ηλεκτρονίων είναι μικρή. **Γιατί συμβαίνει αυτό;**

Πριν κλείσει ο διακόπτης, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του κυκλώματος είναι ίσο με μηδέν. Όταν κλείσει ο διακόπτης, το πεδίο που δημιουργεί η πηγή διαδίδεται μέσα στον αγωγό με ταχύτητα περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε όλο το μήκος του κυκλώματος αρχίζουν να κινούνται προσανατολισμένα, υπό την επίδραση αυτού του πεδίου.

Άρα, σε ένα κύκλωμα που διαρρέεται από ρεύμα, διακρίνουμε **τρεις** χαρακτηριστικές ταχύτητες διάδοσης:

- Την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου, τάξης μεγέθους 3×10^8 m/s (ταχύτητα του φωτός).
- Τη μέση ταχύτητα κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, της τάξης 10^6 m/s.
- Τη μέση ταχύτητα ολίσθησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, της τάξης 10^{-2} mm/s.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.1.1.** Γιατί οι φορείς φορτίου σε ένα μεταλλικό καλώδιο είναι τα ηλεκτρόνια και όχι τα θετικά μεταλλικά ιόντα;
- 8.1.2.** Να περιγράψετε την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσα σε ένα μέταλλο, όταν στο εσωτερικό του μετάλλου:
 - (α)** Δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.
 - (β)** Υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.
- 8.1.3.** Πώς εξηγείται το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα αρχίζει να ρέει σ' ένα αγωγό σχεδόν ακαριαία, ενώ η ταχύτητα ροής των ελεύθερων ηλεκτρονίων του αγωγού είναι σχετικά μικρή;
- 8.1.4.** Αφού τα ηλεκτρόνια σε ένα κύκλωμα κινούνται με πολύ μικρή ταχύτητα, γιατί μια λάμπα φωτοβολεί πρακτικά αμέσως μόλις γυρίσουμε τον διακόπτη;

8.2. Ένας Αγωγός διαρρέεται από Ρεύμα, εάν και μόνο εάν το Ηλεκτρικό Δυναμικό δεν είναι σταθερό σε όλα τα σημεία του

Εάν το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό ενός αγωγού είναι μηδενικό, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης σε έναν φορέα φορτίου q , κατά την κίνησή του μεταξύ δύο σημείων **A** και **B** του αγωγού, είναι ίσο με μηδέν.

Από τη σχέση έργου ηλεκτρικής δύναμης - διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού, συμπεραίνουμε ότι τα σημεία A και B έχουν το ίδιο δυναμικό:

$$W_{\eta\lambda} = q (V_A - V_B) = 0 \Rightarrow V_A = V_B$$

Η ισότητα αυτή ισχύει γενικά σε όλα τα σημεία του αγωγού:

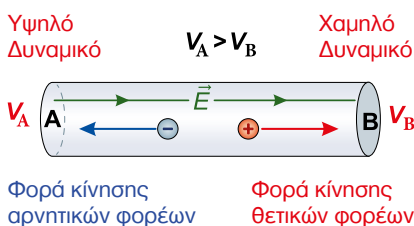
- Ένας αγωγός, που δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, έχει σταθερό ηλεκτρικό δυναμικό σε όλη του την έκταση.

Το προηγούμενο συμπέρασμα ισχύει και **αντίστροφα**: Έστω ότι το ηλεκτρικό δυναμικό έχει διαφορετική τιμή σε δύο σημεία **A** και **B** του αγωγού. Κατά τη μετακίνηση ενός ελεύθερου φορέα φορτίου από το **A** στο **B**, πρέπει να δρα στον φορέα μία ηλεκτρική δύναμη $\vec{F}_{\eta\lambda}$, που παράγει ή καταναλώνει μη μηδενικό έργο:

$$V_A \neq V_B \Rightarrow q (V_A - V_B) \neq 0 \Rightarrow W_{\eta\lambda} \neq 0 \Rightarrow \vec{F}_{\eta\lambda} \neq 0$$

Η δύναμη $\vec{F}_{\eta\lambda}$ προκαλεί προσανατολισμένη ροή φορτίου μεταξύ των **A** και **B**. Άρα:

- Εάν το ηλεκτρικό δυναμικό στο εσωτερικό ενός αγωγού δεν είναι σταθερό, ο αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.



Υπό την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης, ένας φορέας φορτίου κινείται προς την κατεύθυνση που το ηλεκτρικό έργο είναι **θετικό**.

Για παράδειγμα, έστω ότι το δυναμικό ελαττώνεται από το **A** προς το **B**: $V_A > V_B$. Οι θετικοί φορείς κινούνται από το **A** προς το **B**, και οι αρνητικοί φορείς από το **B** προς το **A**.

- Εάν η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός αγωγού είναι μη μηδενική, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ αυτών των σημείων.
- Οι **αρνητικοί** φορείς φορτίου κινούνται μέσα στον αγωγό **από το σημείο με το χαμηλότερο προς το σημείο με το υψηλότερο δυναμικό**.

- Οι **θετικοί** φορείς φορτίου κινούνται μέσα στον αγωγό **από το σημείο με το υψηλότερο προς το σημείο με το χαμηλότερο δυναμικό.**

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.2.1.** Ποιά είναι η απαραίτητη προϋπόθεση, για να διαρρέεται ένας αγωγός από ηλεκτρικό ρεύμα;
- 8.2.2.** Σε έναν μεταλλικό αγωγό υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται:
- (α) Από υψηλό σε χαμηλό ηλεκτρικό δυναμικό.
 (β) Από χαμηλό σε υψηλό ηλεκτρικό δυναμικό.
- 8.2.3.** Σε ένα διάλυμα νερού-χλωριούχου νατρίου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Μεταξύ δύο σημείων **A** και **B** υπάρχει διαφορά δυναμικού, $V_A > V_B$.
- (α) Τα ιόντα νατρίου (Na^+) κινούνται από το A προς το B ή αντιστρόφως;
 (β) Τα ιόντα χλωρίου (Cl^-) κινούνται από το A προς το B ή αντιστρόφως;

8.3. Η Ένταση Ηλεκτρικού Ρεύματος

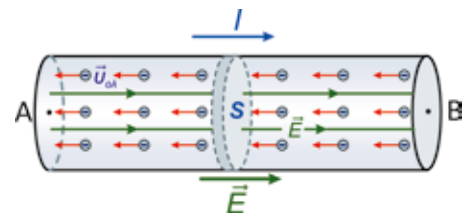
Για να περιγράψουμε την ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου, που ρέει σε έναν αγωγό, χρησιμοποιούμε το φυσικό μέγεθος της **έντασης ηλεκτρικού ρεύματος**.

Στην **Εικόνα 8-3** απεικονίζεται ένας λεπτός κυλινδρικός μεταλλικός αγωγός, με μήκος L και βάση (**εγκάρσια διατομή**) σταθερού εμβαδού S .

Έστω ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} δεν είναι μηδενική στο εσωτερικό του αγωγού, και έχει κατεύθυνση από το σημείο **A** προς το σημείο **B**. Στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού δρουν ηλεκτρικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν προσανατολισμένη ροή ηλεκτρονίων από το B στο A.

Εικόνα 8-3

Σε έναν αγωγό, ένα ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} προκαλεί προσανατολισμένη ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων αντίθετα στο πεδίο.



Ορίζουμε ως **Ένταση I** του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει έναν αγωγό, το συνολικό, κατ'απόλυτη τιμή, φορτίο που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου από μία διατομή του αγωγού:

$$I = \frac{|\Delta q|}{\Delta t}$$



Η μονάδα έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος στο διεθνές σύστημα SI ονομάζεται **Ampère (A)**, από τον Γάλλο φυσικό Andre Marie Ampère (1775-1836). Από τον ορισμό της έντασης προκύπτει ότι $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$.

Σε έναν μεταλλικό αγωγό, τα θετικά μεταλλικά ιόντα δεν μετακινούνται ελεύθερα στην έκταση του αγωγού, αλλά δονούνται γύρω από συγκεκριμένες θέσεις. Εάν τα μεταλλικά ιόντα, στο σύρμα της **Εικόνας 8-3**, ήταν ελεύθερα να κινηθούν υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} θα δημιουργούσαν ρεύμα της ίδιας έντασης I , με φορά από το A προς το B. Η φορά κίνησης των θετικών φορέων ονομάζεται **συμβατική**, και υποδεικνύεται στην **Εικόνα 8-3** με ένα βέλος. Για **ιστορικούς λόγους**, θα θεωρούμε ότι το ρεύμα σε έναν αγωγό αντιστοιχεί σε κίνηση θετικών φορέων φορτίου, και θα σχεδιάζουμε τη συμβατική φορά του ρεύματος. Τονίζουμε ότι το βέλος της **Εικόνας 8-3** **δεν** αντιστοιχεί σε διάνυσμα. Η ένταση ρεύματος είναι **μονόμετρο μέγεθος**.

Πίνακας 8-1

Παραδείγματα τιμών της έντασης ρεύματος.

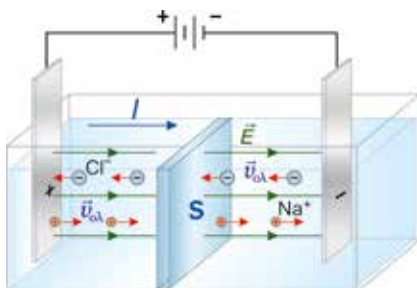
Ηλεκτρικό Ρεύμα	Ένταση
Διάλυοι ιόντων στις κυτταρικές μεμβράνες	1-15 pA
Τρανζίστορ	1 mA
Λαμπτήρας φαναριού	200 mA
Λαμπτήρας φωτισμού	0,5 A
Ηλεκτρική κουζίνα	10 A
Εκκινητής φορτηγού	180 A
Κεραυνός	20 kA
Ηλίσφαιρα	3 GA

Στον Πίνακα **8-1** αναγράφονται τυπικές τιμές έντασης ρεύματος.

- Η μετακίνηση ιόντων μέσα και έξω από το κύτταρο αντιστοιχεί σε ρεύμα τάξης pA ($= 10^{-12} \text{ A}$).
- Οι τηλεοράσεις και τα ραδιόφωνα διαρρέονται από ρεύματα τάξης mA (ή μικρότερα), και οι οικιακές συσκευές από ρεύματα τάξης A.
- Ο ηλιακός άνεμος αντιστοιχεί σε ροή φορτισμένων σωματιδίων, έντασης GA ($= 10^9 \text{ A}$).

Σημείωση

Όταν σε έναν αγωγό συνυπάρχουν θετικοί και αρνητικοί φορείς φορτίου, υπολογίζουμε τη συνολική ένταση του ρεύματος με τον εξής τρόπο:



- Μετρούμε το συνολικό φορτίο θετικών φορέων, που διέρχεται από μία διατομή του αγωγού ανά μονάδα χρόνου: $\Delta Q_1 / \Delta t$.
- Μετρούμε το κατ' απόλυτη τιμή συνολικό φορτίο των αρνητικών φορέων, που διέρχεται από την ίδια διατομή ανά μονάδα χρόνου: $|\Delta Q_2| / \Delta t$.

- Η συνολική ένταση ρεύματος είναι ίση με το **άθροισμα** των δύο ροών φορτίου $I_{ολ} = \Delta Q_1/\Delta t + |\Delta Q_2|/\Delta t$.
- Η **συμβατική φορά** της συνολικής έντασης ταυτίζεται με τη φορά κίνησης των θετικών φορέων.

Παράδειγμα

A. Κατά την εκκίνηση της μηχανής ενός φορτηγού, στο κύκλωμα του εκκινήτη ρέει συνολικό φορτίο 720 C σε χρονικό διάστημα 4,00 s. Να υπολογίσετε τη μέση ένταση του ρεύματος.

Από τον ορισμό της έντασης ρεύματος, προκύπτει:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{720 \text{ C}}{4,00 \text{ s}} = 180 \text{ A}$$

B. Η ένταση ρεύματος στο κύκλωμα μίας υπολογιστικής μηχανής είναι 0,300 mA. Να υπολογίσετε το χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο διέρχεται συνολικό ηλεκτρικό φορτίο 1,00 C από μία διατομή του κυκλώματος.

Από την εξίσωση της έντασης ρεύματος:

$$\Delta t = \frac{\Delta Q}{I} = \frac{1,00 \text{ C}}{0,300 \times 10^{-3} \text{ C/s}} = 3,33 \times 10^3 \text{ s} = 55,6 \text{ min}$$

Η υπολογιστική απαιτεί πολύ μικρή ένταση ρεύματος για να λειτουργήσει, σε σχέση με τη μηχανή του φορτηγού.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.3.1.** Από τη διατομή ενός χάλκινου σύρματος διέρχονται $1,8 \times 10^{21}$ ηλεκτρόνια ανά λεπτό. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το σύρμα.
- 8.3.2.** Σε μία κυλινδρική λυχνία κενού οι φορείς φορτίου είναι ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα αργού (με φορτίο $+e$). Εάν από μία εγκάρσια διατομή της λυχνίας διέρχονται $3,2 \times 10^{19}$ ηλεκτρόνια και $3,2 \times 10^{19}$ κατιόντα αργού ανά δευτερόλεπτο, να υπολογίσετε την ένταση ρεύματος, που διαρρέει τη λυχνία.

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **απολογηθείτε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται η διαρκής, τυχαία κίνηση των ελεύθερων φορέων φορτίου σε έναν αγωγό.	
2	Για να διαρρέεται ένας αγωγός από ρεύμα, πρέπει το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του να μην μηδενίζεται.	
3	Όταν όλα τα σημεία ενός αγωγού έχουν το ίδιο ηλεκτρικό δυναμικό, ο αγωγός δεν διαρρέεται από ρεύμα.	
4	Το ηλεκτρικό πεδίο διαδίδεται σε έναν αγωγό με την ταχύτητα ολίσθησης.	
5	Όταν κλείσουμε τον διακόπτη ενός κυκλώματος, το φως ενός συνδεδεμένου λαμπτήρα ανάβει ακαριαία, επειδή τα ηλεκτρόνια κινούνται με μεγάλη ταχύτητα μέσα στο κύκλωμα.	
6	Σε οποιονδήποτε αγωγό, οι ελεύθεροι φορείς φορτίου είναι πάντα αρνητικά φορτισμένοι.	
7	Οι ελεύθεροι φορείς φορτίου στους αγωγούς αντιστοιχούν πάντοτε σε ηλεκτρόνια.	
8	Σε έναν μεταλλικό αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, τα ηλεκτρόνια κινούνται από υψηλό προς χαμηλό ηλεκτρικό δυναμικό.	
9	Η συμβατική φορά του ρεύματος είναι η φορά κίνησης των θετικών φορέων φορτίου.	
10	Η ένταση ρεύματος είναι διανυσματικό μέγεθος.	

Ασκήσεις

- ❶ (α) Το καλώδιο ενός CD player διαρρέεται από ρεύμα έντασης 5,00 mA. Να υπολογίσετε σε πόσο χρονικό διάστημα διέρχεται από μία διατομή αυτού του καλωδίου φορτίο 2,00 C.
- (β) Εάν η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει ένα καλώδιο είναι 80,00 mA να υπολογίσετε σε πόσο χρονικό διάστημα διέρχονται από μία διατομή αυτού του καλωδίου $3,00 \times 10^{20}$ ηλεκτρόνια.

- 2 Από την εγκάρσια διατομή ενός σύρματος χρωμονικελίνης, σταθερής διατομής, διέρχεται συνολικό φορτίο 9,00 mC σε χρονικό διάστημα 3,5 s. Να υπολογίσετε:
- (α) Την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το σύρμα.
- (β) Τον αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων, που διέρχονται από μία εγκάρσια διατομή του σύρματος σε χρονικό διάστημα 10,0 s.

8.4. Σχέση Έντασης Ρεύματος - Διαφοράς Δυναμικού: ο Νόμος του Ohm

Σε υλικά όπως τα μέταλλα, για ένα εύρος θερμοκρασιών, η ταχύτητα ολίσθησης των φορέων φορτίου είναι γενικά ανάλογη με την ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού πεδίου. Όταν ισχύει αυτή η αναλογία, η ένταση του ρεύματος και η διαφορά δυναμικού συνδέονται με μία γραμμική σχέση, η οποία είναι γνωστή ως **νόμος του Ohm**.

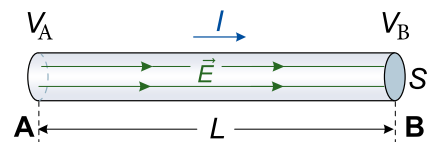
Η Εικόνα 8-4 απεικονίζει ένα κυλινδρικό μεταλλικό σύρμα, με μήκος L και σταθερή διατομή εμβαδού S . Εάν τα άκρα A και B του σύρματος έχουν διαφορά δυναμικού $\Delta V = V_A - V_B$, το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης I .

Εάν **διπλασιάσουμε** τη διαφορά δυναμικού ΔV , το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα διπλάσιας έντασης ($2I$).

Κάνοντας μετρήσεις για διάφορες τιμές της διαφοράς δυναμικού, διαπιστώνουμε πειραματικά ότι η ένταση του ρεύματος είναι **ανάλογη** με τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα άκρα του σύρματος. Η αναλογία αυτή εκφράζεται από την επόμενη εξίσωση, γνωστή ως «**νόμος του Ohm**», από τον Γερμανό φυσικό Georg Simon Ohm (1789-1854).

Εικόνα 8-4

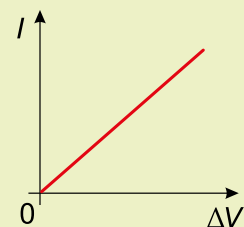
Σε έναν **ωμικό** αγωγό, η ένταση ρεύματος I είναι ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού $\Delta V = V_A - V_B$ στα άκρα του αγωγού.



Νόμος του Ohm

Η ένταση I του ρεύματος, που διαρρέει έναν μεταλλικό αγωγό, είναι γραμμικά ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού:

$$I \propto \Delta V$$



Οι αγωγοί που περιγράφονται από τον νόμο του Ohm ονομάζονται **ωμικοί**. Οι μεταλλικοί αγωγοί συμπεριφέρονται συνήθως ως ωμικοί.

Σε έναν ωμικό αγωγό:

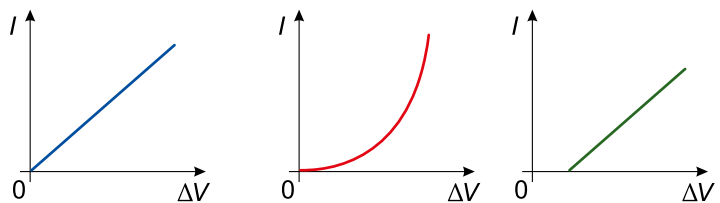
- Η γραφική παράσταση έντασης ρεύματος - διαφοράς δυναμικού διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Άρα, μηδενική διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού προκαλεί μηδενική ένταση ρεύματος: $\Delta V = 0 \Rightarrow I = 0$.
- Η ένταση του ρεύματος δεν εξαρτάται από το πρόσημο της διαφοράς δυναμικού: Εάν εφαρμοσθεί αντίθετη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού, προκαλείται ρεύμα ίσης έντασης και αντίθετης φοράς.

Πολλά υλικά και διατάξεις, όπως οι λυχνίες κενού, οι δίοδοι και τα τρανζίστορς, δεν ικανοποιούν αυτή την αναλογία. Ένας αγωγός, που δεν περιγράφεται από τον νόμο του Ohm, ονομάζεται **μη ωμικός**.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.4.1. Ποιο(α) από τα επόμενα σχήματα αντιστοιχεί σε ωμικό αγωγό;



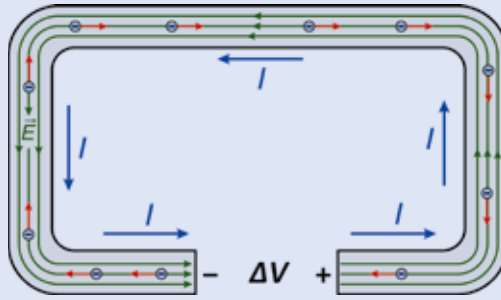
8.4.2. Μετρήσεις με έναν αγωγό οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- (i) Εάν το άκρο A του αγωγού έχει μεγαλύτερο δυναμικό από το άκρο B, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης ανάλογης με τη διαφορά δυναμικού: $I \propto (V_A - V_B)$.
- (ii) Εάν το άκρο A έχει μικρότερο δυναμικό από το άκρο B, ο αγωγός δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Συμπεριφέρεται σαν ωμικός αυτός ο αγωγός;

Ερμηνεία της Γραμμικής Σχέσης Έντασης Ρεύματος – Διαφοράς Δυναμικού:

- Όταν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού ΔV στα άκρα ενός αγωγού, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του. Σε έναν μεταλλικό αγωγό **σταθερής** διατομής S και μήκους L , το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι (προσεγγιστικά) σταθερό, και ανάλογο με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού: $|\vec{E}| = \Delta V / L$. Η κατεύθυνση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου δεν είναι γενικά σταθερή: Οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές ακολουθούν το σχήμα του αγωγού.



- Η ένταση \vec{E} προκαλεί προσανατολισμένη ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Το διάνυσμα της ταχύτητας ολίσθησης $\vec{v}_{ολ}$ είναι παράλληλο με την ένταση \vec{E} . Άρα, το ρεύμα ακολουθεί το σχήμα των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών (το σχήμα του αγωγού).
- Η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη με το μέτρο της ταχύτητας ολίσθησης: $I \propto |\vec{v}_{ολ}|$. Εάν διπλασιασθεί η ταχύτητα $\vec{v}_{ολ}$, διπλασιάζεται η ποσότητα φορτίου που διέρχεται ανά μονάδα χρόνου από μία διατομή του αγωγού.
- Σε πολλά υλικά, **το μέτρο της ταχύτητας ολίσθησης είναι ανάλογο με την ένταση** του ηλεκτρικού πεδίου: $|\vec{v}_{ολ}| \propto |\vec{E}|$. Σε αυτά τα υλικά ισχύει ο νόμος του Ohm:

$$I \propto |\vec{v}_{ολ}| \propto |\vec{E}| \propto \Delta V \Rightarrow I \propto \Delta V$$

8.5. Η Αντίσταση ενός Υλικού

Εκφράζουμε την ευκολία ή δυσκολία, με την οποία προκαλείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα υλικό, με το φυσικό μέγεθος της **αντίστασης**:

Αντίσταση

Η αντίσταση ενός υλικού ορίζεται ως το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού στα άκρα του, προς την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει:

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

Η αντίσταση συμβολίζεται με το αγγλικό γράμμα R , από την αγγλική λέξη *Resistance*. Στο σύστημα SI, η μονάδα αντίστασης ονομάζεται Ohm και συμβολίζεται ως Ω . Από τον ορισμό της αντίστασης προκύπτει ότι $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$.

Εάν η αντίσταση ενός αγωγού είναι ανεξάρτητη από τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του, ο αγωγός ικανοποιεί τον **νόμο του Ohm**:

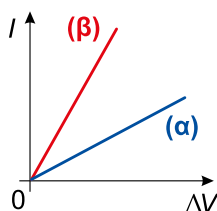
$$I = \frac{\Delta V}{R} \propto \Delta V, \text{ για } R = \text{σταθερό.}$$

Για δεδομένη διαφορά δυναμικού, η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει έναν ωμικό αγωγό, είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση του αγωγού: $I = \Delta V / R$. Συνεπώς, η αντίσταση ενός αγωγού εκφράζει τη **δυσκολία με την οποία προκαλείται ροή ρεύματος στον αγωγό**.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.5.1. Το πιο κάτω σχήμα απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις έντασης ρεύματος - διαφοράς δυναμικού για δύο αγωγούς **(α)** και **(β)**. Ποιος αγωγός έχει μεγαλύτερη αντίσταση;



8.5.2. Πώς θα μεταβληθεί η ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα, αν η αντίσταση του κυκλώματος διπλασιαστεί και η διαφορά δυναμικού στα άκρα του παραμείνει σταθερή;

8.5.3. Πώς θα μεταβληθεί η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα, αν η διαφορά δυναμικού στα άκρα του κυκλώματος μειωθεί στο μισό της προηγούμενης τιμής της, και η αντίσταση του κυκλώματος παραμείνει αμετάβλητη;

8.5.4. Δύο αγωγοί έχουν αντιστάσεις $1,0 \Omega$ και $5,0 \Omega$. Εάν εφαρμόσουμε την ίδια διαφορά δυναμικού $2,5 \text{ V}$ στα άκρα τους, να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει κάθε αγωγό. Ποιος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα μεγαλύτερης έντασης;

8.5.5. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος στις πιο κάτω ηλεκτρικές συσκευές, εάν στα άκρα τους εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού 220 V .

(α) πλάκα τοστιέρας με αντίσταση 48Ω .

(β) φούρνος μικροκυμάτων με αντίσταση 20Ω .

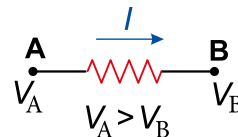
Όλοι οι αγωγοί προβάλλουν κάποια αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Τα καλώδια μεταφοράς του ρεύματος έχουν πολύ μικρή αντίσταση, για να μην επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος της έντασης του ρεύματος. Τα σύρματα των λαμπτήρων πυρακτώσεως και οι σπείρες ενός θερμαντικού σώματος έχουν αρκετά μεγάλη αντίσταση, όταν είναι σε λειτουργία.

Σε πολλά κυκλώματα εισάγονται διατάξεις, οι οποίες ονομάζονται **αντιστάτες** (resistors). Οι διατάξεις αυτές έχουν συγκεκριμένες τιμές αντίστασης, και ελέγχουν την ένταση του ρεύματος των κυκλωμάτων. Σε ένα διάγραμμα κυκλώματος, ένας αντιστάτης αναπαρίσταται με τα σύμβολα του διπλανού σχήματος.



Η **συμβατική φορά** του ρεύματος (φορά κίνησης θετικών φορέων) καθορίζει ποιο από τα δύο άκρα του αγωγού έχει **μεγαλύτερο δυναμικό**. Στο επόμενο σχήμα, η συμβατική φορά του ρεύματος είναι από το σημείο **A** στο σημείο **B**.

Δεδομένου ότι ένας θετικός φορέας φορτίου κινείται από υψηλότερο σε χαμηλότερο δυναμικό, το σημείο **A** έχει μεγαλύτερο δυναμικό από το σημείο **B**. Άρα:



Το ηλεκτρικό δυναμικό είναι **μεγαλύτερο** στο άκρο του αγωγού, από το οποίο **εισέρχεται** το ρεύμα, και **μικρότερο** στο άκρο, από το οποίο **εξέρχεται** το ρεύμα.

Εάν γνωρίζουμε την αντίσταση R ενός αγωγού και την ένταση I του ρεύματος, που τον διαρρέει, υπολογίζουμε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του από τη σχέση:

$$\Delta V = IR$$

8.6. Η Αντίσταση ενός Μεταλλικού Σύρματος με σταθερή Διατομή

Πειραματικές μετρήσεις με μεταλλικά σύρματα διαφόρων μεγεθών δείχνουν ότι η αντίσταση ενός σύρματος με σταθερή διατομή S και μήκος L είναι **ανάλογη** με το μήκος του, και **αντιστρόφως ανάλογη** με το εμβαδόν της διατομής του:

$$R \propto \frac{L}{S} \Rightarrow R = \rho \frac{L}{S}$$

Το μέγεθος ρ ονομάζεται **ειδική αντίσταση** και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία. Η ειδική αντίσταση εκφράζεται σε μονάδες Ωm . Από την πιο πάνω σχέση προκύπτει ότι η ειδική αντίσταση ενός πρισματικού ή κυλινδρικού σύρματος ισούται **αριθμητικά** με την αντίσταση ενός σύρματος μήκους 1 m και διατομής 1 m².

Τιμές της ειδικής αντίστασης διαφόρων υλικών καταγράφονται στον **Πίνακα 8-2**. Υλικά με **μικρή** ειδική αντίσταση συμπεριφέρονται σαν **αγωγοί**, και με **μεγάλη** ειδική αντίσταση σαν **μονωτές**.

Ο άργυρος έχει εξαιρετικά χαμηλή ειδική αντίσταση, αλλά δεν χρησιμοποιείται σε καλώδια επειδή είναι πολύτιμο μέταλλο. Ο χαλκός και το αλουμίνιο είναι επίσης εξαιρετικά καλοί αγωγοί. Ο χαλκός χρησιμοποιείται στην κατασκευή καλωδίων, και το αλουμίνιο προτιμάται στην κατασκευή γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους, επειδή είναι πιο ελαφρύ από τον χαλκό. Το βολφράμιο έχει την πιο υψηλή θερμοκρασία τήξης (3422°C) από όλα τα μέταλλα, οπότε χρησιμοποιείται στα νήματα των ηλεκτρικών λαμπτήρων πυρακτώσεως, τα οποία αναπτύσσονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τα κράματα των μετάλλων έχουν γενικά μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από τα συστατικά τους μέταλλα. Επειδή δεν οξειδώνονται εύκολα σε υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται συχνά σε θερμαντικές συσκευές, όπως τα ηλεκτρικά σίδερα και οι τοστιέρες.

Οι μονωτές έχουν εξαιρετικά μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης.

Πίνακας 8-2

Ειδική αντίσταση ορισμένων υλικών σε θερμοκρασία 20°C.

Υλικό	Ειδική αντίσταση ($\Omega \text{ m}$)	
Αγωγοί	Άργυρος	$1,60 \cdot 10^{-8}$
	Χαλκός	$1,62 \cdot 10^{-8}$
	Αλουμίνιο	$2,63 \cdot 10^{-8}$
	Βολφράμιο	$5,20 \cdot 10^{-8}$
	Νικέλιο	$6,84 \cdot 10^{-8}$
	Σίδηρος	$10,0 \cdot 10^{-8}$
	Χρώμιο	$12,9 \cdot 10^{-8}$
	Υδράργυρος	$94,0 \cdot 10^{-8}$
	Μαγγάνιο	$1,84 \cdot 10^{-6}$
Κράματα	Κωνσταντάνη (Cu και Ni)	$49 \cdot 10^{-6}$
	Μαγγανίνη (Cu, Mn και Ni)	$44 \cdot 10^{-6}$
	Χρωμονικελίνη (Ni, Cr, Mn και Fe)	$100 \cdot 10^{-6}$
Μονωτές	Γυαλί	$10^{10} - 10^{14}$
	Σκληρό Ελαστικό	$10^{13} - 10^{16}$
	Εβονίτης	$10^{15} - 10^{17}$
	Διαμάντι	$10^{12} - 10^{13}$
	Ξηρό χαρτί	10^{12}

Παράδειγμα

A. Να υπολογίσετε την αντίσταση ενός χάλκινου σύρματος με μήκος $L = 15,0 \text{ m}$ και εμβαδόν διατομής $S = 3,0 \text{ mm}^2$.

Σύμφωνα με τον **Πίνακα 8.2**, η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι $\rho_{\chi} = 1,62 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Η αντίσταση του σύρματος είναι

$$R_{\chi} = \rho_{\chi} \frac{L}{S} = (1,62 \times 10^{-8} \Omega\text{m}) \times \frac{15,0 \text{ m}}{3,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = \frac{1,62 \times 15,0}{3,0} \times 10^{-8+6} \Omega = 0,081 \Omega$$

B. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα, εάν εφαρμόσουμε στα άκρα του διαφορά δυναμικού $1,5 \text{ V}$.

$$I_{\chi} = \frac{\Delta V}{R_{\chi}} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,081 \Omega} = 19 \text{ A}$$

Γ. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος που θα διέρρηε ένα γυάλινο ραβδί ιδίων διαστάσεων με το σύρμα και ειδικής αντίστασης $\rho_{\gamma} = 1,62 \times 10^{12} \Omega\text{m}$.

Υποθέτουμε ότι η αντίσταση του γυάλινου ραβδιού περιγράφεται από την ίδια σχέση που ισχύει για το σύρμα. Άρα:

$$R_{\gamma} = \rho_{\gamma} \frac{L}{S} = \frac{\rho_{\gamma}}{\rho_{\chi}} \left(\rho_{\chi} \frac{L}{S} \right) = \frac{\rho_{\gamma}}{\rho_{\chi}} R_{\chi} = \frac{1,62 \times 10^{12} \Omega\text{m}}{1,62 \times 10^{-8} \Omega\text{m}} \times (0,081 \Omega) = 0,081 \times 10^{20} \Omega$$

Εάν εφαρμόσουμε στα άκρα του γυάλινου ραβδιού μία διαφορά δυναμικού $1,5 \text{ V}$ θα διαρρέεται από ρεύμα:

$$I_{\gamma} = \frac{\Delta V}{R_{\gamma}} = \frac{1,5 \text{ V}}{0,081 \times 10^{20} \Omega} = 1,9 \times 10^{-19} \text{ A}$$

Το ρεύμα αυτό αντιστοιχεί περίπου στο φορτίο ενός ηλεκτρονίου ανά δευτερόλεπτο.

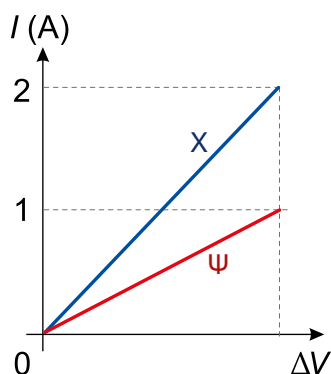
Σημείωση

Όπως αναφέραμε στο **Κεφάλαιο 7**, ένας μονωτής συμπεριφέρεται σαν αγωγός εάν το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του υπερβεί κάποια τιμή, που εξαρτάται από το υλικό του μονωτή. Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργούνται ελεύθεροι φορείς φορτίου στο εσωτερικό του μονωτή, και η αντίστασή του ελαττώνεται.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.6.1.** Ποια είναι η φυσική σημασία της ειδικής αντίστασης;
- 8.6.2.** Ένα χάλκινο και ένα σιδερένιο σύρμα έχουν το ίδιο μήκος και εμβαδόν διατομής. Ποιο από τα δύο έχει μεγαλύτερη αντίσταση;
- 8.6.3.** Ένα σύρμα έχει αντίσταση R . Πώς θα μεταβληθεί η αντίσταση εάν:
- (α) Διπλασιάσουμε το μήκος του;
 - (β) Διπλασιάσουμε το εμβαδόν διατομής του;
- 8.6.4.** Η επόμενη γραφική παράσταση απεικονίζει τη χαρακτηριστική καμπύλη $I - \Delta V$ για δύο σύρματα χαλκού X (μπλέ ευθεία) και Ψ (κόκκινη ευθεία). Τα σύρματα είναι όμοια. Ποια απάντηση είναι σωστή;



- (α) η ακτίνα της διατομής του X είναι η μισή αυτής του Ψ .
- (β) η ακτίνα της διατομής του X είναι η διπλάσια αυτής του Ψ .
- (γ) το εμβαδόν διατομής του Ψ είναι διπλάσιο από αυτό του X .
- (δ) το μήκος του Ψ είναι διπλάσιο από αυτό του X .
- (ε) το μήκος του Ψ είναι το μισό από αυτό του X .

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Σε έναν ωμικό αγωγό:	
α	Η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού.	

β	Όταν η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία του αγωγού δεν μηδενίζεται, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα.	
γ	Εάν αντιστραφεί το πρόσημο της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα άκρα του αγωγού, προκαλείται ρεύμα ίσης έντασης και αντίθετης φοράς στον αγωγό.	
2	Το πηλίκο $\Delta V // I$ εκφράζει την αντίσταση ενός αγωγού, μόνο εάν ο αγωγός είναι ωμικός.	
3	Η έννοια της αντίστασης δεν έχει νόημα για ένα μονωτικό υλικό.	
4	Η αντίσταση ενός κυλινδρικού μεταλλικού σύρματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του.	
5	Εάν περιελίξουμε μεταξύ τους δύο σύρματα ίσου μήκους και διατομής, το τελικό σύρμα (διπλάσιας διατομής) έχει διπλάσια αντίσταση.	
6	Ο άργυρος και ο χρυσός δεν χρησιμοποιούνται σε καλώδια, επειδή είναι μονωτές.	

Ασκήσεις

- 1 Δύο αντιστάτες R_1 και R_2 είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο υλικό. Το σύρμα του R_1 έχει διπλάσιο μήκος και τη μισή διάμετρο από το σύρμα του R_2 . Να υπολογίσετε τον λόγο των αντιστάσεων R_1 / R_2 .
- 2 Ένα χάλκινο καλώδιο μήκους ενός χιλιομέτρου έχει αντίσταση 10Ω . Να υπολογίσετε την αντίστασή του:
 - (α) αν το κόψουμε στη μέση και χρησιμοποιήσουμε το μισό, και
 - (β) αν το διπλώσουμε στη μέση και το χρησιμοποιήσουμε σαν «ένα» καλώδιο;
- 3 Ένας κυλινδρικός μεταλλικός αντιστάτης ακτίνας r και μήκους L έχει αντίσταση R . Να προσδιορίσετε την αντίσταση ενός δεύτερου κυλινδρικού αντιστάτη ακτίνας $3r$ και μήκους $3L$, από το ίδιο υλικό με τον πρώτο.
- 4 Τα χάλκινα καλώδια που συνδέουν τον ενισχυτή με τα ηχεία ενός στερεοφωνικού έχουν μήκος $8,5 \text{ m}$ και ακτίνα $1,2 \text{ mm}$.
 - (α) Να υπολογίσετε την αντίσταση κάθε καλωδίου.

- (β) Εάν τα καλώδια διαρρέονται από ρεύμα έντασης 4,2 A, να υπολογίσετε την πώση δυναμικού κατά μήκος κάθε καλωδίου.

Σημείωση

Η πώση δυναμικού προκαλεί μικρή ελάττωση στην ένταση του ήχου, που παράγουν τα ηχεία.

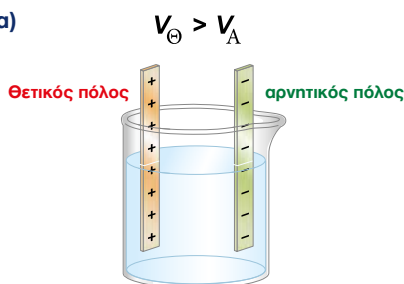
- 5 Ένα αγρόκτημα προστατεύεται από τους κεραυνούς με ένα αλεξικέραυνο, το οποίο αποτελείται από μια ράβδο σιδήρου ύψους 5 m. Το αλεξικέραυνο έχει κατασκευασθεί με βάση την εκτίμηση ότι ένας μέσος κεραυνός διαρρέει το αλεξικέραυνο σε 50 μs και αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό ρεύμα μέχρι 50 kA.
- (α) Πόσο φορτίο μεταφέρεται από έναν μέσο κεραυνό;
- (β) Ο κατασκευαστής έχει φροντίσει ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ της αιχμής και της βάσης του αλεξικέραυνου να μην ξεπερνά τα 100 V. Ποια είναι η ελάχιστη διάμετρος που μπορεί να έχει το αλεξικέραυνο;

8.7. Η Ηλεκτρική Πηγή

Εικόνα 8-5

(α) Οι πόλοι της πηγής φορτίζονται από χημικές αντιδράσεις ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη. (β) Εάν οι πόλοι ενωθούν με ένα σύρμα, προκαλείται ροή ηλεκτρονίων από τον αρνητικό στον θετικό πόλο.

(α)



Χημικές αντιδράσεις με τον ηλεκτρολύτη δημιουργούν περίσσεια ηλεκτρονίων στον αρνητικό πόλο και έλλειμμα ηλεκτρονίων στον θετικό πόλο.

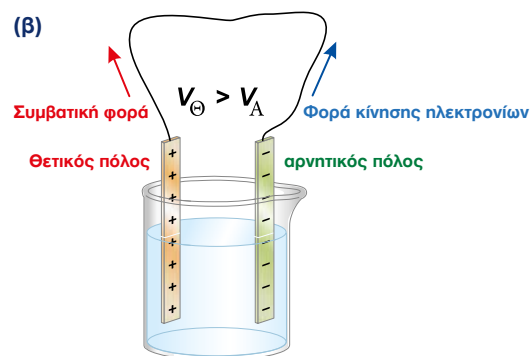
Για να προκληθεί προσανατολισμένη ροή ηλεκτρικών φορέων σε έναν αγωγό, χρειάζεται να υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στον αγωγό. Στην **Ενότητα 8.1**, εξηγήσαμε ότι το πεδίο μηδενίζεται, εάν μηδενισθεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων του αγωγού. Άρα, **για να διαρρέεται από ρεύμα ένας αγωγός, χρειάζεται να διατηρείται διαφορά δυναμικού στα άκρα του**. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της ηλεκτρικής πηγής (μπαταρίας).

Μία απλή ηλεκτρική πηγή (μπαταρία) περιέχει δύο ηλεκτρόδια, που αντιστοιχούν στους πόλους της πηγής. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι τοποθετημένα σε κάποιο κατάλληλο μέσο (ηλεκτρολύτη). Μέσω χημικών αντιδράσεων με τον ηλεκτρολύτη, ένα ηλεκτρόδιο φορτίζεται θετικά (θετικός πόλος) και το δεύτερο φορτίζεται αρνητικά (αρνητικός πόλος). Επειδή οι πόλοι έχουν αντίθετα φορτία, δημιουργείται μεταξύ τους διαφορά δυναμικού. Ο θετικός πόλος έχει υψηλότερο δυναμικό από τον αρνητικό πόλο.

Εάν οι πόλοι της πηγής ενωθούν με ένα αγωγίμο σύρμα, προκαλείται κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων μέσα στο σύρμα, με κατεύθυνση από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο (**Εικόνα 8-5(β)**). Η ροή ηλεκτρονίων δεν προκαλεί αποφόρτιση των πόλων: μέσω των χημικών αντιδράσεων, τα φορτία των πόλων της μπαταρίας συντηρούνται, και

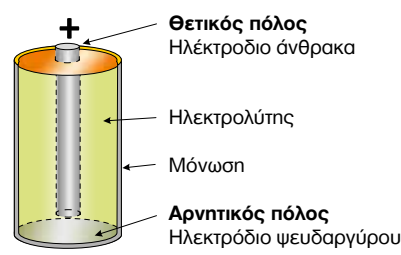
η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων διατηρείται. Ο ρόλος της μπαταρίας είναι να **διατηρεί προσεγγιστικά σταθερή διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα άκρα ενός αγωγού**.

Όταν το υλικό που συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις εξαντληθεί, η πηγή δεν μπορεί να διατηρήσει τη διαφορά δυναμικού των προδιαγραφών της. Γι' αυτό, μία πηγή έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής.



Ροή ηλεκτρονίων με φορά από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο. Τα φορτία και η διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων συντηρούνται από τις χημικές αντιδράσεις.

Μία τυπική μπαταρία ξηρού τύπου, σαν αυτές που χρησιμοποιούνται στα κινητά ραδιόφωνα και στις μικροσυσκευές, απεικονίζεται στο διπλανό σχήμα. Η βάση του κουτιού από ψευδάργυρο αποτελεί τον αρνητικό πόλο και το ραβδί από άνθρακα τον θετικό πόλο. Το κουτί περιέχει το ηλεκτρολυτικό υλικό.



Συμβολισμός Ηλεκτρικών Πηγών

Οι ηλεκτρικές πηγές σε ένα κύκλωμα απεικονίζονται ως δύο άνισες παράλληλες γραμμές. Η γραμμή μεγαλύτερου μήκους αντιστοιχεί στον θετικό πόλο, και η γραμμή μικρότερου μήκους στον αρνητικό πόλο.



8.8. Ένα απλό Κύκλωμα

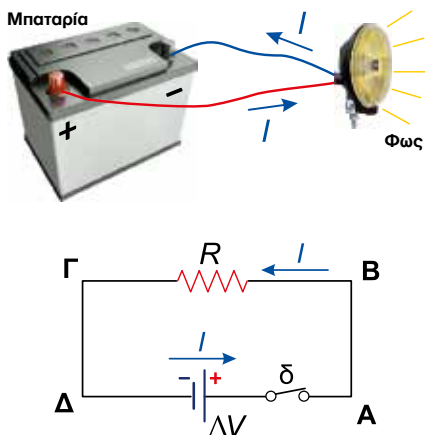
Το πάνω σχήμα της **Εικόνας 8-6** απεικονίζει ένα απλό *ηλεκτρικό κύκλωμα*, που αποτελείται από μία μπαταρία, αγωγούς, φανάρι (αντιστάτη), και διακόπτη (πάνω στο φανάρι). Το κάτω σχήμα απεικονίζει την αναπαράσταση του ίδιου κυκλώματος.

Παρατηρούμε τα εξής:

- Οι δύο παράλληλες γραμμές άνισου μήκους αναπαριστούν την πηγή. Η μεγαλύτερη γραμμή αναπαριστά τον θετικό πόλο και η μικρότερη τον αρνητικό πόλο.
- Η ένταση του ρεύματος μέσα στο κύκλωμα σχεδιάζεται με **συμβατική φορά** από τον θετικό προς τον αρνητικό πόλο της πηγής, δηλαδή κατά την κατεύθυνση ΑΒΓΔ.

Εικόνα 8-6

Πάνω: Ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα, που αποτελείται από μία μπαταρία, αγωγούς και φανάρι (αντίσταση). **Κάτω:** Σχηματική αναπαράσταση του ίδιου κυκλώματος.



- Η διάταξη δ αναπαριστά τον διακόπτη του φαναριού. Ένας κλειστός διακόπτης συμπεριφέρεται σαν αγωγός αμελητέας αντίστασης, ενώ ένας ανοικτός διακόπτης ως μονωτής (σώμα πολύ μεγάλης αντίστασης).
- Το τμήμα ΒΓ αναπαριστά το φανάρι. Επειδή το φανάρι έχει **σημαντική** αντίσταση, στο τμήμα ΒΓ περιλαμβάνεται το σύμβολο της αντίστασης.
- Τα τμήματα ΑΒ και ΓΔ αναπαριστούν τα σύρματα, που συνδέουν την πηγή και το φανάρι. Επειδή τα σύρματα αυτά έχουν **αμελητέα** αντίσταση συγκριτικά με το φανάρι, σχεδιάζονται από **απλά ευθύγραμμα τμήματα**, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το σύμβολο της αντίστασης.
- Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των διαφόρων τμημάτων του κυκλώματος υπολογίζεται με τον νόμο του Ohm, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι το ρεύμα κατευθύνεται από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο δυναμικό. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του φαναριού ΒΓ είναι:

$$V_B - V_\Gamma = IR$$

Η ποσότητα IR είναι η **πτώση δυναμικού** κατά μήκος του αγωγού ΒΓ, **καθώς κινούμαστε με τη συμβατική φορά** του ρεύματος.

- Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των τμημάτων αμελητέας αντίστασης είναι περίπου μηδενική, σε συμφωνία με τον νόμο του Ohm:

$$V_A - V_B = IR_{AB} \cong 0 \Rightarrow V_A \cong V_B$$

$$V_\Gamma - V_\Delta = IR_{\Gamma\Delta} \cong 0 \Rightarrow V_\Gamma \cong V_\Delta$$

Γιατί το δυναμικό πέφτει κατά μήκος ενός μεταλλικού σύρματος, καθώς κινούμαστε με τη συμβατική φορά του ρεύματος;

Εάν το σύρμα έχει σταθερή διατομή, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του έχει σταθερό μέτρο $|\vec{E}|$. Κατά τη μετακίνηση ενός θετικού φορέα από το άκρο Α στο άκρο Β ενός σύρματος μήκους L , η ηλεκτρική δύναμη **παράγει** έργο

$$W_{\eta\lambda} = |\vec{F}|L = (q|\vec{E}|)L > 0$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης μπορεί να εκφρασθεί επίσης ως το γινόμενο του φορτίου επί τη διαφορά δυναμικού των άκρων του σύρματος:

$$W_{\eta\lambda} = q(V_A - V_B) > 0$$

Άρα, ο **θετικά** φορτισμένος φορέας κινείται **από το άκρο υψηλότερου δυναμικού A στο άκρο χαμηλότερου δυναμικού B**. Εάν το σύρμα έχει αντίσταση R και διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , η διαφορά δυναμικού γράφεται και ως $V_A - V_B = IR$.

Από τις εκφράσεις του ηλεκτρικού έργου, συνδέουμε το μέτρο της έντασης του πεδίου με τη διαφορά δυναμικού και το μήκος του σύρματος:

$$W_{\eta\lambda} = |\vec{F}|L = (q|\vec{E}|)L = q(V_A - V_B) \Rightarrow |\vec{E}| = (V_A - V_B)/L$$

Γιατί ένας αγωγός (περίπου) μηδενικής αντίστασης δεν παρουσιάζει σημαντική πτώση δυναμικού;

Σε έναν αγωγό πολύ μικρής αντίστασης, προκαλείται σημαντικό ηλεκτρικό ρεύμα από ένα πολύ μικρό ηλεκτρικό πεδίο. Άρα, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι επίσης μικρό: $|\vec{E}| \cong 0 \Rightarrow W_{\eta\lambda} \cong 0 \Rightarrow |\Delta V| \cong 0$.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.8.1.** Ένα καλώδιο αντίστασης $0,1 \Omega$ διαρρέεται από ρεύμα $3,0 \text{ A}$. Ποια η διαφορά δυναμικού στα άκρα του; Κατά ποια φορά ελαττώνεται το δυναμικό, κατά μήκος του καλωδίου;
- 8.8.2.** Η διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός σύρματος $2,0 \text{ cm}$ είναι $6,0 \text{ V}$. Ποιο είναι το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του σύρματος;

Μηχανικό Ανάλογο Ηλεκτρικού Κυκλώματος

Ένα μηχανικό ανάλογο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι το συντριβάνι του διπλανού σχήματος. Υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης, το νερό κινείται από την υψηλότερη προς τη χαμηλότερη λεκάνη. Αντίστοιχα, μέσα στο κύκλωμα οι (θετικοί) φορείς φορτίου κινούνται από τον θετικό πόλο (υψηλότερο δυναμικό) προς τον αρνητικό πόλο της πηγής (χαμηλότερο δυναμικό).

Με τη βοήθεια μίας **αντλίας**, το νερό μεταφέρεται στην κορυφή του συντριβανιού. Αντίστοιχα, μέσα στην πηγή οι θετικοί φορείς



κινούνται από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο. Όπως η πηγή μεταφέρει τους φορείς φορτίου στο εσωτερικό της αντίθετα από τη φορά της ηλεκτρικής δύναμης, έτσι και η αντλία κινεί το νερό αντίθετα από την κατεύθυνση του βαρυτικού πεδίου.

8.9. Ροοστάτης και Διαιρέτης Τάσης (Ποτενσιόμετρο)

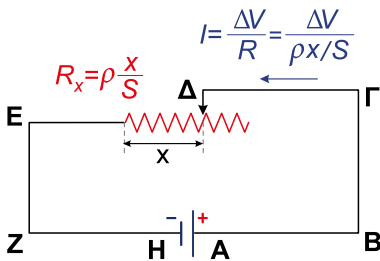
Στην Ενότητα **8.6**, δείξαμε ότι η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από το μήκος L και τη διατομή του S μέσω της σχέσης:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Από τη σχέση αυτή συμπεραίνουμε ότι σε έναν ομογενή αγωγό σταθερής διατομής S η αντίσταση είναι ανάλογη με το μήκος, $R \propto L$. Η παρατήρηση αυτή βρίσκει εφαρμογή σε αντιστάτες με μεταβλητή αντίσταση.

Εικόνα 8-7

Η αντίσταση εξαρτάται από τη θέση του δρομέα Δ (το μήκος x).



Ροοστάτης

Η **Εικόνα 8-7** απεικονίζει ένα απλό κύκλωμα, που αποτελείται από μία πηγή και έναν αντιστάτη σταθερής διατομής. Κατά μήκος του αντιστάτη κινείται ένας οδηγός Δ , ο οποίος μεταβάλλει το μήκος του αντιστάτη που διαρρέεται από ρεύμα.

Στο κύκλωμα του σχήματος, μόνο το τμήμα ΔE του αντιστάτη, μήκους x διαρρέεται από ρεύμα. Από την σχέση για την αντίσταση αγωγού σταθερής διατομής S , προκύπτει ότι η αντίσταση του τμήματος ΔE μεταβάλλεται με το μήκος x μέσω της σχέσης

$$R_x = \rho \frac{x}{S}$$

Μία τέτοια διάταξη μεταβλητής αντίστασης ονομάζεται **ροοστάτης**.

Στην **Εικόνα 8-7**, το άκρο Δ έχει το ίδιο δυναμικό με τον θετικό πόλο της πηγής (A), επειδή συνδέεται με αυτόν με σύρμα αμελητέας αντίστασης (ευθύγραμμο τμήμα). Ομοίως, το άκρο E έχει το ίδιο δυναμικό με τον αρνητικό πόλο (H). Άρα, η διαφορά δυναμικού των άκρων E και Δ ισούται με τη διαφορά δυναμικού της πηγής:

$$V_{\Delta} - V_E = \Delta V$$

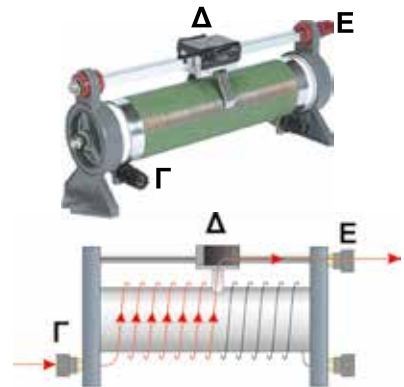
Το ρεύμα, που διαρρέει το κύκλωμα, υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm:

$$V_{\Delta}-V_E = \Delta V = IR_x = I\rho \frac{x}{S} \Rightarrow I = \frac{\Delta V}{\rho x/S}$$

Να **παρατηρήσετε** ότι η ένταση του ρεύματος αυξάνεται, καθώς ελαττώνεται το μήκος x (ο δρομέας μετακινείται προς το σημείο **E**).

Στη διπλανή εικόνα απεικονίζεται ένας τυπικός ροοστάτης, μαζί ένα σχήμα της αντίστοιχης συνδεσμολογίας. Το ρεύμα εισέρχεται από το σημείο **Γ** και εξέρχεται από το σημείο **E**, έχοντας κάνει τη διαδρομή **ΓΔΕ**.

Ο ροοστάτης χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητό να μεταβάλλεται το ρεύμα του κυκλώματος. Παραδείγματα διατάξεων με ροοστάτες είναι οι αυξομειωτές της έντασης του φωτός (dimmers) και της έντασης του ήχου σε ραδιόφωνα.



Εικόνα 8-8

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των **Γ** και **Ε** εξαρτάται από τη θέση του δρομέα **Δ** (μήκος x).

Διαιρέτης Τάσης (ποτενσιόμετρο)

Η **Εικόνα 8-8** απεικονίζει ένα απλό κύκλωμα, που αποτελείται από μία πηγή και έναν αντιστάτη. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων **E** και **Γ** του αντιστάτη ισούται με τη διαφορά δυναμικού της πηγής, $V_{\Gamma}-V_E = \Delta V$.

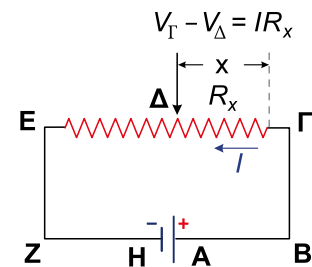
Κατά μήκος του αντιστάτη κινείται ένας οδηγός **Δ**, ο οποίος μεταβάλλει το μήκος του τμήματος **ΓΔ**. Εάν το τμήμα αυτό έχει σταθερή διατομή S και μήκος x θα έχει αντίσταση $R_x = \rho(x/S)$.

Όταν το τμήμα **ΓΔ** διαρρέεται από ρεύμα έντασης I η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι:

$$V_{\Gamma}-V_{\Delta} = IR_x$$

Η διαφορά αυτή είναι **μικρότερη** από τη διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των άκρων **E** και **Γ**. Η διάταξη της **Εικόνας 8-8** ονομάζεται **διαιρέτης τάσης**, επειδή υποβιβάζει τη συνολική διαφορά δυναμικού $V_{\Gamma}-V_E = \Delta V$.

Μεταβάλλοντας το μήκος x του τμήματος **ΓΔ**, μεταβάλλεται η αντίσταση R_x και η διαφορά δυναμικού $V_{\Gamma}-V_{\Delta}$. Εάν ενώσουμε μία συσκευή με τα σημεία **Γ** και **Δ**, μπορούμε με μετακίνηση του δρομέα **Δ** να μεταβάλλουμε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής. Μελετούμε ένα παράδειγμα εφαρμογής διαιρέτη τάσης στην επόμενη Ενότητα **8.10**, μετά τη **σύνθετη συνδεσμολογία** αντιστάσεων.





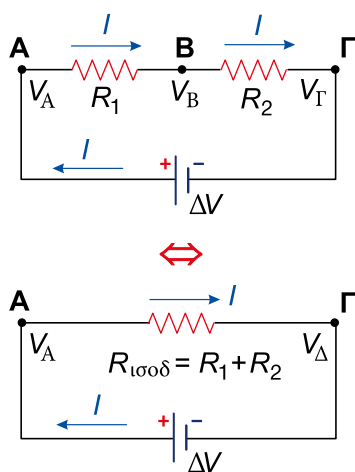
Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

- 8.9.1.** Να σχεδιάσετε ένα απλό κύκλωμα με ροοστάτη, και να εξηγήσετε με ποιο τρόπο ρυθμίζεται με αυτόν η ένταση του ρεύματος.
- 8.9.2.** Να σχεδιάσετε ένα απλό κύκλωμα με ποτενσιόμετρο, και να εξηγήσετε με ποιο τρόπο ρυθμίζεται με αυτό η διαφορά δυναμικού.

8.10. Συνδεσμολογία Αντιστάσεων

Εικόνα 8-9

Οι αντιστάτες R_1 και R_2 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.



Συνδεσμολογία Αντιστατών σε Σειρά

Η **Εικόνα 8-9** παρουσιάζει ένα κύκλωμα από δύο αντιστάτες, συνδεδεμένους σε **σειρά**. Από τα σημεία A, B και Γ διέρχεται ο ίδιος αριθμός φορέων φορτίου ανά μονάδα χρόνου. Άρα οι αντιστάτες διαρρέονται από **το ίδιο ρεύμα**, έντασης I .

Έστω ότι A και B είναι τα άκρα του αντιστάτη R_1 , και B, Γ τα άκρα του R_2 . Η πτώση τάσης στα άκρα των δύο αντιστατών είναι:

$$V_A - V_B = IR_1$$

$$V_B - V_\Gamma = IR_2$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις δύο τελευταίες σχέσεις, βρίσκουμε:

$$(V_A - V_B) + (V_B - V_\Gamma) = I(R_1 + R_2) \Rightarrow V_A - V_\Gamma = I(R_1 + R_2) \Rightarrow \frac{V_A - V_\Gamma}{I} = R_1 + R_2$$

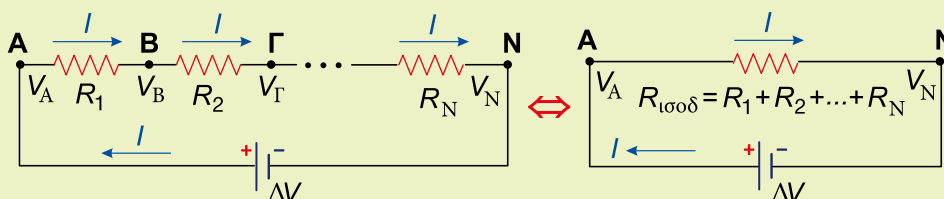
Έστω ότι **αντικαθιστούμε** τους αντιστάτες 1 και 2 με έναν αντιστάτη, ο οποίος διαρρέεται από το συνολικό ρεύμα I , όταν έχει διαφορά δυναμικού $V_A - V_\Gamma$ στα άκρα του. Ο ισοδύναμος αυτός αντιστάτης πρέπει να έχει αντίσταση:

$$R_{\text{ισοδ}} = \frac{V_A - V_\Gamma}{I} = R_1 + R_2$$

Άρα, η **ισοδύναμη** αντίσταση μεταξύ των σημείων A και B είναι ίση με το άθροισμα των R_1 και R_2 . Το συμπέρασμα αυτό γενικεύεται για N αντιστάτες συνδεδεμένους σε σειρά:

Ισοδύναμη Αντίσταση Συνδεσμολογίας N Αντιστάτων σε Σειρά:

$$R_{\text{ισοδ}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$



Στη συνδεσμολογία αντιστάτων σε σειρά:

- Όλοι οι αντιστάτες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I .
- Η διαφορά δυναμικού στα άκρα **A** και **B** ενός αντιστάτη R ισούται με $V_A - V_B = IR$, όπου η συμβατική φορά του ρεύματος είναι από το άκρο **A** προς το άκρο **B**.
- Εάν ένας αντιστάτης καταστραφεί ή αποσυνδεθεί, το ρεύμα στο κύκλωμα διακόπτεται.

Παράδειγμα

Το κύκλωμα του επόμενου σχήματος αποτελείται από μία πηγή διαφοράς δυναμικού $\Delta V = 12,0 \text{ V}$ και τρεις αντιστάτες $R_1 = 1,0 \Omega$, $R_2 = 2,0 \Omega$ και $R_3 = 3,0 \Omega$ συνδεδεμένους σε σειρά.

A. Θα υπολογίσουμε το συνολικό ρεύμα, που διαρρέει το κύκλωμα.

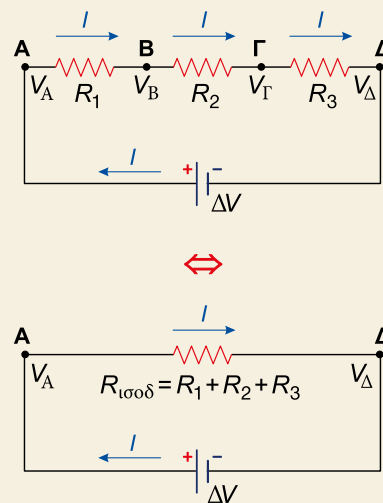
Το σημείο **A** του κυκλώματος έχει το ίδιο δυναμικό με τον θετικό πόλο της πηγής, επειδή συνδέεται με αυτόν με σύρμα αμελητέας αντίστασης (ευθύγραμμο τμήμα).

Ομοίως, το σημείο **Δ** έχει το ίδιο δυναμικό με τον αρνητικό πόλο της πηγής. Άρα, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των A και Δ είναι:

$$V_A - V_\Delta = \Delta V = 12,0 \text{ V}$$

Επειδή οι αντιστάτες συνδέονται σε σειρά, η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος είναι:

$$R_{\text{ισοδ}} = R_1 + R_2 + R_3 = 6 \Omega$$



Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της ισοδύναμης αντίστασης συνδέεται με την ένταση του ρεύματος με τη σχέση:

$$V_A - V_\Delta = IR_{\text{ισοδ}} \Rightarrow I = \frac{V_A - V_\Delta}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{\Delta V}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε $I = \frac{12,0 \text{ V}}{6,0 \Omega} = 2,0 \text{ A}$.

B. Θα υπολογίσουμε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε αντιστάτη.

Η πτώση τάσης στα άκρα των τριών αντιστατών είναι:

$$V_A - V_B = IR_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \Delta V = \frac{1,0 \Omega}{6,0 \Omega} \times (12,0 \text{ V}) = 2,0 \text{ V}$$

$$V_B - V_\Gamma = IR_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \Delta V = \frac{2,0 \Omega}{6,0 \Omega} \times (12,0 \text{ V}) = 4,0 \text{ V}$$

$$V_\Gamma - V_\Delta = IR_3 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \Delta V = \frac{3,0 \Omega}{6,0 \Omega} \times (12,0 \text{ V}) = 6,0 \text{ V}$$

Να παρατηρήσετε ότι:

- Το άθροισμα των τριών πτώσεων τάσης ισούται με τη συνολική διαφορά δυναμικού ΔV .
- Επειδή και οι τρεις αντιστάτες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, η μεγαλύτερη πτώση τάσης παρατηρείται κατά μήκος του αντιστάτη μεγαλύτερης αντίστασης R_3 .
- Η ένταση του ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ισοδύναμη αντίσταση: $I = \frac{\Delta V}{R_{\text{ισοδ}}}$.

Άρα, **εάν αυξήσουμε την ισοδύναμη αντίσταση** (προσθέτοντας κι άλλους αντιστάτες στο κύκλωμα), **η ένταση του ρεύματος ελαττώνεται**.



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.10.1. Συνδέουμε έναν αντιστάτη $3,0 \Omega$ με μία μπαταρία $9,0 \text{ V}$. Να προσδιορίσετε:

- Την ένταση του ρεύματος.
- Την ισοδύναμη αντίσταση, εάν συνδέσουμε σε σειρά 6 τέτοιους αντιστάτες R με την ίδια πηγή.
- Την ένταση ρεύματος και τη διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε αντιστάτη.

8.10.2. Ποιό είναι το βασικό μειονέκτημα της συνδεσμολογίας συσκευών σε σειρά;

Παράλληλη Συνδεσμολογία Αντιστάτων

Στο κύκλωμα της **Εικόνας 8-10**, τα άκρα **A** και **Γ** των αντιστάτων 1 και 2 είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, και έχουν το ίδιο δυναμικό. Ομοίως, τα άκρα **B** και **Δ** των δύο αντιστάτων είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, και έχουν το ίδιο δυναμικό. Η συνδεσμολογία ονομάζεται **παράλληλη**. Όταν δύο αντιστάτες είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα τους: $V_A - V_B = V_\Gamma - V_\Delta$.

Έστω ότι το κύκλωμα διαρρέεται από συνολικό ρεύμα έντασης I . Στο σημείο **A**, το ρεύμα διακλαδίζεται. Από τον συνολικό αριθμό φορέων, που εισέρχονται στο σημείο A ανά μονάδα χρόνου, ένας αριθμός φορέων διέρχονται από τον αντιστάτη R_1 , και οι υπόλοιποι από τον αντιστάτη R_2 . Επειδή το φορτίο διατηρείται, το άθροισμα των ρευμάτων στους δύο αντιστάτες ισούται με το συνολικό ρεύμα, που διαρρέει το κύκλωμα:

$$I_1 + I_2 = I$$

Εφαρμόζοντας τον ορισμό της αντίστασης σε κάθε αντιστάτη ξεχωριστά, βρίσκουμε:

$$V_A - V_B = \Delta V = I_1 R_1 \Rightarrow I_1 = \frac{\Delta V}{R_1}$$

$$V_\Gamma - V_\Delta = \Delta V = I_2 R_2 \Rightarrow I_2 = \frac{\Delta V}{R_2}$$

Συμπεραίνουμε ότι στην παράλληλη συνδεσμολογία, οι αντιστάτες δεν διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.

Προσθέτοντας τις εντάσεις ρευμάτων στους αντιστάτες, βρίσκουμε:

$$I_1 + I_2 = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} = \Delta V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \frac{I_1 + I_2}{\Delta V} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

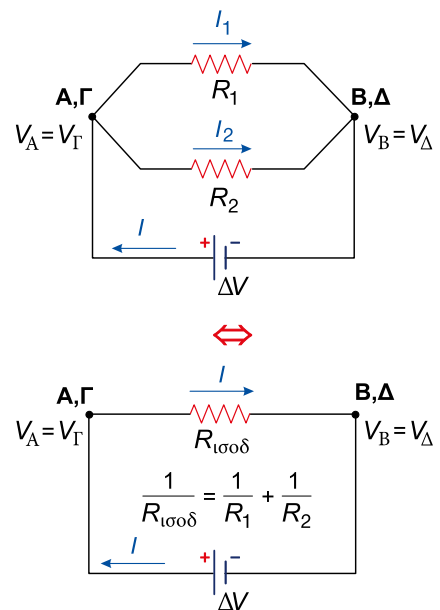
$$\Rightarrow \frac{I}{\Delta V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Έστω ότι αντικαθιστούμε τους αντιστάτες 1 και 2 με έναν αντιστάτη, ο οποίος διαρρέεται από το συνολικό ρεύμα I , όταν έχει την ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα του. Ο **ισοδύναμος** αυτός αντιστάτης πρέπει να έχει αντίσταση:

$$R_{\text{ισοδ}} = \frac{\Delta V}{I} \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{I}{\Delta V}$$

Εικόνα 8-10

Παράλληλη συνδεσμολογία αντιστάτων.



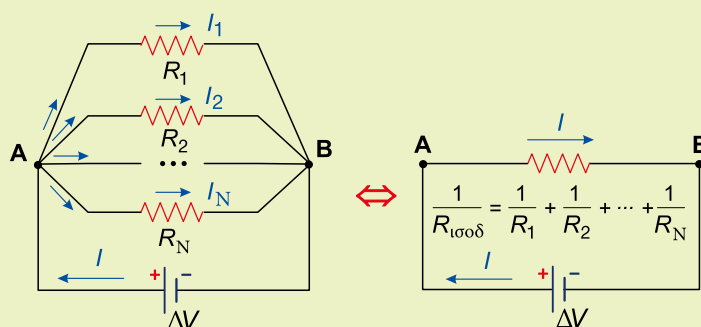
Από τις δύο τελευταίες σχέσεις συμπεραίνουμε ότι η ισοδύναμη αντίσταση των δύο αντιστάτων 1 και 2, παράλληλης συνδεσμολογίας, ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{\text{ισοδ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Η σχέση αυτή γενικεύεται για N αντιστάτες σε παράλληλη συνδεσμολογία:

Ισοδύναμη Αντίσταση Παράλληλης Συνδεσμολογίας N Αντιστατών:

$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$



Στην **παράλληλη** συνδεσμολογία αντιστατών ισχύουν τα επόμενα:

- Στα άκρα κάθε αντιστάτη επικρατεί **η ίδια διαφορά δυναμικού** ΔV .
- Το ρεύμα που διαρρέει κάθε αντιστάτη είναι αντιστρόφως ανάλογο με την αντίστασή του: $I = \Delta V / R \propto 1/R$.
- Η ισοδύναμη αντίσταση είναι **πιο μικρή** από τη **μικρότερη αντίσταση** της συνδεσμολογίας.

Απόδειξη

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ένα κύκλωμα δύο αντιστατών σε παράλληλη συνδεσμολογία, με αντιστάσεις $R_2 < R_1$. Από τη σχέση για την ισοδύναμη αντίσταση, προκύπτει:

$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} > \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{\text{ισοδ}} < R_2$$

- Η **ισοδύναμη** αντίσταση της συνδεσμολογίας **ελαττώνεται**, όταν **προστίθεται** παράλληλα στη συνδεσμολογία μία νέα αντίσταση.

Απόδειξη

Έστω ότι σε ένα κύκλωμα υπάρχουν δύο παράλληλοι αντιστάτες, με αντιστάσεις R_1 και R_2 . Η ισοδύναμη αντίσταση ικανοποιεί τη σχέση

$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Εάν συνδέσουμε έναν νέο αντιστάτη παράλληλα στους δύο πρώτους, η νέα ισοδύναμη αντίσταση ικανοποιεί τη σχέση:

$$\frac{1}{R'_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} > \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R'_{\text{ισοδ}}} > \frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} \Rightarrow R'_{\text{ισοδ}} < R_{\text{ισοδ}}$$

- Έστω ότι η διαφορά δυναμικού στα άκρα μίας συνδεσμολογίας διατηρείται σταθερή. Κάθε φορά που **προσθέτουμε** έναν νέο αντιστάτη παράλληλα στη συνδεσμολογία, το ολικό ρεύμα της συνδεσμολογίας **αυξάνεται**:

$$I' = \frac{\Delta V}{R'_{\text{ισοδ}}} > \frac{\Delta V}{R_{\text{ισοδ}}} = I$$

Παράδειγμα

Το κύκλωμα του επόμενου σχήματος αποτελείται από μία πηγή διαφοράς δυναμικού $\Delta V = 12,0 \text{ V}$ και τρεις αντιστάτες $R_1 = 0,75 \Omega$, $R_2 = 1,00 \Omega$ και $R_3 = 1,50 \Omega$ συνδεδεμένους παράλληλα.

- A.** Θα υπολογίσουμε το ρεύμα που διαρρέει κάθε αντιστάτη, και το συνολικό ρεύμα.

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων **A** και **B** του κυκλώματος ισούται με τη διαφορά δυναμικού των πόλων της πηγής:

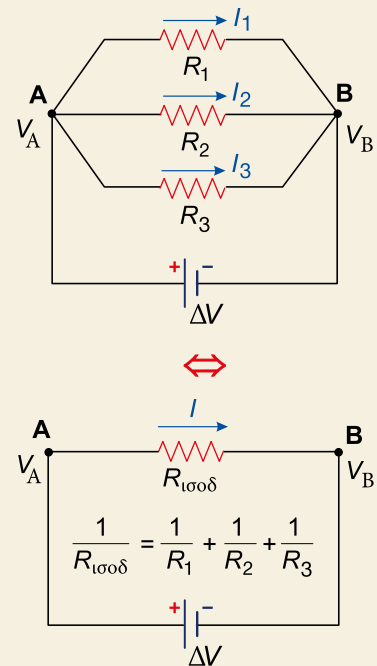
$$V_A - V_B = \Delta V = 12,0 \text{ V}$$

Επειδή οι αντιστάτες συνδέονται παράλληλα, η διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε αντιστάτη είναι ίση με ΔV .

Από τη διαφορά δυναμικού, υπολογίζουμε αμέσως το ρεύμα που διαρρέει κάθε αντιστάτη, **σαν να υπήρχε μόνος του στο κύκλωμα**:

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{12,0 \text{ V}}{0,75 \Omega} = 16,0 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{12,0 \text{ V}}{1,00 \Omega} = 12,0 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{12,0 \text{ V}}{1,50 \Omega} = 8,0 \text{ A}$$



Να παρατηρήσετε ότι το ρεύμα **μεγαλύτερης** έντασης διέρχεται από τον **μικρότερο** αντιστάτη.

Το **συνολικό ρεύμα**, που διαρρέει το κύκλωμα, υπολογίζεται αμέσως:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 36 \text{ A}$$

Το συνολικό ρεύμα ικανοποιεί επίσης τη σχέση $I = \frac{\Delta V}{R_{\text{ισοδ}}}$, με $R_{\text{ισοδ}}$ την ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος.

Επειδή οι τρεις αντιστάτες συνδέονται παράλληλα, η ισοδύναμη αντίσταση είναι:

$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \left(\frac{1}{0,75} + \frac{1}{1,00} + \frac{1}{1,50} \right) \times \frac{1}{\Omega} = 3,00 \times \frac{1}{\Omega} \Rightarrow R_{\text{ισοδ}} = 0,33 \Omega$$

Από την ισοδύναμη αντίσταση υπολογίζουμε το συνολικό ρεύμα:

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{12,0 \text{ V}}{0,33 \Omega} = 36 \text{ A}$$

σε συμφωνία με το προηγούμενο αποτέλεσμα.

B. Πώς θα μεταβληθεί το συνολικό ρεύμα, και το ρεύμα σε κάθε αντιστάτη, εάν συνδέσουμε παράλληλα έναν τέταρτο αντιστάτη $R_4 = 2,00 \Omega$;

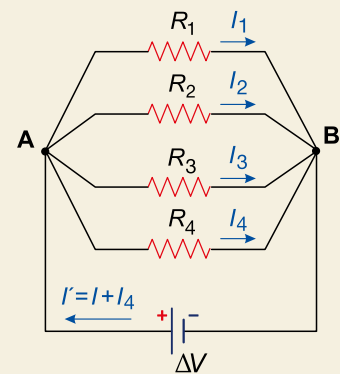
Τα ρεύματα των αντιστατών R_1 , R_2 και R_3 **δεν** επηρεάζονται, επειδή δεν μεταβάλλεται η διαφορά δυναμικού στα άκρα τους.

Το ρεύμα που διαρρέει τον νέο αντιστάτη R_4 έχει ένταση:

$$I_4 = \frac{\Delta V}{R_4} = \frac{12,0 \text{ V}}{2,00 \Omega} = 6,0 \text{ A}$$

Το συνολικό ρεύμα θα αυξηθεί κατά την ποσότητα I_4 :

$$I' = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 42 \text{ A}$$



Εφαρμογή

Οι συσκευές που τοποθετούνται σε ένα πολύπριζο, ενώνονται παράλληλα με το δίκτυο του σπιτιού. Κάθε φορά που προσθέτουμε μία νέα συσκευή στο πολύπριζο, **αυξάνεται η συνολική ένταση του ρεύματος**, που εισέρχεται στο πολύπριζο. Τελικά, διατρέχουμε τον κίνδυνο το πολύπριζο να υπερφορτωθεί.

- **Προσέξτε** όμως: το ρεύμα που διαρρέει κάθε μία από τις συσκευές **δεν** επηρεάζεται από την προσθήκη ή αφαίρεση άλλων συσκευών στο πολύπριζο.

Απόδειξη

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει μία συσκευή αντίστασης R είναι ίση με $I = \Delta V / R$. Εάν η διαφορά δυναμικού είναι σταθερή, το ρεύμα δεν μεταβάλλεται.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.10.3. Ένα πολύφωτο περιέχει υποδοχές, στις οποίες τοποθετούμε λαμπτήρες φωτισμού. Οι λαμπτήρες συνδέονται παράλληλα, και στα άκρα κάθε λαμπτήρα υπάρχει διαφορά δυναμικού 220 V, όταν το πολύφωτο λειτουργεί. Εάν το πολύφωτο έχει μόνο έναν λαμπτήρα αντίστασης 440 Ω, διαρρέεται από ρεύμα 0,50 A.

(α) Ποια η συνολική ένταση του ρεύματος που τροφοδοτεί το πολύφωτο, εάν έχει δύο λαμπτήρες; Ποιά η ένταση του ρεύματος σε κάθε λαμπτήρα;

(β) Εάν η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος είναι 12 A, πόσους λαμπτήρες μπορεί να περιέχει το πολύφωτο; Ποια είναι η ένταση ρεύματος σε κάθε λαμπτήρα; Ποια είναι η ισοδύναμη αντίσταση;

8.10.4. Σε ένα πολύπριζο τοποθετούμε έναν φούρνο με αντίσταση 15 Ω και τα μάτια μίας ηλεκτρικής κουζίνας, αντίστασης 22 Ω. Τι ρεύμα διαρρέει τον φούρνο και την κουζίνα, όταν:

(α) Μόνο η μία από τις δύο συσκευές είναι σε λειτουργία;

(β) Και οι δύο συσκευές είναι σε λειτουργία;

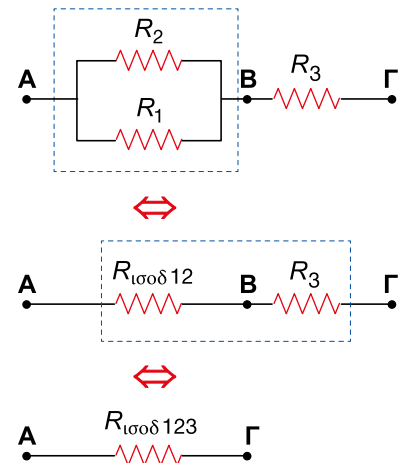
8.10.5. Γιατί οι οικιακές συσκευές συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο ενός σπιτιού;

8.10.6. Τι κίνδυνο διατρέχει το δίκτυο ενός σπιτιού, όταν πολλές συσκευές λειτουργούν ταυτόχρονα;

Σύνθετη Συνδεσμολογία Αντιστατών

Σε ένα κύκλωμα, είναι δυνατόν κάποιοι αντιστάτες να είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, και κάποιοι παράλληλα. Είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη συνολική ισοδύναμη αντίσταση, χωρίζοντας τους αντιστάτες σε ομάδες παράλληλης συνδεσμολογίας και συνδεσμολογίας σε σειρά.

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει ένα σχετικό παράδειγμα. Ανάμεσα στα σημεία **A** και **B** ενός κυκλώματος υπάρχουν δύο αντιστάτες R_1 και R_2 ,



που συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Το ζευγάρι των R_1 και R_2 συνδέεται σε σειρά με έναν τρίτο αντιστάτη R_3 .

Για να υπολογίσουμε τη **συνολική ισοδύναμη αντίσταση** ανάμεσα στα σημεία **A** και **Γ**, εργαζόμαστε ως εξής:

1. Θεωρούμε πρώτα το ζεύγος παράλληλα συνδεδεμένων αντιστάτων R_1 και R_2 . Η ισοδύναμη αντίσταση του ζεύγους είναι:

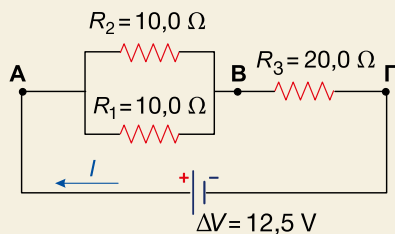
$$\frac{1}{R_{\text{ισοδ},12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{\text{ισοδ},12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

2. Φανταζόμαστε ότι ο ισοδύναμος αντιστάτης $R_{\text{ισοδ},12}$ είναι συνδεδεμένος σε σειρά με τον R_3 . Άρα, η συνολική ισοδύναμη αντίσταση είναι:

$$R_{\text{ισοδ},123} = R_{\text{ισοδ},12} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

Παράδειγμα

Θα υπολογίσουμε το ρεύμα έντασης I που διαρρέει το κύκλωμα του επόμενου σχήματος, και τη διαφορά δυναμικού στα άκρα των αντιστατών.



Η ισοδύναμη αντίσταση των 1 και 2 είναι

$$R_{\text{ισοδ},12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(10,0 \Omega) \times (10,0 \Omega)}{(20,0 \Omega)} = 5,00 \Omega$$

Η συνολική ισοδύναμη αντίσταση είναι:

$$R_{\text{ισοδ},123} = R_{\text{ισοδ},12} + R_3 = (5,0 \Omega) + (20,0 \Omega) = 25,0 \Omega$$

Άρα, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα:

$$I = \Delta V / R_{\text{ισοδ},123} = (12,5 \text{ V}) / (25,0 \Omega) = 0,500 \text{ A}$$

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων **A** και **B** είναι:

$$\Delta V_{AB} = I R_{\text{ισοδ},12} = (0,500 \text{ A}) \times (5,00 \Omega) = 2,50 \text{ V}$$

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των **B** και **Γ** είναι:

$$\Delta V_{B\Gamma} = I R_3 = (0,500 \text{ A}) \times (20,0 \Omega) = 10,0 \text{ V}$$

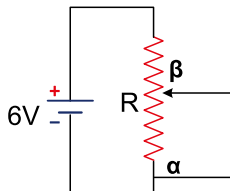
Το άθροισμα των δύο διαφορών δυναμικού ισούται με τη συνολική διαφορά δυναμικού της πηγής (12,5 V), όπως θα έπρεπε.

Σημείωση

Η πιο πάνω συνδεσμολογία είναι παράδειγμα χρήσης του **διαιρέτη τάσης**, τον οποίο συζητήσαμε στην **Ενότητα 8-9**. Ο διαιρέτης τάσης μπορεί να αποτελείται από την πηγή και τους αντιστάτες R_1 και R_3 . Εάν παρεμβάλλουμε μία συσκευή αντίστασης R_2 ανάμεσα στα σημεία A και B, η διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής θα είναι $\Delta V_{AB} < \Delta V_{AG}$.

➔ Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.10.7. Στα άκρα **α** και **β** του διαιρέτη τάσης του διπλανού σχήματος, η διαφορά δυναμικού είναι 3 V. Η ολική αντίσταση του αντιστάτη είναι 100 Ω.



- (α) Ποια είναι η αντίσταση του τμήματος α-β του αντιστάτη;
- (β) Ποια θα είναι η ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ των α και β, εάν ενωθεί παράλληλα σε αυτά ένας αντιστάτης 50 Ω;
- (γ) Ποια θα είναι η νέα διαφορά δυναμικού μεταξύ των α και β;

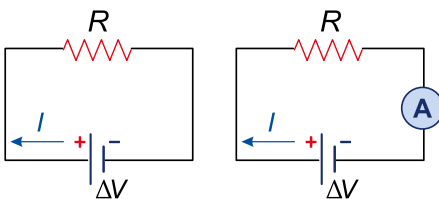
Ερωτήσεις

- 1 Πώς μπορούμε να διαπιστώσουμε εάν οι προβολείς ενός αυτοκινήτου είναι συνδεδεμένοι παράλληλα ή σε σειρά;
- 2 Ένα κύκλωμα περιλαμβάνει ένα αριθμό όμοιων λαμπτήρων, που φωτοβολούν το ίδιο. Ποιος είναι ο πιο γρήγορος τρόπος για να διαπιστώσουμε εάν οι λαμπτήρες είναι συνδεδεμένοι παράλληλα ή σε σειρά στο κύκλωμα;
- 3 Αν σε ένα κύκλωμα συνδεσμολογίας πολλών λαμπτήρων σε σειρά καεί ένας λαμπτήρας, πώς μεταβάλλεται το ρεύμα στους υπόλοιπους λαμπτήρες;
- 4 Μία λάμπα δαπέδου και ένα ραδιόφωνο είναι συνδεδεμένα με ένα πολύριζο. Η λάμπα είναι αναμμένη και το ραδιόφωνο είναι κλειστό. Εάν ανάψουμε το ραδιόφωνο, πώς μεταβάλλεται το ρεύμα, που διαρρέει τη λάμπα; Πώς μεταβάλλεται το ρεύμα, που διαρρέει το πολύριζο;

- 5 Πώς πρέπει να συνδέσουμε δύο αντιστάτες, έτσι ώστε η ισοδύναμη αντίσταση να είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση του κάθε αντιστάτη ξεχωριστά;
- 6 Ένα κύκλωμα περιέχει μία πηγή και έναν αντιστάτη και διαρρέεται από ρεύμα. Πώς πρέπει να συνδέσουμε έναν δεύτερο αντιστάτη, για να ελαττωθεί το ρεύμα;
- 7 Ένα κύκλωμα περιέχει πολλούς λαμπτήρες σε σειρά. Να εξηγήσετε τι θα συμβεί στην ένταση του φωτός κάθε λαμπτήρα, αν προστεθούν στο κύκλωμα και άλλοι λαμπτήρες σε σειρά.
- 8 Πώς πρέπει να συνδέσουμε δύο αντιστάτες, ώστε η ισοδύναμη αντίσταση να είναι μικρότερη από την αντίσταση του κάθε αντιστάτη ξεχωριστά;
- 9 Ένα κύκλωμα περιέχει πολλούς λαμπτήρες σε παράλληλη συνδεσμολογία. Πώς θα μεταβληθεί η ένταση του φωτός κάθε λαμπτήρα, αν συνδεθούν στο κύκλωμα και άλλοι λαμπτήρες παράλληλα; Τι κίνδυνος υπάρχει για το κύκλωμα;
- 10 (α) Ένα κύκλωμα περιέχει δύο λαμπτήρες σε σειρά. Εάν ο ένας λαμπτήρας διαρρέεται από ρεύμα έντασης 1 A, ποια ένταση ρεύματος διαρρέει τον δεύτερο; Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.
 (β) Στα άκρα του συστήματος των δύο λαμπτήρων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού 6 V. Αν η διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός λαμπτήρα είναι 2 V να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του δεύτερου λαμπτήρα.
- 11 Ένα κύκλωμα περιέχει δύο λαμπτήρες συνδεδεμένους παράλληλα. Εάν η διαφορά δυναμικού στα άκρα ενός λαμπτήρα είναι 6 V πόση είναι η διαφορά δυναμικού στα άκρα του δεύτερου λαμπτήρα;

8.11. Εφαρμογές της Συνδεσμολογίας Αντιστατών

Μετρούμε την ένταση ρεύματος ενός αγωγού, συνδέοντας σε σειρά ένα αμπερόμετρο **A**.



A. Όργανα Μέτρησης της Έντασης Ρεύματος και της Διαφοράς Δυναμικού

Μέτρηση της Έντασης του Ρεύματος

Η ένταση του ρεύματος προσδιορίζεται με τη βοήθεια ενός οργάνου που ονομάζεται **αμπερόμετρο**.

Η διπλανή εικόνα απεικονίζει ένα κύκλωμα, που περιέχει έναν αντιστάτη R συνδεδεμένο με πηγή ΔV . Ο αντιστάτης διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I = \Delta V / R$. **Αυτή την τιμή επιθυμούμε να προσδιορίσουμε με το αμπερόμετρο.** Το αμπερόμετρο πρέπει να έχει **αμελητέα αντίσταση**, για να μη μεταβάλλει την ένταση I του ρεύματος, που ήδη ρέει στο κύκλωμα.

Απόδειξη

Συνδέουμε το αμπερόμετρο **σε σειρά** με τον αντιστάτη, οπότε η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος γίνεται $R + R_{\text{αμπ}}$. Η νέα ένταση ρεύματος είναι:

$$I' = \frac{\Delta V}{R + R_{\text{αμπ}}}$$

Προκειμένου το αμπερόμετρο να μην επηρεάζει την τιμή της έντασης του ρεύματος που μετρά, πρέπει να έχει **αμελητέα αντίσταση**:

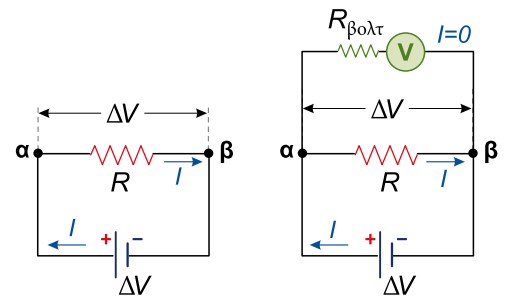
$$R_{\text{αμπ}} \cong 0 \Rightarrow R + R_{\text{αμπ}} \cong R \Rightarrow I' \cong \frac{\Delta V}{R} = I$$

Μέτρηση της Διαφοράς Δυναμικού ανάμεσα σε δύο Σημεία Κυκλώματος

Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία προσδιορίζεται με τη βοήθεια ενός οργάνου που ονομάζεται **βολτόμετρο**.

Η διπλανή εικόνα απεικονίζει ένα κύκλωμα που αποτελείται από πηγή, έναν αντιστάτη R και βολτόμετρο. Πριν συνδεθεί το βολτόμετρο στο κύκλωμα (**αριστερό σχήμα**), η ένταση του ρεύματος στον αντιστάτη είναι $I = \frac{\Delta V}{R}$ και η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι ΔV . **Αυτή τη διαφορά δυναμικού θέλουμε να μετρήσουμε.**

Μετρούμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία α και β , συνδέοντας παράλληλα ένα βολτόμετρο V .



Συνδέουμε το βολτόμετρο **παράλληλα** με τα άκρα α και β (**δεξί σχήμα**). Το βολτόμετρο πρέπει να έχει τεράστια αντίσταση, για να διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα.

Έτσι, όλο το ρεύμα I διέρχεται από τον αντιστάτη R και το βολτόμετρο μετρά τη σωστή διαφορά δυναμικού, IR , μεταξύ των α και β .

Απόδειξη

Έστω ότι η αντίσταση του βολτομέτρου είναι $R_{\text{βολτ}}$. Η ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ των α και β γίνεται:

$$R_{\text{ισοδ, αβ}} = \frac{RR_{\text{βολτ}}}{R + R_{\text{βολτ}}}$$

Εάν το βολτόμετρο έχει **τεράστια αντίσταση**, $R_{\text{βολτ}} \gg R$, η ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ των α και β παραμένει αμετάβλητη, σαν να μην υπήρχε το βολτόμετρο:

$$R_{\text{ισοδ, αβ}} = \frac{RR_{\text{βολτ}}}{R_{\text{βολτ}}} = R$$

Το κύκλωμα διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα με πριν. Όλο αυτό το ρεύμα περνά από τον αντιστάτη R . Το βολτόμετρο μετρά τη σωστή διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη, $\Delta V = IR$.

Συνοψίζουμε:

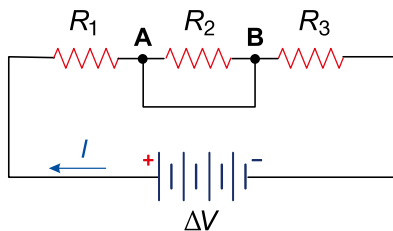
- Το **αμπερόμετρο** έχει **αμελητέα αντίσταση**, και συνδέεται **σε σειρά** με τον αγωγό, του οποίου την ένταση ρεύματος επιθυμούμε να προσδιορίσουμε.
- Το **βολτόμετρο** έχει **τεράστια αντίσταση**, και συνδέεται **παράλληλα** με τα σημεία, των οποίων τη διαφορά δυναμικού επιθυμούμε να προσδιορίσουμε.

B. Το Βραχυκύκλωμα

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα, που μπορεί να προκύψει σε ένα κύκλωμα, είναι η δημιουργία μίας αγωγίμης διαδρομής με πολύ μικρή αντίσταση, που προκαλεί αύξηση του ρεύματος. Η διαδρομή αυτή ονομάζεται **βραχυκύκλωμα**, και απεικονίζεται στην **Εικόνα 8-11**.

Εικόνα 8-11

Η σύνδεση των σημείων A και B με έναν αγωγό μικρής αντίστασης δημιουργεί βραχυκύκλωμα.



Στο κύκλωμα της **Εικόνας 8-11** υπάρχουν τρεις οικιακές συσκευές, συνδεδεμένες σε σειρά. Η συνολική αντίσταση είναι $R_{\text{ισοδ}} = R_1 + R_2 + R_3$, και το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα:

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{ισοδ}}} = \frac{\Delta V}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Εάν τα άκρα A και B της συσκευής R_2 συνδεθούν με ένα αγωγίμο σύρμα αμελητέας αντίστασης $R_{\text{συν}} \cong 0$, η **ισοδύναμη** αντίσταση μεταξύ των A και B μηδενίζεται:

$$R_{\text{ισοδ, AB}} = \frac{R_{\text{συν}} R_2}{R_{\text{συν}} + R_2} \cong 0$$

και η συνολική ισοδύναμη αντίσταση ελαττώνεται:

$$R'_{\text{ισοδ}} = R_1 + R_3$$

Γι' αυτό το λόγο, το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα αυξάνεται:

$$I' = \frac{\Delta V}{R'_{\text{ισοδ}}} = \frac{\Delta V}{R_1 + R_3} > I$$

Υπάρχει πιθανότητα κάποια από τις συσκευές R_1 και R_3 να υπερθερμανθεί και να καταστραφεί.

Εξαιτίας της μικρής αντίστασης του σύρματος, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα A και B γίνεται περίπου ίση με μηδέν

$$V_A - V_B = IR_{\text{ισοδ, AB}} \cong 0$$

Άρα, η αντίσταση R_2 διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα. Όλο το ρεύμα διέρχεται από το σύρμα.

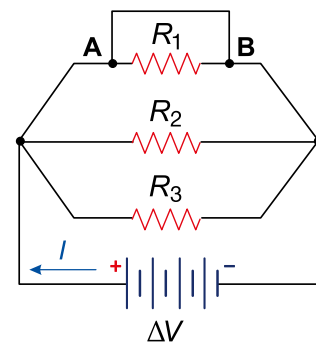
Σε μία παράλληλη σύνδεση, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στα οικιακά δίκτυα, το βραχυκύκλωμα μπορεί να έχει σοβαρότερες συνέπειες. Στο κύκλωμα της **Εικόνας 8-12**, ο αντιστάτης R_1 βραχυκυκλώνεται με ένα κομμάτι σύρματος. Επειδή η ισοδύναμη αντίσταση μίας παράλληλης συνδεσμολογίας είναι μικρότερη και από τη μικρότερη αντίσταση, **συμπεραίνουμε ότι η αντίσταση μεταξύ των A και B μηδενίζεται:**

$$R_{\text{ισοδ, AB}} < R_{\text{συν}} \cong 0 \Rightarrow R_{\text{ισοδ, AB}} \cong 0$$

Η ένταση ρεύματος, που διαρρέει τον αντιστάτη R_1 , και η συνολική ένταση I αποκτούν μεγάλες τιμές. Αν προκληθεί βραχυκύκλωμα σε ένα από τα κυκλώματα μιας οικιακής ηλεκτρικής εγκατάστασης, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται και οι αγωγοί του κυκλώματος υπερθερμαίνονται. Από την υπερθέρμανση είναι δυνατόν να υπάρξει πυρκαγιά ή να καούν οι αγωγοί.

Εικόνα 8-12

Η σύνδεση των σημείων A και B δημιουργεί βραχυκύκλωμα.



Γ. Ασφάλειες

Για να παρεμποδισθεί η ροή ρεύματος υπερβολικά μεγάλης έντασης σε ένα κύκλωμα, συνδέουμε σε σειρά στο κύκλωμα ειδικές διατάξεις, που ονομάζονται **ασφάλειες**.

Μία αυτόματη ασφάλεια είναι κατασκευασμένη από μέταλλο με χαμηλό σημείο τήξης. Εάν από βραχυκύκλωμα ή υπερκατανάλωση η ένταση του ρεύματος υπερβεί μία μέγιστη τιμή (π.χ. 10 A), η ασφάλεια υπερθερμαίνεται και τήκεται, διακόπτοντας το κύκλωμα. Πριν αντικατασταθεί μια καμένη ασφάλεια πρέπει να αντιμετωπιστεί το αίτιο της υπερφόρτωσης.

Στα σύγχρονα κτίρια, χρησιμοποιούνται ασφάλειες που δεν καταστρέφονται, όταν το ρεύμα υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή. Οι ασφά-

Τηκόμενες ασφάλειες



Αυτόματοι διακόπτες



λεις αυτές λειτουργούν σαν αυτόματοι διακόπτες: περιέχουν μαγνήτες ή διμεταλλικά ελάσματα, τα οποία διακόπτουν το κύκλωμα, εάν χρειασθεί.

Δ. Ηλεκτροπληξία

Το ανθρώπινο σώμα είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και υφίσταται ηλεκτροπληξία, όταν το διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα.

Επιπτώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα.	
Ένταση Ρεύματος	Επίπτωση
0,001 A	Γίνεται αισθητό
0,005 A	Πόνος
0,010 A	Μυϊκοί σπασμοί
0,015 A	Απώλεια ελέγχου μυών
0,070 A	Καρδιακή προσβολή

Για να διαρρέεται το σώμα από ηλεκτρικό ρεύμα, πρέπει να υπάρχει διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία του σώματος. Το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος διέρχεται από τη διαδρομή μικρότερης αντίστασης.

Η ηλεκτροπληξία μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση των ιστών του σώματος και διαταραχή της φυσιολογικής λειτουργίας του νευρικού συστήματος και των μυών. Επιπτώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος αναγράφονται στον διπλανό πίνακα (Πηγή: Paul Hewitt, **Conceptual Physics**).

Η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα, εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού και την ηλεκτρική αντίσταση του σώματος. Η αντίσταση του **στεγνού δέρματος** είναι της τάξης των $10^5 \Omega$. Εάν αγγίξουμε τους πόλους μίας μπαταρίας με διαφορά δυναμικού 9 V προκαλείται στο σώμα μας ροή ρεύματος έντασης 0,00009 A. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή, και το ρεύμα δεν είναι επικίνδυνο για το σώμα μας. Εάν στο σώμα μας εφαρμοσθεί διαφορά δυναμικού 220 V, συγκρίσιμη με τη διαφορά δυναμικού στην καλωδίωση των κατοικιών, η ένταση του ρεύματος γίνεται περίπου 24 φορές μεγαλύτερη (0,00022 A).

Το **βρεγμένο δέρμα** έχει σημαντικά μικρότερη αντίσταση, η οποία επιτρέπει να διέρχεται ρεύμα μεγαλύτερης έντασης και αυξάνει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Εάν το σώμα είναι ιδρωμένο ή υγρό, ή σε επαφή με μία υγρή επιφάνεια, ο κίνδυνος θανατηφόρας ηλεκτροπληξίας μεγαλώνει σημαντικά. **Όταν κάνουμε μπάνιο, δεν πρέπει σε καμιά απολύτως περίπτωση να χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές συσκευές.**

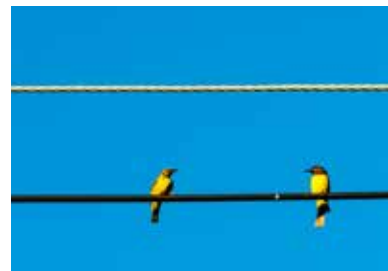
Όταν κάποιος πάθει ηλεκτροπληξία, **δεν** τον αγγίζουμε. Διακόπτουμε την παροχή ρεύματος. Στη συνέχεια, ενδεχομένως θα χρειασθεί να του παρασχεθεί καρδιοαναπνευστική ανάνηψη και ιατρική βοήθεια.

Οι περισσότεροι ρευματοδότες (πρίζες) έχουν τρεις υποδοχές. Οι δύο υποδοχές συνδέονται με το ενεργό καλώδιο, το οποίο μεταφέρει το ρεύμα, και ένα ουδέτερο καλώδιο, με διαφορά δυναμικού ΔV από το ενεργό. Η τρίτη υποδοχή (γείωση) συνδέεται με ένα σύρμα, το οποίο είναι σε επαφή με το έδαφος («προσγειωμένο»).



Εάν το μεταλλικό περίβλημα μίας συσκευής έρθει σε επαφή με το ενεργό καλώδιο, και η πρίζα δεν έχει γείωση, το περίβλημα αποκτά το ίδιο δυναμικό με το ενεργό καλώδιο. Εάν αγγίξουμε μία τέτοια συσκευή, διατρέχουμε τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Εάν η συσκευή είναι γειωμένη μέσω του τρίτου ακροδέκτη, το κάλυμμα θα έχει συνεχώς το δυναμικό της Γης, όπως και το σώμα του ανθρώπου. Έτσι, ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας αποσοβείται.

Τα πουλιά μπορούν να κάθονται σε καλώδια υψηλής τάσης (διαφοράς δυναμικού) χωρίς να διατρέχουν κίνδυνο. Ένα καλώδιο υψηλής τάσης έχει **μικρή αντίσταση** ανά μονάδα μήκους, και διαρρέεται από ρεύμα χαμηλής έντασης I .



Εάν ένα πουλί αγγίζει με τα πόδια του δύο σημεία **στο ίδιο** καλώδιο, η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα πόδια του είναι πολύ μικρή: Εάν η αντίσταση του καλωδίου ανάμεσα στα σημεία είναι R , η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα πόδια του πουλιού είναι $\Delta V = IR \approx 0$.

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Ο ρόλος της ηλεκτρικής πηγής είναι να τροφοδοτεί το κύκλωμα με ελεύθερα ηλεκτρόνια.	
2	Στο εσωτερικό μίας ηλεκτρικής πηγής, οι θετικοί φορείς κινούνται από τον θετικό προς τον αρνητικό πόλο, και οι αρνητικοί φορείς από τον αρνητικό προς τον θετικό.	
3	Στο μηχανικό ανάλογο του κυκλώματος, το αντίστοιχο της πηγής είναι η αντλία νερού, επειδή:	
α	Τροφοδοτεί το κύκλωμα με νερό.	
β	Κινεί το νερό αντίθετα προς το βαρυτικό πεδίο (το ανεβάζει σε υψηλότερο βαρυτικό δυναμικό).	

4	Το ηλεκτρικό δυναμικό σε έναν αγωγό πέφτει, καθώς κινούμαστε με τη συμβατική φορά του ρεύματος.	
5	Ο ροοστάτης ελέγχει την ένταση του ρεύματος σε ένα κύκλωμα, επειδή μεταβάλλει τη διαφορά δυναμικού της πηγής.	
6	Ο διαιρέτης τάσης ρυθμίζει τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία ενός κυκλώματος.	
7	Στη συνδεσμολογία αντιστατών σε σειρά:	
α	Όλοι οι αντιστάτες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.	
β	Όλοι οι αντιστάτες έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού.	
γ	Η συνολική αντίσταση είναι πιο μεγάλη από τη μεγαλύτερη αντίσταση της συνδεσμολογίας.	
δ	Κάθε φορά που προστίθεται ένας νέος αντιστάτης, το ρεύμα της συνδεσμολογίας ελαττώνεται.	
ε	Εάν ένας αντιστάτης καεί, λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης για όλη τη συνδεσμολογία.	
8	Εάν δύο αντιστάτες διαρρέονται από ρεύμα ίσης έντασης, είναι συνδεδεμένοι σε σειρά.	
9	Στην παράλληλη συνδεσμολογία αντιστατών:	
α	Όλοι οι αντιστάτες έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα τους.	
β	Όλοι οι αντιστάτες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα.	
γ	Η ισοδύναμη αντίσταση είναι πιο μικρή και από τη μικρότερη αντίσταση της συνδεσμολογίας.	
δ	Κάθε φορά που προστίθεται ένας νέος παράλληλος αντιστάτης, το ρεύμα των υπόλοιπων αντιστατών ελαττώνεται.	
ε	Κάθε φορά που προστίθεται ένας νέος παράλληλος αντιστάτης, το συνολικό ρεύμα της συνδεσμολογίας αυξάνεται.	
στ	Εάν ένας αντιστάτης καεί, συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης για όλη τη συνδεσμολογία.	
10	Ένα αμπερόμετρο συνδέεται σε σειρά με τον αγωγό, του οποίου μετρά το ρεύμα.	

11	Ένα αμπερόμετρο έχει μικρή αντίσταση, για να μην επηρεάζει το ρεύμα που πρόκειται να μετρήσει.	
12	Ένα βολτόμετρο συνδέεται παράλληλα στα σημεία, τη διαφορά δυναμικού των οποίων πρόκειται να μετρήσει.	
13	Ένα βολτόμετρο έχει μεγάλη αντίσταση για να:	
α	Μηδενίζει τη συνολική ένταση του ρεύματος σε όλο το κύκλωμα.	
β	Διαρρέεται από ρεύμα ελάχιστης έντασης.	
14	Το βραχυκύκλωμα είναι μία αγώγιμη διαδρομή μικρής αντίστασης, από όπου διέρχεται ρεύμα υψηλής έντασης.	
15	Όταν προκαλείται βραχυκύκλωμα σε ένα κύκλωμα, το ρεύμα διακόπτεται.	
16	Μία ασφάλεια διατηρεί σταθερή την ένταση ρεύματος σε ένα κύκλωμα.	
17	Επιλέγουμε μία ασφάλεια, έτσι ώστε η ένταση ρεύματος σε ένα κύκλωμα να είναι μεγαλύτερη από μία συγκεκριμένη τιμή.	

Ερωτήσεις

- 1 Πώς μπορεί να προκληθεί ένα βραχυκύκλωμα;
- 2 Ποιος είναι ο ρόλος μιας ασφάλειας, ή ενός αυτόματου διακόπτη κυκλώματος;
- 3 Πώς λειτουργούν οι συνηθισμένες ασφάλειες τήξης;
- 4 Τι είναι αυτό που προκαλεί ηλεκτροπληξία, το ηλεκτρικό ρεύμα ή η διαφορά δυναμικού;
- 5 **(α)** Γιατί ένα πουλί μπορεί να κάθεται σε ένα καλώδιο υψηλής τάσης, χωρίς να παθαίνει ηλεκτροπληξία;
(β) Γιατί στον καθορισμό της απόστασης μεταξύ των παράλληλων καλωδίων μίας γραμμής μεταφοράς, λαμβάνεται υπόψη το άνοιγμα των φτερών των πουλιών;
- 6 Ένας αλεξιπτωτιστής προσγειώνεται σε ένα καλώδιο υψηλής τάσης, και αρπάζει το σύρμα στην προσπάθειά του να διασωθεί. Θα πάθει ηλεκτροπληξία ο αλεξιπτωτιστής; Αν το σύρμα σπάσει, γιατί θα πρέπει ο αλεξιπτωτιστής να αφήσει το σύρμα καθώς πέφτει στο έδαφος;

Υπόδειξη

Ποια είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο χεριών του αλεξιπτωτιστή όταν κρατά το σύρμα; Ποια είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο καλώδιο και το έδαφος;

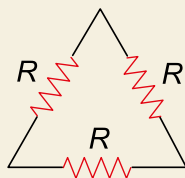
- 7 Όταν η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το ανθρώπινο σώμα, είναι μεγαλύτερη από 10 mA,

οι μύες των χεριών παθαίνουν σύσπαση και το θύμα δεν μπορεί να αφήσει το καλώδιο. Ποια διαδικασία θα χρησιμοποιούσατε για να προσπαθήσετε να σώσετε αυτόν τον άνθρωπο, χωρίς να θέσετε σε κίνδυνο τη δική σας ζωή;

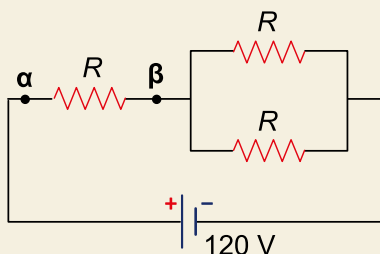
- 8 Οι επιβλαβείς συνέπειες της ηλεκτροπληξίας οφείλονται στην ποσότητα του ρεύματος που ρέει στο σώμα. Γιατί, επομένως, βλέπουμε πινακίδες που γράφουν «Κίνδυνος - υψηλή τάση» και όχι «Κίνδυνος - υψηλό ρεύμα»;
- 9 (α) Αν η ηλεκτρική αντίσταση του ανθρώπινου σώματος είναι 100000Ω πόσο ρεύμα διέρχεται από το σώμα ενός ανθρώπου, εάν αγγίξει τους ακροδέκτες μιας μπαταρίας 12 V ;
(β) Εάν το δέρμα είναι πολύ υγρό, η αντίσταση του σώματος μπορεί να ελαττωθεί σε 1000Ω . Πόσο ρεύμα διέρχεται από τον άνθρωπο, εάν αγγίξει τους ακροδέκτες της ίδιας μπαταρίας;
- 10 Γιατί δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές συσκευές όταν κάνουμε μπάνιο;

Ασκήσεις

- 1 Όταν δύο αντιστάτες συνδέονται σε σειρά, έχουν ολική ισοδύναμη αντίσταση 100Ω . Όταν οι ίδιοι αντιστάτες συνδέονται παράλληλα, έχουν ισοδύναμη αντίσταση 24Ω . Να υπολογίσετε τις αντιστάσεις τους.
- 2 Όταν δύο όμοιοι λαμπτήρες συνδέονται παράλληλα με τους πόλους μιας πηγής, διαρρέονται από ρεύμα έντασης $0,5 \text{ A}$. Να βρεθεί η ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει τους λαμπτήρες, αν συνδεθούν σε σειρά με την ίδια πηγή.



- 3 Τρεις πανομοιότυποι αντιστάτες R είναι συνδεδεμένοι σε τριγωνική διάταξη, όπως στο διπλανό σχήμα. Η ολική αντίσταση ανάμεσα σε δύο οποιεσδήποτε κορυφές του τριγώνου είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση με R ;

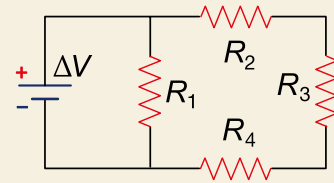


- 4 Να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού $V_{\alpha\beta}$ στο διπλανό κύκλωμα. Εξαρτάται αυτή η διαφορά από τις αντιστάσεις R ;

Στις επόμενες ερωτήσεις, προσπαθήστε να βρείτε την απάντηση χωρίς να χρησιμοποιήσετε μαθηματικές σχέσεις:

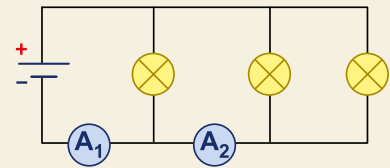
- 5 Μια μπαταρία διαφοράς δυναμικού ΔV συνδέεται με τέσσερις αντιστάσεις, όπως στο επόμενο σχήμα. Αν η αντίσταση R_4 αυξηθεί, πώς επηρεάζονται τα πιο κάτω μεγέθη;

- (α) Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_1 ;
- (β) Το ρεύμα που διαρρέει την R_1 ;
- (γ) Το ρεύμα που διαρρέει τις $R_2 - R_4$;
- (δ) Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της R_2 ;



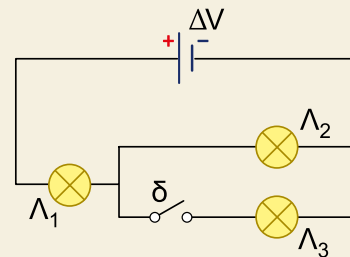
6 Οι τρεις λαμπτήρες του επόμενου κυκλώματος είναι πανομοιότυποι και φωτοβολούν κανονικά. Τα αμπερόμετρα έχουν αμελητέα εσωτερική αντίσταση. Αν καταστραφεί ένας από τους λαμπτήρες, τι θα συμβεί στην ένδειξη του αμπερομέτρου A_1 και στη φωτοβολία των δύο άλλων λαμπτήρων;

- i. Η ένδειξη αυξάνεται και η φωτοβολία αυξάνεται.
- ii. Η ένδειξη ελαττώνεται και η φωτοβολία ελαττώνεται.
- iii. Η ένδειξη ελαττώνεται και η φωτοβολία μένει η ίδια.
- iv. Η ένδειξη μένει η ίδια και η φωτοβολία μένει η ίδια.
- v. Η ένδειξη αυξάνεται και η φωτοβολία μένει η ίδια.



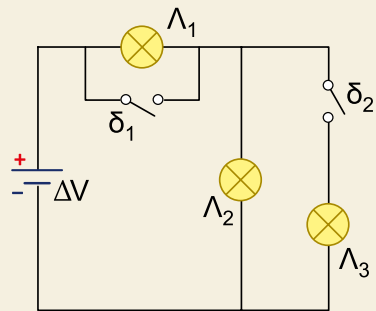
7 Οι τρεις λαμπτήρες του κυκλώματος του επόμενου σχήματος είναι πανομοιότυποι.

- (α) Να συγκρίνετε τη φωτοβολία του Λ_1 με τη φωτοβολία του Λ_2 , όταν ο διακόπτης δ είναι ανοικτός ή κλειστός.
- (β) Να εξηγήσετε πότε ο λαμπτήρας Λ_1 φωτοβολεί περισσότερο, με ανοικτό ή κλειστό τον διακόπτη δ ;



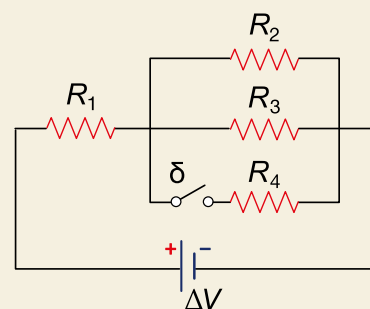
8 Στο επόμενο κύκλωμα, οι τρεις λαμπτήρες είναι πανομοιότυποι και συνδέονται με πηγή διαφοράς δυναμικού ΔV .

- (α) Να συγκρίνετε τη φωτοβολία των λαμπτήρων, όταν ο διακόπτης δ_1 είναι ανοικτός και ο δ_2 είναι κλειστός.
- (β) Πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία των Λ_1 και Λ_2 , αν ανοίξει και ο διακόπτης δ_2 ;
- (γ) Με τον διακόπτη δ_2 κλειστό, ποια επίπτωση θα έχει το κλείσιμο του δ_1 στη φωτοβολία κάθε λαμπτήρα;



9 Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από αντιστάτες, συνδεδεμένους όπως στο διπλανό σχήμα. Όταν κλείσει ο διακόπτης, το ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη R_1 :

- (α) ελαττώνεται,
- (β) αυξάνεται,
- (γ) παραμένει αμετάβλητο.



Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

8.12. Ηλεκτρική Ισχύς και Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε μία Συσσκευή

Όπως εξηγήσαμε στην αρχή του Κεφαλαίου, όταν στο εσωτερικό ενός αγωγού υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο \vec{E} οι ελεύθεροι φορείς φορτίου q κινούνται προσανατολισμένα υπό την επίδραση μίας ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}_{\eta\lambda} = q\vec{E}$. Η δύναμη αυτή παράγει έργο. Το συνολικό έργο της ηλεκτρικής δύναμης, κατά τη μετακίνηση ενός φορέα φορτίου μεταξύ δύο σημείων A και B με δυναμικά V_A και V_B , υπολογίζεται από τη σχέση έργου - διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού:

$$W_{\eta\lambda} = q(V_A - V_B)$$

Έστω ότι σε χρονικό διάστημα Δt μετατοπίζονται N φορείς φορτίου από το σημείο A στο σημείο B. Το συνολικό φορτίο των φορέων είναι $Q_{\text{ολικό}} = Nq$. Το συνολικό έργο των ηλεκτρικών δυνάμεων, που δρουν στους φορείς, είναι ίσο με

$$W_{\eta\lambda \text{ ολικό}} = N W_{\eta\lambda} = N[q(V_A - V_B)] = (Nq)(V_A - V_B) = Q_{\text{ολικό}}(V_A - V_B)$$

Εάν διαιρέσουμε το συνολικό αυτό έργο με το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, υπολογίζουμε το **έργο ανά μονάδα χρόνου**:

$$\frac{W_{\eta\lambda \text{ ολικό}}}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{ολικό}}}{\Delta t} (V_A - V_B)$$

Το πηλίκο $Q_{\text{ολικό}}/\Delta t$ ισούται με το συνολικό φορτίο που διέρχεται από τα σημεία A και B ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή με την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό AB. Άρα, το έργο ανά μονάδα χρόνου γράφεται:

$$\frac{W_{\eta\lambda \text{ ολικό}}}{\Delta t} = I(V_A - V_B)$$

Το έργο δύναμης ανά μονάδα χρόνου αντιστοιχεί σε ένα νέο φυσικό μέγεθος, που ονομάζεται **ισχύς δύναμης**:

Ισχύς Δύναμης

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Η ισχύς συμβολίζεται με το γράμμα P από την αγγλική λέξη Power. Η μονάδα ισχύος ονομάζεται Watt (W). Από τον ορισμό της ισχύος προκύπτει ότι $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$.

Έστω ότι ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I . Κατά τη μετακίνηση των (θετικών) φορέων φορτίου από ένα σημείο A σε ένα σημείο B, με διαφορά δυναμικού $\Delta V = V_A - V_B > 0$, η ισχύς της ηλεκτρικής δύναμης υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση:

Γενική Έκφραση για την Ισχύ Ηλεκτρικής Δύναμης

$$P = I \Delta V$$

Η σχέση αυτή είναι **γενική**: Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται ανά μονάδα χρόνου, σε οποιαδήποτε συσκευή (ωμική και μη ωμική), ισούται με το γινόμενο της έντασης ρεύματος, που διαρρέει τη συσκευή, επί τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής.

Η ισχύς εκφράζεται σε μονάδες W, όπως πρέπει:

$$1 \text{ V A} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} \frac{\text{C}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ W}$$

Σημείωση

Εάν γνωρίζουμε την ισχύ μίας συσκευής, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που καταναλώνει η συσκευή σε χρονικό διάστημα λειτουργίας Δt , από τη σχέση:

$$E = P \Delta t$$

Μία χρήσιμη ποσότητα ενέργειας είναι η Κιλοβατώρα (kWh), η οποία ορίζεται ως **η ενέργεια που καταναλώνεται από μία συσκευή ισχύος 1 kW, σε μία ώρα λειτουργίας**.

Παράδειγμα 1

Στο κύκλωμα μίας οικίας είναι συνδεδεμένες διάφορες ηλεκτρικές συσκευές. Το κύκλωμα έχει διαφορά δυναμικού 220 V, και διαρρέεται από συνολικό ρεύμα 5,0 A. Ποιά είναι η συνολική ηλεκτρική ισχύς, που καταναλώνουν οι συσκευές;

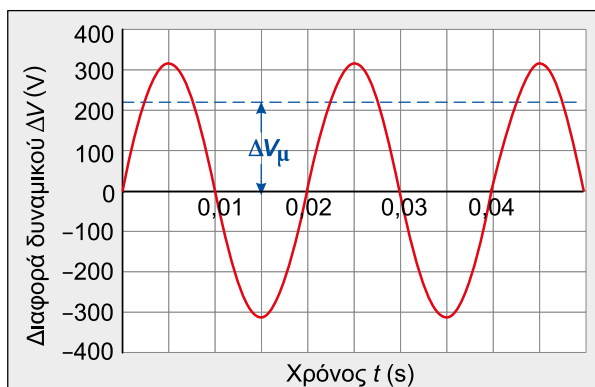
Από τη σχέση για την ισχύ, προκύπτει:

$$P = I \Delta V = (220 \text{ V}) \times (5,0 \text{ A}) = 1100 \text{ W}$$

Σημείωση

Στην πραγματικότητα, η διαφορά δυναμικού και η ένταση του ρεύματος, στο κύκλωμα μίας οι-

κίας, μεταβάλλονται με τον χρόνο. Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού απεικονίζεται στο πιο κάτω σχήμα. Η τιμή $\Delta V_{\mu} = 220 \text{ V}$ αντιστοιχεί στη **μέση διαφορά** δυναμικού.



Εάν γνωρίζουμε τη **μέση** διαφορά δυναμικού και τη **μέση** ένταση ρεύματος σε ένα κύκλωμα, υπολογίζουμε τη **μέση** ισχύ από την ίδια σχέση:

$$P_{\mu} = I_{\mu} \Delta V_{\mu}$$

Σε προβλήματα οικιακών κυκλωμάτων, αναφέρουμε τις μέσες τιμές διαφοράς δυναμικού και έντασης ρεύματος, και υπολογίζουμε τη μέση ισχύ.

Παράδειγμα 2

Στο κύκλωμα μίας οικίας είναι συνδεδεμένα ένα θερμαντικό σώμα ισχύος 1900 W και μία λάμπα δαπέδου ισχύος 360 W . Το κύκλωμα βρίσκεται σε μέση τάση 220 V . Ποιά είναι η μέση ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα;

Κάθε συσκευή βρίσκεται σε διαφορά δυναμικού 220 V . Η ένταση ρεύματος, που διαρρέει το θερμαντικό σώμα, είναι:

$$I_1 = \frac{P}{\Delta V} = \frac{1900 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 8,6 \text{ A}$$

Η ένταση ρεύματος, που διαρρέει τη λάμπα δαπέδου, είναι:

$$I_2 = \frac{P}{\Delta V} = \frac{360 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 1,6 \text{ A}$$

Το συνολικό ρεύμα είναι

$$8,6 \text{ A} + 1,6 \text{ A} = 10,2 \text{ A}$$

Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.12.1. Στο δίκτυο ενός σπιτιού είναι συνδεδεμένες παράλληλα διάφορες συσκευές. Ποια συσκευή καταναλώνει μεγαλύτερη ισχύ:

- (α) Αυτή που διαρρέεται από μεγαλύτερη ένταση ρεύματος.
- (β) Αυτή που έχει μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού στα άκρα της.

Μετατροπή Ηλεκτρικής Ενέργειας σε άλλες Μορφές Ενέργειας

Όταν ένα σύρμα σταθερής διατομής διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , οι ελεύθεροι φορείς φορτίου μετακινούνται με σταθερή μέση ταχύτητα, ίση με την **ταχύτητα ολίσθησης**. Συνεπώς, η μέση κινητική ενέργεια των φορέων φορτίου παραμένει σταθερή.

Με βάση το **θεώρημα έργου - κινητικής ενέργειας**, το έργο της συνισταμένης δύναμης σε έναν φορέα φορτίου ισούται με τη μεταβολή στην κινητική του ενέργεια:

$$W_{\Sigma \vec{F}} = \Delta E_{\text{κιν}} = 0$$

Άρα, το συνολικό έργο των δυνάμεων, που δρουν σε έναν φορέα φορτίου, είναι μηδενικό. Αν ονομάσουμε $\vec{F}_{\eta\lambda}$ την ηλεκτρική δύναμη λόγω του πεδίου που προκαλεί το ρεύμα, και $\Sigma \vec{F}_{\text{υπολ}}$ τη συνισταμένη των υπολοίπων δυνάμεων μεταξύ του φορέα και του υλικού της συσκευής, συμπεραίνουμε:

$$W_{\vec{F}_{\eta\lambda}} + W_{\Sigma \vec{F}_{\text{υπολ}}} = 0 \Rightarrow W_{\Sigma \vec{F}_{\text{υπολ}}} = -W_{\vec{F}_{\eta\lambda}}$$

Άρα, το έργο των υπολοίπων δυνάμεων είναι αντίθετο από το έργο της ηλεκτρικής δύναμης. Τελικά, το έργο της ηλεκτρικής δύναμης μετατρέπεται σε διάφορες μορφές ενέργειας, που εξαρτώνται από τη συσκευή. Για παράδειγμα, στον ηλεκτρικό κινητήρα το έργο της ηλεκτρικής δύναμης μετατρέπεται εν μέρει σε κινητική ενέργεια του κινητήρα, και εν μέρει σε εσωτερική ενέργεια της συσκευής και του κυκλώματος.

Σε έναν **αντιστάτη**, η ηλεκτρική ενέργεια των φορέων φορτίου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των φορέων φορτίου και σε εσωτερική ενέργεια του μετάλλου. Η θερμοκρασία του αντιστάτη αυξάνεται. Η

ηλεκτρική ενέργεια, που καταναλώνεται ανά μονάδα χρόνου στον αντιστάτη, ισούται με $P = I\Delta V$. Χρησιμοποιώντας τη σχέση έντασης ρεύματος - διαφοράς δυναμικού, μπορούμε να γράψουμε την κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου στις πιο κάτω εναλλακτικές μορφές, **για την περίπτωση ενός αντιστάτη**:

Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Μονάδα Χρόνου σε Αντιστάτη

$$P = I\Delta V = I^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

Οι σχέσεις αυτές εφαρμόζονται ως εξής:

- Εάν γνωρίζουμε **τη διαφορά δυναμικού** στα άκρα του αντιστάτη (π.χ. σε μία παράλληλη συνδεσμολογία), χρησιμοποιούμε τη σχέση $P = (\Delta V)^2/R$.
- Εάν γνωρίζουμε **την ένταση ρεύματος** που διαρρέει τον αντιστάτη (π.χ. το συνολικό ρεύμα σε μία συνδεσμολογία σε σειρά), χρησιμοποιούμε τη σχέση $P = I^2 R$.
- Εάν γνωρίζουμε τη διαφορά δυναμικού και την ισχύ λειτουργίας του αντιστάτη, μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση ρεύματος που τον διαρρέει: $I = P/\Delta V$.

Ένα μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας μεταφέρεται από τον αντιστάτη στο περιβάλλον, μέσω θερμικής επαφής με άλλα σώματα, δημιουργίας ρευμάτων αέρα που μεταφέρουν θερμότητα, και ακτινοβολίας. Εάν η θερμοκρασία του αντιστάτη είναι μικρή, η ακτινοβολία είναι υπέρυθρη (δεν είναι ορατή). Σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, ο αντιστάτης μπορεί να εκπέμπει φωτεινή ενέργεια, μέσω της παραγωγής ορατού φωτός. Αυτό παρατηρείται, στις σπείρες των θερμαντικών σωμάτων και στα σύρματα των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

Παράδειγμα 1

Λαμπτήρας Πυρακτώσεως

Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως ισχύος 75 W συνδέεται στο κύκλωμα ενός σπιτιού. Θα υπολογίσουμε την αντίσταση του λαμπτήρα και την ένταση ρεύματος που τον διαρρέει.

Ο λαμπτήρας είναι κατασκευασμένος για να καταναλώνει 75 W, όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα

του ισούται με $\Delta V = 220 \text{ V}$. Η αντίσταση του λαμπτήρα υπολογίζεται από τη σχέση ισχύος - διαφοράς δυναμικού:

$$P = (\Delta V)^2 / R \Rightarrow R = (\Delta V)^2 / P = (220 \text{ V})^2 / (75 \text{ W}) = 650 \Omega$$

Η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει τον λαμπτήρα, είναι:

$$I = P / \Delta V = (75 \text{ W}) / (220 \text{ V}) = 0,34 \text{ A}$$

Παράδειγμα 2

Λαμπήρες σε Σειρά

Δύο μικροί λαμπήρες 1 και 2, με αντιστάσεις $1,0 \Omega$ και $2,0 \Omega$, συνδέονται σε σειρά με μία μπαταρία διαφοράς δυναμικού $\Delta V = 6,0 \text{ V}$. Θα υπολογίσουμε την ισχύ που καταναλώνεται σε κάθε λαμπήρα.

Επειδή δεν γνωρίζουμε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα των λαμπήρων, ή το ρεύμα που τους διαρρέει, δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε απευθείας κάποια από τις σχέσεις της ισχύος. Θα υπολογίσουμε πρώτα την ένταση του ρεύματος.

Επειδή οι λαμπήρες συνδέονται σε σειρά, η ισοδύναμη αντίσταση του κυκλώματος είναι: $R_{\text{ισοδ}} = R_1 + R_2 = 3,0 \Omega$. Άρα, το ρεύμα, που διαρρέει το κύκλωμα, έχει ένταση:

$$I = \Delta V / R_{\text{ισοδ}} = (6,0 \text{ V}) / (3,0 \Omega) = 2,0 \text{ A}$$

Επειδή οι λαμπήρες συνδέονται σε σειρά, κάθε λαμπήρας διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα, έντασης $I = 2,0 \text{ A}$.

Στον λαμπήρα **1** καταναλώνεται ισχύς:

$$P_1 = I^2 R_1 = (2,0 \text{ A})^2 \times (1,0 \Omega) = 4,0 \text{ W}$$

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του λαμπήρα 1 είναι

$$\Delta V_1 = P_1 / I_1 = (4,0 \text{ W}) / (2,0 \text{ A}) = 2,0 \text{ V}$$

Ομοίως, στον λαμπήρα **2** καταναλώνεται ισχύς:

$$P_2 = I^2 R_2 = (2,0 \text{ A})^2 \times (2,0 \Omega) = 8,0 \text{ W}$$

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του λαμπήρα 2 είναι:

$$\Delta V_2 = P_2 / I_2 = (8,0 \text{ W}) / (2,0 \text{ A}) = 4,0 \text{ V}$$

Να παρατηρήσετε ότι στη σύνδεση **σε σειρά**, και οι δύο λαμπτήρες διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, αλλά στα άκρα του λαμπτήρα μεγαλύτερης αντίστασης υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού. Γι' αυτό, ο λαμπτήρας **μεγαλύτερης** αντίστασης καταναλώνει **περισσότερη** ισχύ (φωτοβολεί περισσότερο).

Παράδειγμα 3

Λαμπτήρες σε Παράλληλη Σύνδεση

Δύο λαμπτήρες 1 και 2, με αντιστάσεις 330 Ω και 4400 Ω, συνδέονται παράλληλα σε ένα φωτιστικό σώμα, το οποίο ενώνεται στο δίκτυο ενός σπιτιού. Θα υπολογίσουμε την ισχύ που καταναλώνεται σε κάθε λαμπτήρα.

Όταν το φωτιστικό λειτουργεί, η διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε λαμπτήρα ισούται με $\Delta V = 220 \text{ V}$. Στον λαμπτήρα **1** καταναλώνεται ισχύς:

$$P_1 = (\Delta V)^2 / R_1 = (220 \text{ V})^2 / (330 \text{ } \Omega) = 150 \text{ W}$$

Η ένταση ρεύματος στον λαμπτήρα **1** είναι:

$$I_1 = P_1 / \Delta V = (150 \text{ W}) / (220 \text{ V}) = 0,68 \text{ A}$$

Ομοίως, στον λαμπτήρα **2** καταναλώνεται ισχύς:

$$P_2 = (\Delta V)^2 / R_2 = (220 \text{ V})^2 / (440 \text{ } \Omega) = 110 \text{ W}$$

Η ένταση ρεύματος στον λαμπτήρα **2** είναι:

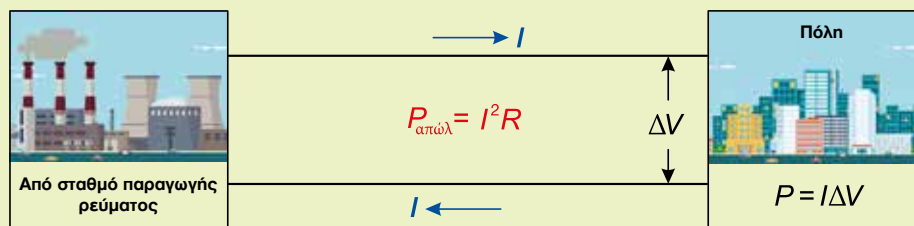
$$I_2 = P_2 / \Delta V = (110 \text{ W}) / (220 \text{ V}) = 0,50 \text{ A}$$

Να παρατηρήσετε ότι **στην παράλληλη σύνδεση** και οι δύο λαμπτήρες έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού στα άκρα τους, αλλά ο λαμπτήρας μικρότερης αντίστασης διαρρέεται από ρεύμα μεγαλύτερης έντασης. Γι' αυτό, ο λαμπτήρας **μικρότερης** αντίστασης καταναλώνει **περισσότερη** ισχύ (φωτοβολεί περισσότερο).

Οι Γραμμές Μεταφοράς Ρεύματος Υψηλής Τάσης (Διαφοράς Δυναμικού)

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον τόπο κατανάλωσης (π.χ. μία πόλη) με γραμμές πολύ υψηλής τάσης.

Για να καταλάβουμε γιατί δεν χρησιμοποιούνται γραμμές χαμηλής τάσης (λιγότερο επικίνδυνες), θα χρησιμοποιήσουμε ένα απλό παράδειγμα, στο οποίο το ρεύμα των γραμμών έχει σταθερή ένταση I .



Μία πόλη χρειάζεται συγκεκριμένη ηλεκτρική ισχύ P , για να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων της. Από τη σχέση

$$P = I\Delta V \Rightarrow I = \frac{P}{\Delta V}$$

συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά δυναμικού, τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη ένταση του ρεύματος στις γραμμές μεταφοράς.

Η απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας σε μία γραμμή μεταφοράς δίνεται από τη σχέση

$$P_{\text{απώλεια}} = I^2 R \Rightarrow P_{\text{απώλεια}} = \left(\frac{P}{\Delta V}\right)^2 R$$

όπου R είναι η συνολική αντίσταση της γραμμής. Άρα, όταν χρησιμοποιούνται γραμμές υψηλής τάσης, ελαττώνεται η ένταση του ρεύματος και η απώλεια ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Αν οι γραμμές είναι κυλινδρικές, διατομής S , μπορούμε να υπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους γραμμής:

$$P_{\text{απώλεια}} = \left(\frac{P}{\Delta V}\right)^2 \rho \frac{L}{S} \Rightarrow \frac{P_{\text{απώλεια}}}{L} = \frac{\rho}{S} \left(\frac{P}{\Delta V}\right)^2$$

Παράδειγμα

Εάν μία πόλη χρειάζεται $P = 100$ MW ισχύος, χρησιμοποιεί χάλκινα σύρματα μεταφοράς με ακτίνα 1 cm, και οι γραμμές μεταφοράς είναι σε τάση 500 kV, η απώλεια ανά μέτρο μήκους της γραμμής είναι:

$$\frac{P_{\text{απώλεια}}}{L} = \frac{1,6 \times 10^{-8} \Omega \text{m}}{3,14 \times 1 \times 10^{-4} \text{m}^2} \times \left(\frac{10^8 \text{ W}}{5 \times 10^5 \text{ V}}\right)^2 = \frac{1,6}{3,14 \times 25} \times 10^{-8+16+4-10} \frac{\text{W}}{\text{m}} = 2 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.12.1. Η σχέση $P = (\Delta V)^2/R$ δηλώνει ότι η ισχύς ελαττώνεται με την αντίσταση, ενώ η σχέση $P = I^2 R$ ότι η ισχύς αυξάνεται με την αντίσταση. Να εξηγήσετε γιατί δεν υπάρχει αντίφαση ανάμεσα στα δύο συμπεράσματα.

- 8.12.2.** Για να προκαλέσει μεγαλύτερη έκλυση θερμότητας ένας αντιστάτης, που συνδέεται με μία μπαταρία, πρέπει να έχει μεγάλη ή μικρή αντίσταση;
- 8.12.3.** Δύο λαμπτήρες ισχύος 75 W και 150 W είναι κατασκευασμένοι για να λειτουργούν συνδεδεμένοι **παράλληλα** στο δίκτυο ενός σπιτιού, με διαφορά δυναμικού 220 V.
(α) Ποιος λαμπτήρας έχει μεγαλύτερη αντίσταση;
(β) Ποιος λαμπτήρας διαρρέεται από ρεύμα μεγαλύτερης έντασης;
- 8.12.4.** Εάν οι δύο λαμπτήρες της ερώτησης **8.12.3.** συνδεθούν **σε σειρά** με μία πηγή διαφοράς δυναμικού 60 V ποιος από τους δύο λαμπτήρες θα φωτοβολεί πιο έντονα;
- 8.12.5.** Στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται χοντρά ή λεπτά σύρματα; Γιατί;

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **αιτιολογήσετε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

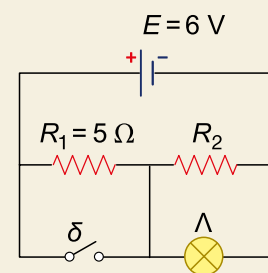
A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται σε μία συσκευή είναι ανάλογη με την ένταση του ρεύματος και με τη διαφορά δυναμικού, στην οποία λειτουργεί η συσκευή.	
2	Σε έναν αντιστάτη, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε εσωτερική κινητική (θερμική) και δυναμική ενέργεια.	
3	Η ηλεκτρική ισχύς, που καταναλώνεται σε έναν αντιστάτη, είναι πάντοτε ανάλογη με την αντίστασή του.	
4	Η ηλεκτρική ισχύς, που καταναλώνεται σε έναν αντιστάτη, είναι πάντοτε αντιστρόφως ανάλογη με την αντίστασή του.	
5	Οι γραμμές υψηλής τάσης:	
α	Έχουν μεγάλη αντίσταση, για να διαρρέονται από ρεύμα μικρής έντασης.	
β	Διαρρέονται από ρεύμα μικρής έντασης, για να έχουν μικρή απώλεια ισχύος.	



Ασκήσεις

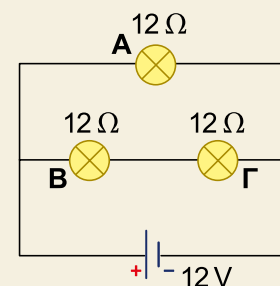
- 1 Η σπείρα ενός θερμαντικού σώματος ισχύος 1800 W είναι κατασκευασμένη από σίδηρο, και έχει μήκος 6,5 m. Εάν το θερμαντικό σώμα λειτουργεί υπό διαφορά δυναμικού 220 V, να υπολογίσετε τη διάμετρο της σπείρας.
- 2 Δύο αντιστάτες 1 και 2 καταναλώνουν την ίδια ηλεκτρική ισχύ, όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα του 1 είναι διπλάσια από τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του 2. Αν ο αντιστάτης 1 έχει αντίσταση 240 Ω να υπολογίσετε την αντίσταση του 2.
- 3 Ένα πιστολάκι μαλλιών με ισχύ 1200 W είναι συνδεδεμένο με μία πρίζα στην οικιακή τάση 220 V. Εάν η ασφάλεια που είναι τοποθετημένη στην πρίζα επιτρέπει ροή ρεύματος μέχρι 15 A το πιστολάκι θα λειτουργήσει;
- 4 Εάν μία κιλοβατώρα ενέργειας χρεώνεται 10 σεντ, πόσο κοστίζει η λειτουργία του στεγνωτήρα των 1200W επί μια ώρα;

- 5 Στο κύκλωμα της επόμενης εικόνας, ο λαμπτήρας Λ φέρει τις ενδείξεις 2,5 V και 0,75 W και λειτουργεί κανονικά, όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός. Να υπολογίσετε:



- (α) την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_1 .
 - (β) την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_2 .
 - (γ) την αντίσταση R_2 .
 - (δ) τι θα συμβεί στον λαμπτήρα, αν κλείσει ο διακόπτης; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.
- 6 Σε μια συσκευή αναγράφονται οι ενδείξεις «100 V, 50 W». Ποια αντίσταση πρέπει να συνδεθεί σε σειρά με τη συσκευή, ώστε να λειτουργεί κανονικά σε δίκτυο 220 V;
 - 7 Δύο όμοιες ηλεκτρικές θερμάστρες συνδέονται παράλληλα με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής και καταναλώνουν συνολική ισχύ 2 kW (η αντίστασή τους δε μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία). Πόση ισχύς καταναλώνεται, όταν οι δυο θερμάστρες συνδεθούν κατά σειρά με την ίδια πηγή;

- 8 Τρεις πανομοιότυποι λαμπτήρες αντίστασης 12 Ω είναι συνδεδεμένοι σε μία μπαταρία 12 V, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Να προσδιορίσετε:

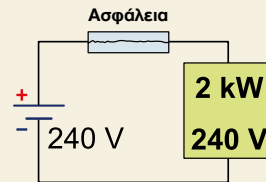


- (α) Το ρεύμα που διαρρέει κάθε λαμπτήρα.
- (β) Τη διαφορά δυναμικού στα άκρα κάθε λαμπτήρα.

- (γ) Την ισχύ που καταναλώνεται σε κάθε λαμπτήρα.
- (δ) Πώς μεταβάλλεται η ισχύς, που καταναλώνεται στον λαμπτήρα **A**, εάν ξεβιδώσουμε τον λαμπτήρα **B**;
- (ε) Πώς μεταβάλλεται η ισχύς, που καταναλώνεται στον λαμπτήρα **B**, εάν ξεβιδώσουμε τον λαμπτήρα **A**;

9 Ποια από τις πιο κάτω ασφάλειες είναι πιο κατάλληλη για το κύκλωμα του διπλανού σχήματος;

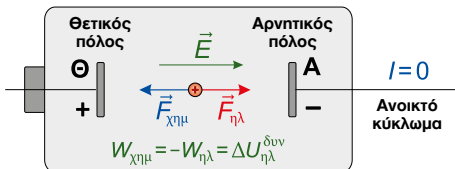
A: 5 A, **B:** 8 A, **Γ:** 10 A, **Δ:** 13 A, **Ε:** 30 A



8.13. Η Έννοια της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης Πηγής (ΗΕΔ)

Εικόνα 8-13

Στο εσωτερικό της πηγής, το ηλεκτρικό πεδίο αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων φορτίου. Όταν η πηγή δεν διαρρέεται από ρεύμα, το χημικό έργο, κατά τη μεταφορά ενός φορέα φορτίου μεταξύ των πόλων, είναι αντίθετο από το έργο της ηλεκτρικής δύναμης.



Στη συζήτηση της ηλεκτρικής πηγής στην Ενότητα **8.7**, είχαμε αναφέρει ότι χημικές αντιδράσεις ανάμεσα στους πόλους (ηλεκτρόδια) της πηγής και τον ηλεκτρολύτη φορτίζουν τους πόλους της πηγής.

Η **Εικόνα 8-13** απεικονίζει σχηματικά το εσωτερικό μίας πηγής που **δεν διαρρέεται από ρεύμα** (το κύκλωμα που ενώνει τους πόλους της είναι ανοικτό).

Υπό την επίδραση της “χημικής δύναμης”, ένας **θετικός** φορέας φορτίου q κινείται **μέσα στη μπαταρία** με κατεύθυνση από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο.

Ηλεκτρεγερτική Δύναμη Πηγής (ΗΕΔ)

Ως ΗΕΔ πηγής ορίζεται το **έργο ανά μονάδα θετικού φορτίου**, που παράγει η πηγή, κατά τη μεταφορά του θετικού φορτίου **από τον αρνητικό στον θετικό πόλο**.

$$\text{ΗΕΔ Πηγής} = \mathcal{E} = \frac{W_{\text{χημ}}}{q}$$

Να παρατηρήσετε ότι η ΗΕΔ \mathcal{E} εκφράζεται σε μονάδες $\frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{V}$, όπως το ηλεκτρικό δυναμικό.

Ο όρος «Ηλεκτρεγερτική Δύναμη» καθιερώθηκε όταν η κατανόηση της λειτουργίας της ηλεκτρικής πηγής ήταν ελλιπής.

A. Όταν η πηγή δεν διαρρέεται από ρεύμα, η διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής ισούται με την ΗΕΔ της πηγής.

Εξαιτίας του φορτίου των πόλων, σε έναν θετικό φορέα δρα μία ηλεκτρική δύναμη, με κατεύθυνση **από τον θετικό προς τον αρνητικό πόλο (Εικόνα 8-13)**. Η δύναμη αυτή αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων, στο εσωτερικό της μπαταρίας. Όταν η πηγή δεν διαρρέεται από ρεύμα, η ηλεκτρική δύναμη είναι αντίθετη από τη χημική δύναμη.

Έστω ότι V_A και V_Θ είναι τα ηλεκτρικά δυναμικά του αρνητικού και θετικού πόλου. Κατά τη μεταφορά ενός θετικού φορέα από τον αρνητικό στον θετικό πόλο, η ηλεκτρική δύναμη **καταναλώνει** έργο ανά μονάδα φορτίου $W_{\eta\lambda}/q = V_A - V_\Theta < 0$. Το ηλεκτρικό έργο είναι αντίθετο από το έργο της χημικής δύναμης (την ΗΕΔ):

$$\frac{W_{\chi\eta\mu}}{q} = \frac{-W_{\eta\lambda}}{q} \Rightarrow \mathcal{E} = \Delta V$$

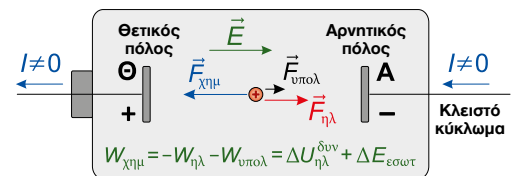
B. Όταν η πηγή διαρρέεται από ρεύμα, η διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής είναι μικρότερη από την ΗΕΔ της πηγής.

Εάν οι πόλοι της πηγής ενωθούν με ένα αγωγίμο σύρμα, προκαλείται συνεχής ροή φορέων φορτίου μέσα στο σύρμα και στη μπαταρία (Εικόνα 8-14). Οι **θετικοί φορείς** κινούνται από τον αρνητικό στον θετικό πόλο στο εσωτερικό της μπαταρίας, και από τον θετικό στον αρνητικό πόλο μέσα στο σύρμα (συμβατική φορά).

Στην πραγματικότητα, στο εσωτερικό της μπαταρίας δρουν και άλλες δυνάμεις ανάμεσα στους φορείς φορτίου και το υλικό της μπαταρίας, που αντιτίθενται στην κίνησή τους μεταξύ των πόλων. Οι δυνάμεις αυτές απεικονίζονται στην **Εικόνα 8-14** ως $\vec{F}_{\upsilon\pi\omicron\lambda}$. Έχουν αντίθετη φορά από τη χημική δύναμη, επειδή **καταναλώνουν** έργο: $W_{\upsilon\pi\omicron\lambda} < 0$. Εξαιτίας αυτών των δυνάμεων, ένα μέρος της χημικής ενέργειας της πηγής δεν χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των πόλων, αλλά μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας (π.χ. θερμική και εσωτερική ενέργεια στη μπαταρία).

Εικόνα 8-14

Όταν η πηγή διαρρέεται από ρεύμα, μέρος της χημικής ενέργειας της πηγής μετατρέπεται σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια. Η υπόλοιπη χημική ενέργεια καταναλώνεται από άλλες δυνάμεις, $\vec{F}_{\upsilon\pi\omicron\lambda}$, και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια.



Σχέση ΗΕΔ Πηγής – Διαφοράς Δυναμικού μεταξύ των Πόλων της Πηγής:

$$\mathcal{E} = \Delta V + Ir$$

Χημικό Έργο ανά Μονάδα Φορτίου

=

Αύξηση Ηλεκτρικής Δυναμικής Ενέργειας ανά Μονάδα Φορτίου

+

Αύξηση της Εσωτερικής Ενέργειας της Μπαταρίας ανά Μονάδα Φορτίου

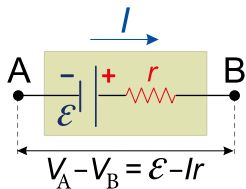
Η σχέση αυτή έχει την εξής **φυσική σημασία**:

Όταν η πηγή διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , στο **εσωτερικό** της πηγής οι φορείς φορτίου κινούνται **αντίθετα** προς το ηλεκτρικό πεδίο. Κατά τη μετακίνηση ενός θετικού φορέα φορτίου από τον αρνητικό στον θετικό πόλο:

- Η πηγή παράγει κάποιο χαρακτηριστικό **έργο ανά μονάδα φορτίου**, το οποίο αποτελεί την **ΗΕΔ** \mathcal{E} της πηγής. Το έργο αυτό εξαρτάται από τις προδιαγραφές της πηγής.
- Μία ποσότητα αυτού του έργου ανά μονάδα φορτίου, ίση με Ir , καταναλώνεται σε διάφορες διεργασίες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εσωτερική ενέργεια της μπαταρίας.
- Η ποσότητα ΔV είναι η αύξηση στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια της μπαταρίας, ανά μονάδα φορτίου, κατά τη μετακίνηση του φορέα από τον αρνητικό στον θετικό πόλο.

Εικόνα 8-15

Συμβολική αναπαράσταση πηγής ΗΕΔ \mathcal{E} και εσωτερικής αντίστασης r . Η αντίσταση r σχεδιάζεται σε σειρά με την πηγή. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους πόλους της πηγής ισούται με $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$. Εάν μία συσκευή συνδεθεί με τους πόλους της πηγής, η διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής ισούται με ΔV .



Από τη σχέση ΗΕΔ - διαφοράς δυναμικού συμπεραίνουμε ότι **η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων της πηγής είναι μικρότερη από την ΗΕΔ της πηγής**, και εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος:

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir < \text{ΗΕΔ}, \text{ όταν η πηγή διαρρέεται από ρεύμα}$$

Δηλαδή, οι πόλοι της πηγής φορτίζονται λιγότερο μέσω των χημικών αντιδράσεων, επειδή ένα μέρος της χημικής ενέργειας της πηγής, Ir , καταναλώνεται ως έργο άλλων δυνάμεων. Η συμβολική αναπαράσταση μίας πηγής με εσωτερική αντίσταση απεικονίζεται στην **Εικόνα 8-15**.

Μηχανικό Ανάλογο Πηγής με Εσωτερική Αντίσταση

Μπορούμε να φαντασθούμε ένα **μηχανικό ανάλογο**, στο οποίο μία τάση σχοινού \vec{T} ανασπώνει κατακόρυφα ένα σώμα. Στο σώμα δρουν επίσης, κατά αντίθετη φορά από τη δύναμη \vec{T} , το βάρος \vec{B} του σώματος και η αντίσταση του αέρα \vec{D} .

Εάν το σώμα ανασπώνεται με σταθερή ταχύτητα, το συνολικό έργο των τριών δυνάμεων μηδενίζεται:

$$W_T + W_B + W_D = 0 \Rightarrow W_T = -W_B - W_D = \Delta U_{\text{βαρ}}^{\text{δυν}} + \Delta E_{\text{εσωτ}}$$

$$W_{\vec{T}} + W_{\vec{B}} + W_{\vec{D}} = 0 \Rightarrow W_{\vec{T}} = -W_{\vec{B}} - W_{\vec{D}}$$

Το έργο του βάρους ισούται με την αρνητική μεταβολή της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας του συστήματος σώματος - Γης, $W_{\vec{B}} = -\Delta U_{\text{βαρ}}^{\text{δυν}}$. Άρα:

$$W_{\vec{T}} = \Delta U_{\text{βαρ}}^{\text{δυν}} - W_{\vec{D}}$$

Η ποσότητα $-W_{\vec{D}} = \Delta E_{\text{εσωτ}} > 0$ είναι η αύξηση στην εσωτερική ενέργεια του σώματος και του αέρα, λόγω της αντίστασης του αέρα. Τελικά, το έργο της τάσης σχοινοίου μετατρέπεται σε βαρυτική δυναμική ενέργεια και εσωτερική ενέργεια του σώματος/αέρα:

$$W_{\vec{T}} = \Delta U_{\text{βαρ}}^{\text{δυν}} + \Delta E_{\text{εσωτ}}$$

Έργο Τάσης Σχοινοίου	=	Αύξηση Βαρυτικής Δυναμικής Ενέργειας	+	Αύξηση της Εσωτερικής Ενέργειας Σώματος/Αέρα
---------------------------------	---	---	---	---

Η τελευταία σχέση αντιστοιχεί στη σχέση ΗΕΔ - διαφοράς δυναμικού:

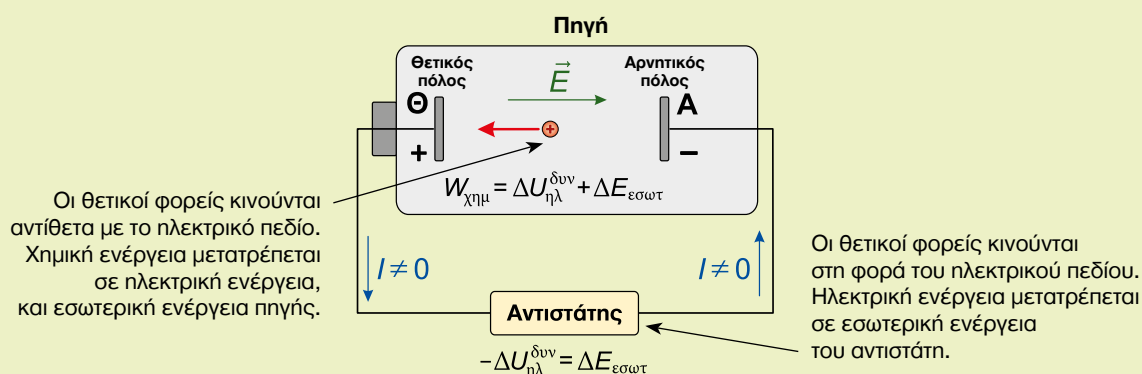
$$\mathcal{E} = \Delta V + Ir$$

Σε μία μπαταρία, ο φορέας φορτίου αντιστοιχεί στο σώμα, η χημική δύναμη αντιστοιχεί στην τάση σχοινοίου, η ηλεκτρική δύναμη στο βάρος, και οι υπόλοιπες δυνάμεις στην αντίσταση του αέρα.

Μετατροπές Ενέργειας στο Εξωτερικό Κύκλωμα (έξω από την Ηλεκτρική Πηγή)

Στο εξωτερικό κύκλωμα, οι θετικοί φορείς φορτίου κινούνται από τον θετικό προς τον αρνητικό πόλο της πηγής (συμβατική φορά), από υψηλό προς χαμηλό δυναμικό. Κατά τη μετακίνηση αυτή, ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ενέργεια των συσκευών, που είναι συνδεδεμένες στο κύκλωμα. Για παράδειγμα, εάν η πηγή είναι συνδεδεμένη με έναν αντιστάτη, ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε εσωτερική κινητική (θερμική) και δυναμική ενέργεια του αντιστάτη. Μέρος αυτής της ενέργειας μεταφέρεται τελικά στο περιβάλλον, με διάδοση θερμότητας (με επαφή του αντιστάτη με διάφορα σώματα, ρεύματα αέρα, και ακτινοβολία).

Σύνοψη Ενεργειακών Μετατροπών σε ένα Κύκλωμα Πηγής και Αντιστάτων



ΕΝΘΕΤΟ - Απόδειξη της σχέσης μεταξύ ΗΕΔ και Διαφοράς Δυναμικού

Όταν το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασης I , οι φορείς φορτίου κινούνται με **σταθερή** μέση ταχύτητα ολίσθησης (και σταθερή μέση κινητική ενέργεια). Άρα, το **ολικό έργο** σε έναν φορέα **μηδενίζεται**:

$$W_{\chi\eta\mu} + W_{\eta\lambda} + W_{\upsilon\pi\omicron\lambda} = 0$$

Το έργο της πηγής ανά μονάδα φορτίου, για τη μετακίνηση ενός **θετικού** φορέα από τον αρνητικό (Α) στον θετικό (Θ) πόλο, ισούται εξ' ορισμού με την ΗΕΔ:

$$\mathcal{E} = \frac{W_{\chi\eta\mu}}{q}$$

Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης ανά μονάδα φορτίου για την ίδια μετακίνηση ισούται με τη διαφορά δυναμικού των δύο πόλων:

$$\frac{W_{\eta\lambda}}{q} = V_A - V_\Theta = -\Delta V$$

Συνδυάζοντας αυτές τις σχέσεις, βρίσκουμε:

$$\frac{W_{\chi\eta\mu}}{q} + \frac{W_{\eta\lambda}}{q} + \frac{W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}}{q} = 0 \Rightarrow \mathcal{E} - \Delta V + \frac{W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}}{q} = 0 \Rightarrow \Delta V = \mathcal{E} + \frac{W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}}{q}$$

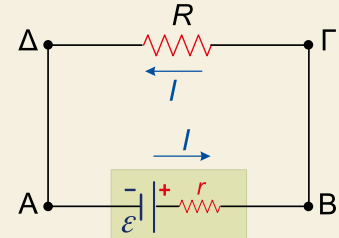
Σε πολλές πηγές, το έργο που καταναλώνεται σε άλλες μορφές ενέργειας, $W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}$, είναι **ανάλογο** με την ένταση του ρεύματος, $W_{\upsilon\pi\omicron\lambda} \propto I$. Γι' αυτό, μπορούμε να γράψουμε $\frac{W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}}{q} = -Ir$. Ο θετικός συντελεστής r έχει μονάδες αντίστασης ($V/A = \Omega$) και ονομάζεται **εσωτερική αντίσταση της πηγής**. Η ποσότητα $-Ir$ είναι αρνητική, όπως το έργο $W_{\upsilon\pi\omicron\lambda}$.

Αντικαθιστώντας στην τελευταία σχέση, βρίσκουμε:

$$\mathcal{E} = \Delta V + Ir$$

Παράδειγμα

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ένα κύκλωμα, που περιέχει έναν αντιστάτη R ενωμένο με μία πηγή ΗΕΔ \mathcal{E} και εσωτερικής αντίστασης r .



Θα υπολογίσουμε **(α)** το ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη, και **(β)** τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του.

- (α)** Χειριζόμαστε την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας ως έναν επιπρόσθετο αντιστάτη σε σειρά με το κύκλωμα.

Η συνολική αντίσταση του κυκλώματος είναι $R+r$. Άρα, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

- (β)** Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη είναι:

$$\Delta V = IR = \mathcal{E} \frac{R}{R+r}$$

Αριθμητική Εφαρμογή

Εάν η ΗΕΔ της πηγής είναι $12,0 \text{ V}$, η εσωτερική αντίσταση είναι $r = 0,40 \Omega$, και η αντίσταση είναι $R = 6,0 \Omega$, το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα

$$I = \frac{12,0 \text{ V}}{6,40 \Omega} = 1,88 \text{ A}$$

και η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη είναι

$$\Delta V = (12,0 \text{ V}) \frac{6,0 \Omega}{6,4 \Omega} = 11,3 \text{ V}$$

Πειραματικός Προσδιορισμός της Εσωτερικής Αντίστασης Πηγής

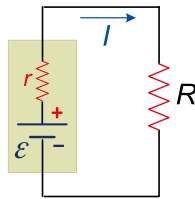
Μπορούμε να προσδιορίσουμε την εσωτερική αντίσταση μίας πηγής ως εξής: Χρησιμοποιώντας μία κατάλληλη διάταξη (π.χ. ροοστάτη), μεταβάλλουμε την αντίσταση του κυκλώματος, και συνεπώς την ένταση ρεύματος I που διαρρέει το κύκλωμα.

Έστω ότι μετρούμε τη διαφορά δυναμικού ΔV στα άκρα της αντίστασης και την ένταση του ρεύματος, για διάφορες τιμές της εξωτερικής αντίστασης R . Σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση διαφοράς δυναμικού - έντασης ρεύματος $\Delta V - I$. Όπως προκύπτει από τη σχέση $\Delta V = \mathcal{E} - Ir$, η γραφική παράσταση είναι ευθεία με κλίση $-r$ και τεταγμένη την ΗΕΔ \mathcal{E} .



Έλεγχος Κατανόησης Εννοιών:

8.13.1. Το κύκλωμα του επόμενου σχήματος απεικονίζει μία ηλεκτρική πηγή ΗΕΔ \mathcal{E} και εσωτερικής αντίστασης r , η οποία συνδέεται με αντιστάτη R , και διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Η ΗΕΔ της πηγής ισούται με:



- (α) Τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής.
- (β) Τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής, όταν η εξωτερική αντίσταση R είναι ίση με μηδέν.
- (γ) Το γινόμενο IR .
- (δ) Την ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται στον αντιστάτη σε θερμότητα, ανά μονάδα φορτίου που τον διαρρέει.
- (ε) Το χημικό έργο της πηγής ανά μονάδα θετικού φορτίου, κατά τη μεταφορά θετικού φορτίου από τον αρνητικό στον θετικό πόλο.

8.13.2. Να περιγράψετε ένα απλό πείραμα, για να διαπιστώσετε εάν μία πηγή έχει μη μηδενική εσωτερική αντίσταση.

8.13.3. Στο μηχανικό ανάλογο της πηγής με εσωτερική αντίσταση, που διαρρέεται από ρεύμα:

- (α) σε ποιά δύναμη του εσωτερικού της πηγής αντιστοιχεί:
 - (i) το βάρος του σώματος, (ii) η τάση σχοινοῦ, (iii) η αντίσταση του αέρα;
- (β) Σε τι αντιστοιχεί το σώμα που ανυψώνεται;
- (γ) Σε τι αντιστοιχεί το βαρυτικό πεδίο της Γης;
- (δ) Σε τι μορφές ενέργειας μετατρέπεται το έργο της τάσης σχοινοῦ;
- (ε) Ποιές είναι οι αντίστοιχες μορφές ενέργειας στην πηγή;

8.13.4. Σε ένα κύκλωμα που αποτελείται από μία ιδανική πηγή (χωρίς εσωτερική αντίσταση), και έναν αντιστάτη, τι μετατροπές ενέργειας γίνονται στην πηγή και στον αντιστάτη, όταν το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα; Συνολικά, ποιες είναι οι μετατροπές ενέργειας στο κύκλωμα;

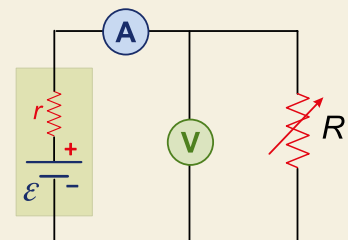
Ασκήσεις

- 1 Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας μπαταρίας είναι 1,5 V, ενώ η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων της, όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης 2 A, είναι 0,9 V. Να υπολογίσετε την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.
- 2 Ηλεκτρική πηγή ΗΕΔ 6 V συνδέεται με αντίσταση $R = 10 \Omega$, και διαρρέεται από ρεύμα 0,5 A. Να υπολογίσετε
 - (α) την εσωτερική αντίσταση της πηγής
 - (β) τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής
 - (γ) την ισχύ, που καταναλώνει η αντίσταση R .
- 3 Ένας λαμπτήρας καταναλώνει ισχύ 24 W, όταν η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι 12 V. Εάν συνδέσουμε τον λαμπτήρα με πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης 12 V, ο λαμπτήρας διαρρέεται από ρεύμα 1,5 A. Να υπολογίσετε την εσωτερική αντίσταση της πηγής.
- 4 Μία ηλεκτρική πηγή τροφοδοτεί ένα κύκλωμα με ρεύμα $I_1 = 1$ A, όταν η εξωτερική αντίσταση είναι 1Ω , και με ρεύμα $I_2 = 0,5$ A, όταν η εξωτερική αντίσταση είναι $2,5 \Omega$. Να υπολογίσετε:
 - (α) την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής
 - (β) την εσωτερική αντίσταση της πηγής.
- 5 Στο κύκλωμα της διπλανής εικόνας απεικονίζεται ένα κύκλωμα, που περιέχει πηγή, αμπερόμετρο, βολτόμετρο και ροοστάτη.

Μεταβάλλοντας την αντίσταση του ροοστάτη, καταγράφηκαν οι εξής μετρήσεις:

ΔV (V)	11,5	11,0	10,0	9,0	8,0
I (A)	0,50	1,0	2,0	3,0	4,0

Να χαράξετε τη γραφική παράσταση $\Delta V = f(I)$ και να προσδιορίσετε την ΗΕΔ και την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.



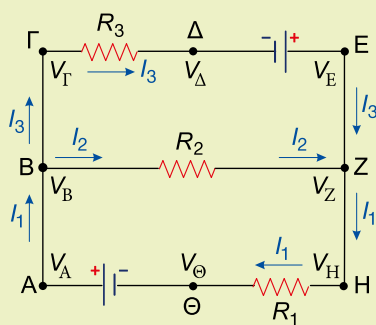
8.14. Οι Κανόνες του Kirchhoff (Κίρκωφ)

Μέχρι τώρα μελετήσαμε απλά κυκλώματα, στα οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, ή τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων, από τον νόμο του Ohm και τους κανόνες υπολογισμού ισοδύναμων αντιστάσεων. Η **Εικόνα 8-16** απει-

κονίζει ένα πιά **σύνθετο** κύκλωμα, οι αντιστάτες του οποίου δεν είναι συνδεδεμένοι ούτε σε σειρά, ούτε παράλληλα (δεν διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, και δεν έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού).

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η εφαρμογή του νόμου του Ohm και των κανόνων συνδεσμολογίας αντιστάσεων δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό της έντασης του ρεύματος, ή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ διαφόρων σημείων του κυκλώματος.

Εικόνα 8-16
Ένα σύνθετο κύκλωμα.



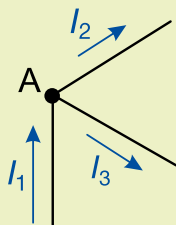
Ορολογία Σύνθετου Κυκλώματος

Κλάδος ονομάζεται ένα τμήμα του κυκλώματος, που περιέχει διάφορες διατάξεις (π.χ., πηγές και αντιστάσεις) συνδεδεμένες **σε σειρά**. Όλες οι διατάξεις του ίδιου κλάδου διαρρέονται από **ρεύμα ίδιας έντασης**. Οι αγωγοί ΖΗΘΑΒ, ΒΖ, και ΒΓΔΕΖ είναι κλάδοι του διπλανού κυκλώματος.

- **Κόμβος** ονομάζεται ένα σημείο του κυκλώματος, στο οποίο ενώνονται τρεις ή περισσότεροι κλάδοι που διαρρέονται από ρεύμα. Τα σημεία **Β** και **Ζ** είναι κόμβοι του κυκλώματος.
- **Βρόχος** ονομάζεται οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή του κυκλώματος, που είναι δυνατόν να τη διανύσουμε, διασχίζοντας κάθε κλάδο της μόνο μία φορά. Οι διαδρομές ΑΒ-ΖΗΘΑ, ΒΓΔΕΖΒ, και ΑΒΓΔΕΖΗΘΑ είναι βρόχοι του κυκλώματος.

Για να μελετήσουμε σύνθετα κυκλώματα, χρησιμοποιούμε δύο κανόνες που διατυπώθηκαν από τον Γερμανό φυσικό **Gustav Kirchhoff** (1824-1887).

Πρώτος Κανόνας του Kirchhoff (Κανόνας των Κόμβων)



Το άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων, που εισρέουν («εισέρχονται») σ' ένα κόμβο, ισούται με το άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων, που απομακρύνονται («εξέρχονται») από αυτόν.

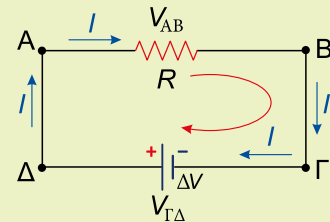
$$I_1 = I_2 + I_3$$

Ο πρώτος κανόνας εκφράζει την αρχή της **διατήρησης του φορτίου**. Ο ρυθμός, με τον οποίο εισρέει φορτίο στον κόμβο, ισούται με τον ρυθμό με τον οποίο εκρέει φορτίο από τον κόμβο. Άρα σε έναν κόμβο δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται φορτίο.

Δεύτερος Κανόνας του Kirchhoff (Κανόνας των Βρόχων)

Κατά μήκος μίας κλειστής διαδρομής (βρόχου) ενός κυκλώματος, το αλγεβρικό άθροισμα όλων των μεταβολών δυναμικού ισούται με μηδέν.

$$V_{AB} + V_{T\Delta} = 0 \Rightarrow -IR + \Delta V = 0$$



Ο δεύτερος κανόνας εκφράζει το γεγονός ότι το συνολικό έργο της ηλεκτρικής δύναμης είναι μηδενικό κατά μήκος μίας κλειστής διαδρομής. Η ηλεκτρική **δύναμη είναι διατηρητική**.

Για να εφαρμόσουμε τους κανόνες του Kirchhoff, ακολουθούμε τα εξής βήματα:

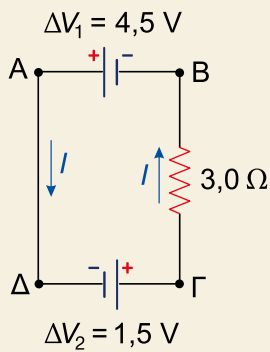
- (i) Σχεδιάζουμε εντάσεις ρεύματος $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_N$ στους διάφορους κλάδους $1, 2, \dots, i, \dots, N$ του κυκλώματος. Επιλέγουμε αυθαίρετα τη φορά κάθε ρεύματος.
- (ii) Προσδιορίζουμε τις άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος (π.χ. τις N εντάσεις ρεύματος).
- (iii) Εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα του Kirchhoff σε έναν ή περισσότερους κόμβους του κυκλώματος (κάποιοι κόμβοι ίσως να δίνουν την ίδια εξίσωση).
- (iv) Εφαρμόζουμε τον 2ο κανόνα σε έναν ή περισσότερους βρόχους. Διαγράφουμε κάθε βρόχο με μία συγκεκριμένη αυθαίρετη φορά, ξεκινώντας και καταλήγοντας στο ίδιο σημείο.
 - Εάν διατρέχουμε έναν αντιστάτη R κατά τη φορά της έντασης ρεύματος I , η μεταβολή του δυναμικού στον αντιστάτη είναι αρνητική και ίση με $-IR$. Εάν διατρέχουμε έναν αντιστάτη R αντίθετα από τη φορά του ρεύματος I , η μεταβολή του δυναμικού στον αντιστάτη είναι θετική και ίση με $+IR$.
 - Εάν διατρέχουμε μία πηγή από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο, η μεταβολή του δυναμικού είναι θετική και ίση με τη διαφορά δυναμικού ΔV της πηγής. Εάν διατρέχουμε μία πηγή από τον θετικό προς τον αρνητικό πόλο, η μεταβολή του δυναμικού είναι αρνητική και αντίθετη από τη διαφορά δυναμικού της πηγής.
- (v) Εφαρμόζουμε τον 2ο κανόνα σε έναν ή περισσότερους βρόχους, μέχρις ότου να καταλήξουμε στον απαιτούμενο αριθμό ανεξάρτητων εξισώσεων. Για να προσδιορισθούν N άγνωστες μεταβλητές, χρειάζονται N εξισώσεις.

Παράδειγμα

A. Πηγές συνδεδεμένες σε σειρά

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει ένα κύκλωμα με δύο μπαταρίες σε σειρά, έτσι ώστε ο θετικός πόλος της μίας να είναι συνδεδεμένος με τον αρνητικό πόλο της δεύτερης, και αντιστρόφως.

Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των δύο μπαταριών είναι 1,5 V και 4,5 V και η αντίσταση του κυκλώματος είναι 3,0 Ω. Διατρέχοντας τον βρόχο ΑΔΓΒΑ αριστερόστροφα, βρίσκουμε ότι το συνολικό ρεύμα, που διαρρέει το κύκλωμα, έχει ένταση:



$$\Delta V_1 + \Delta V_2 - IR = 0 \Rightarrow I = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{R} = \frac{6,0 \text{ V}}{3,0 \Omega} = 2,0 \text{ A}$$

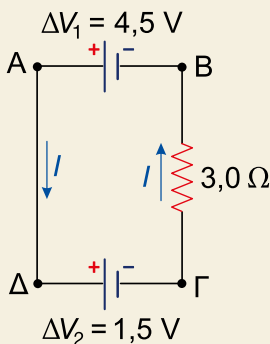
Εάν στο κύκλωμα υπήρχε μόνο μία από τις δύο πηγές, το ρεύμα θα είχε μικρότερη ένταση. Για παράδειγμα, εάν υπήρχε μόνο η δεύτερη πηγή, βρίσκουμε:

$$I = \frac{\Delta V_2}{R} = \frac{1,5 \text{ V}}{3,0 \Omega} = 0,5 \text{ A}$$

Άρα, ο συνδυασμός των δύο πηγών δημιουργεί ρεύμα μεγαλύτερης έντασης. Η συνδεσμολογία πολλών μπαταριών σε σειρά χρησιμοποιείται σε πολλές συσκευές (π.χ. φορητά ραδιόφωνα, φακοί χειρός, τηλεχειριστήρια). Οι μπαταρίες τοποθετούνται στη συσκευή έτσι ώστε ο θετικός πόλος της μίας να εφάπτεται με τον αρνητικό πόλο της επόμενης κ.ο.κ.

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει έναν εναλλακτικό τρόπο σύνδεσης των μπαταριών σε σειρά, στον οποίο συνδέονται οι θετικοί πόλοι μεταξύ τους και οι αρνητικοί μεταξύ τους.

Διατρέχοντας τον βρόχο ΑΔΓΒΑ αριστερόστροφα, βρίσκουμε:



$$+\Delta V_1 - \Delta V_2 - IR = 0 \Rightarrow I = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{R} = \frac{3,0 \text{ V}}{3,0 \Omega} = 1,0 \text{ A}$$

Παρατηρούμε τα εξής:

Η συνολική διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης είναι μόνο 3,0 A.

Η **φορά** του ρεύματος καθορίζεται από την **ισχυρότερη** πηγή.

Στο παράδειγμα του σχήματος, η φορά ρεύματος **φορτίζει την ασθενέστερη πηγή 2: θετικοί** φορείς φορτίου κινούνται προς τον θετικό της πόλο και εγκαταλείπουν τον αρνητικό της πόλο. Στην πράξη, μία τέτοια συνδεσμολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση μίας πηγής.

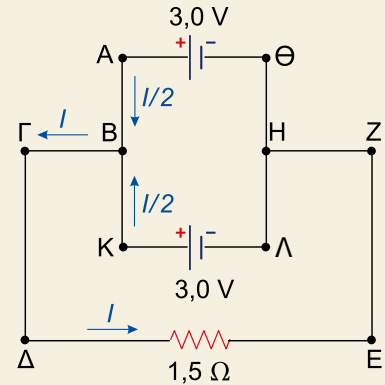
B. Πηγές συνδεδεμένες παράλληλα

Το σχήμα στην επόμενη σελίδα απεικονίζει δύο όμοιες πηγές, συνδεδεμένες παράλληλα. Το συνολικό ρεύμα είναι το ίδιο, όπως εάν υπήρχε μόνο μία πηγή. Για παράδειγμα, εφαρμόζοντας τον 2ο κανόνα του Kirchhoff αριστερόστροφα στον βρόχο ΑΒΓΔΕΖΗΘΑ, βρίσκουμε:

$$+\Delta V - IR = 0 \Rightarrow I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{3,0 \text{ V}}{1,5 \Omega} = 2,0 \text{ A}$$

Όμως, κάθε πηγή διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I/2 = 1,0 \text{ A}$.

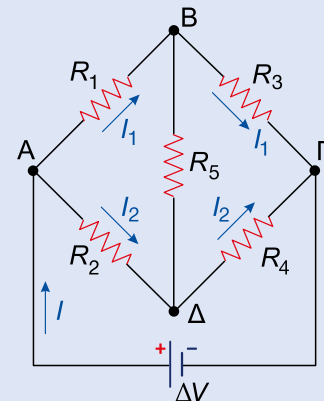
Έτσι, κάθε πηγή **καταπονείται λιγότερο**, και η διάρκεια ζωής των πηγών αυξάνεται.



ΕΝΘΕΤΟ - Η γέφυρα του Wheatstone

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει 5 αντιστάσεις, οι οποίες συνδέονται με μία πηγή διαφοράς δυναμικού ΔV . Θα προσδιορίσουμε τη σχέση που πρέπει να ικανοποιούν οι αντιστάσεις $R_1 - R_4$ έτσι ώστε η **κεντρική αντίσταση R_5 να μην διαρρέεται από ρεύμα**.

Εξαιτίας της ύπαρξης της αντίστασης R_5 η συνδεσμολογία των αντιστάσεων δεν είναι ούτε παράλληλη ούτε σε σειρά. Μπορούμε να μελετήσουμε όμως εύκολα αυτό το κύκλωμα, χρησιμοποιώντας τους κανόνες του Kirchhoff.



(α) Το κύκλωμα αποτελείται από τους κλάδους ΑΒ, ΒΓ, ΓΔ, ΔΑ, και ΒΔ. Σχεδιάζουμε εντάσεις ρεύματος (με αυθαίρετη φορά) στους διάφορους κλάδους, με εξαίρεση τον κλάδο ΒΔ, που δεν διαρρέεται από ρεύμα. Από τον 1^ο κανόνα του Kirchhoff προκύπτει ότι οι κλάδοι ΑΒ και ΒΓ διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I_1 . Ομοίως, οι κλάδοι ΑΔ και ΔΓ διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα I_2 .

(β) Εφαρμόζουμε τον δεύτερο κανόνα του Kirchhoff στο βρόχο ΑΒΔΑ, κινούμενοι δεξιόστροφα:

$$-I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

(γ) Εφαρμόζουμε τον δεύτερο κανόνα στο βρόχο ΒΓΔΒ, κινούμενοι δεξιόστροφα:

$$-I_1 R_3 + I_2 R_4 = 0 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_3}{R_4}$$

Από τις τελευταίες δύο σχέσεις, προκύπτει:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Εάν ικανοποιείται η πιο πάνω σχέση, η αντίσταση R_5 δεν διαρρέεται από ρεύμα, ανεξάρτητα από την τιμή της.

Ερώτηση

Σε μία ειδική περίπτωση, οι αντιστάσεις $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ (είναι πανομοιότυπες). Η κεντρική αντίσταση R_5 θα διαρρέεται από ρεύμα;

Γιατί εάν ικανοποιείται η σχέση αναλογίας μεταξύ των αντιστάσεων, η αντίσταση R_5 δεν διαρρέεται από ρεύμα;

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B είναι: $V_A - V_B = I_1 R_1$.

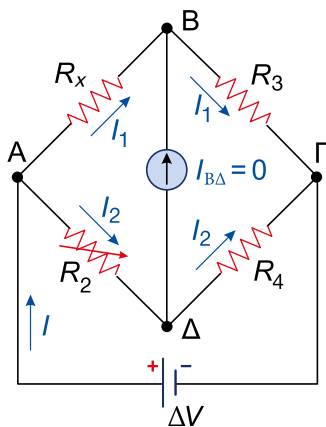
Ομοίως, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των A και Δ είναι:

$$V_A - V_\Delta = I_2 R_2 = \left(I_1 \frac{R_1}{R_2} \right) R_2 = I_1 R_1$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις, συμπεραίνουμε ότι **τα σημεία B και Δ έχουν το ίδιο δυναμικό**:

$$V_A - V_B = V_A - V_\Delta \Rightarrow V_B = V_\Delta$$

Άρα, ο κλάδος ΒΔ δεν διαρρέεται από ρεύμα.



Σημείωση

Η πιο πάνω διάταξη ονομάζεται γέφυρα του Wheatstone και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μίας άγνωστης αντίστασης R_x , όπως δείχνει το διπλανό σχήμα. Η αντίσταση R_2 μπορεί να μεταβάλλεται (είναι ροοστάτης). Αλλάζουμε την τιμή της R_2 , και μετρούμε την ένταση του ρεύματος $I_{B\Delta}$ στον κλάδο ΒΔ.

Για κάποια συγκεκριμένη τιμή της R_2 , η ένταση $I_{B\Delta}$ μηδενίζεται. Τότε, οι αντιστάσεις ικανοποιούν την πιο πάνω αναλογία. Η άγνωστη αντίσταση είναι:

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \Rightarrow R_x = R_2 \times \frac{R_3}{R_4}$$

Εάν οι αντιστάσεις R_2, R_3, R_4 είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια, η άγνωστη αντίσταση προσδιορίζεται επίσης με μεγάλη ακρίβεια με τη γέφυρα του Wheatstone.

Ερωτήσεις Κατανόησης

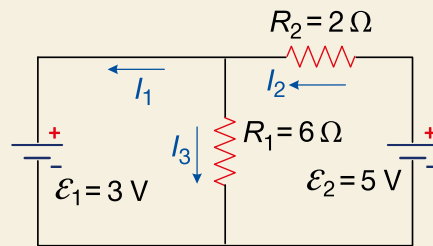
Να συμπληρώσετε τον πιο κάτω Πίνακα με την Ένδειξη Σωστό/Λάθος. Σε κάθε περίπτωση, να **απολογηθείτε** την απάντησή σας στο τετράδιό σας.

A/A	ΠΡΟΤΑΣΗ	Σωστό / Λάθος
1	Η ΗΕΔ μίας πηγής εκφράζει το χημικό έργο της πηγής ανά μονάδα θετικού φορτίου, κατά τη μεταφορά ενός φορέα από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο.	
2	Η ΗΕΔ οποιασδήποτε πηγής είναι εξ'ορισμού ίση με τη διαφορά δυναμικού των πόλων της πηγής.	
3	Η ΗΕΔ μίας πραγματικής πηγής είναι ίση με τη διαφορά δυναμικού των πόλων της πηγής, όταν η πηγή δεν διαρρέεται από ρεύμα.	
4	Στο εσωτερικό μίας πηγής, που διαρρέεται από ρεύμα:	
α	Ένα μέρος του χημικού έργου της πηγής καταναλώνεται σε εσωτερική ενέργεια, και το υπόλοιπο σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.	
β	Η χημική ενέργεια, ανά μονάδα φορτίου, που μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια της πηγής ισούται με την ποσότητα Ir .	
γ	Η χημική ενέργεια, ανά μονάδα φορτίου, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ισούται με τη διαφορά δυναμικού.	
5	Σε έναν αντιστάτη, εσωτερική ενέργεια του αντιστάτη μετατρέπεται σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.	
6	Ο κανόνας των κόμβων του Kirchhoff εκφράζει την αρχή της διατήρησης της ενέργειας.	
7	Ο κανόνας των βρόχων του Kirchhoff εκφράζει την αρχή της διατήρησης του φορτίου.	



Ασκήσεις

- 1 Να υπολογίσετε τις εντάσεις των ρευμάτων στο κύκλωμα του πιο κάτω σχήματος. Οι εσωτερικές αντιστάσεις των πηγών είναι αμελητέες.



Πίνακας 8-4

Συμβολισμοί Στοιχείων Ηλεκτρικού Κυκλώματος.

Συμβολισμοί Στοιχείων Ηλεκτρικού Κυκλώματος	
	Καλώδιο με αμελητέα αντίσταση
	Αντιστάτης
	Μεταβλητός αντιστάτης
	Πηγή ΗΕΔ
	Πηγή ΗΕΔ με εσωτερική αντίσταση
	Ανοικτός διακόπτης
	Κλειστός διακόπτης
	Λαμπτήρας
	Βολτόμετρο
	Αμπερόμετρο

Απαντήσεις Ελέγχου Κατανόησης Εννοιών

- 8.1.1.** Τα θετικά ιόντα πάλλονται γύρω από σταθερές θέσεις, στο μεταλλικό πλέγμα.
- 8.1.2.** Τα ηλεκτρόνια κινούνται με πολύ μεγάλη μέση αριθμητική ταχύτητα και αλλάζουν συνεχώς διεύθυνση, καθώς συγκρούονται με τα ιόντα του μετάλλου. **(α)** Η μέση θέση των ηλεκτρονίων παραμένει αμετάβλητη. **(β)** Η μέση θέση των ηλεκτρονίων μετατοπίζεται αντίθετα προς το ηλεκτρικό πεδίο, με την ταχύτητα ολίσθησης.
- 8.1.3.** Οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου διαδίδονται στον αγωγό με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Όταν κλείνουμε έναν διακόπτη, το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται μη μηδενικό σε όλο τον αγωγό σχεδόν ακαριαία. Αυτό προκαλεί ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων σε όλο τον αγωγό σχεδόν ακαριαία.
- 8.1.4.** Ισχύει η ίδια απάντηση της ερώτησης **8.1.3.**

8.2.1. Να υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του. Ισοδύναμα, το ηλεκτρικό δυναμικό να μην είναι σταθερό σε όλα τα σημεία του αγωγού.

8.2.2. Σωστή απάντηση είναι το **(β)**, επειδή τα ηλεκτρόνια είναι αρνητικά φορτισμένα.

8.2.3. **(α)** Από το **A** προς το **B**. **(β)** Από το **B** προς το **A**.

8.3.1.
$$I = \frac{(1,8 \times 10^{21}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{60 \text{ s}} = 5 \text{ A}$$

8.3.2.
$$\frac{\Delta Q_{\text{Ar}^+}}{\Delta t} = \frac{(3,0 \times 10^{19}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{1,0 \text{ s}} = 4,8 \text{ A}$$

$$\frac{|\Delta Q_{e^-}|}{\Delta t} = \frac{(3,0 \times 10^{19}) \times (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})}{1,0 \text{ s}} = 4,8 \text{ A}$$

$$I = \frac{\Delta Q_{\text{Ar}^+}}{\Delta t} + \frac{|\Delta Q_{e^-}|}{\Delta t} = 9,6 \text{ A}$$

8.4.1. Το **(α)**.

8.4.2. Όχι. Σε έναν ωμικό αγωγό, η τιμή της έντασης ρεύματος δεν εξαρτάται από την πολικότητα.

8.5.1. Ο **(α)**: Η ίδια διαφορά δυναμικού προκαλεί μικρότερη ένταση ρεύματος στον **(α)**.

8.5.2. Υποδιπλασιάζεται.

8.5.3. Υποδιπλασιάζεται.

8.5.4. 2,5 A και 0,5 A. Η ένταση ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση.

8.5.5. 4,6 A και 11 A.

8.6.1. Η ειδική αντίσταση ισούται **αριθμητικά** με την αντίσταση ενός αγωγού μήκους 1 m και σταθερής διατομής 1 m². Προσοχή: Η ειδική αντίσταση δεν εκφράζεται σε Ω. Σε ποιά μονάδα εκφράζεται;

8.6.2. Το σιδερένιο σύρμα, επειδή έχει μεγαλύτερη ειδική αντίσταση.

8.6.3. **(α)** Διπλασιάζεται, **(β)** Υποδιπλασιάζεται.

8.6.4. Το **(δ)**.

8.8.1. 0,3 V. Κατά τη φορά του ρεύματος.

8.8.2. $|\vec{E}| = (6,0 \text{ V}) / (2,0 \text{ cm}) = 3,0 \times 10^2 \text{ V/m}$.

8.10.1. **(α)** 3,0 A, **(β)** 18 Ω, **(γ)** 0,5 A και 1,5 V.

8.10.2. Εάν μία συσκευή χαλάσει και σταματήσει να διαρρέεται από ρεύμα, διακόπτεται το ρεύμα σε όλες τις συσκευές.

8.10.3. **(α)** 1,0 A και 0,5 A, **(β)** 24 λαμπτήρες, 0,5 A, 18 Ω.

8.10.4. **(α)** Ο φούρνος διαρρέεται από ρεύμα 15 A και η κουζίνα από ρεύμα 10 A. **(β)** Διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, αλλά ταυτόχρονα: στο πολύπριζο εισέρχεται ρεύμα 25 A. Χρειάζεται ειδική γραμμή ρεύματος για να μην γίνει υπερφόρτωση.

8.10.5. Το ρεύμα που διαρρέει κάθε συσκευή δεν εξαρτάται από τις υπόλοιπες.

8.10.6. Το συνολικό ρεύμα του δικτύου ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων όλων των συσκευών. Το δίκτυο υπερφορτώνεται, με κίνδυνο να καταστραφεί.

8.10.7. **(α)** 50 Ω, **(β)** 25 Ω, **(γ)** 2,0 V.

- 8.12.1.** Σωστή απάντηση είναι η **(α)**. Όλες οι συσκευές έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού, που καθορίζεται από το δίκτυο του σπιτιού.
- 8.12.2.** Η ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη με την αντίσταση για σταθερή διαφορά δυναμικού, και ανάλογη με την αντίσταση για σταθερή ένταση ρεύματος.
- 8.12.3.** Αφού η διαφορά δυναμικού στα άκρα του αντιστάτη είναι δεδομένη (ίση με της πηγής), η αντίστασή του πρέπει να είναι μικρή.
- 8.12.4. (α)** Ο λαμπτήρας 75 W. **(β)** Ο λαμπτήρας 150 W.
- 8.12.5.** Θα διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, οπότε θα φωτοβολεί πιο έντονα ο λαμπτήρας μεγαλύτερης αντίστασης (75 W).
- 8.12.5.** Η ένταση I του ρεύματος, που διαρρέει τις γραμμές μεταφοράς ρυθμίζεται ανάλογα με την επιθυμητή ισχύ. Εάν τα σύρματα είναι χοντρά (δηλαδή μεγάλης διατομής), θα έχουν μικρή αντίσταση. Έτσι, οι απώλειες ενέργειας ($=I^2R \propto R$) κατά τη μεταφορά είναι μικρές.

8.13.1. Σωστή απάντηση είναι η **(ε)**.

- 8.13.3. (α)** (i) στην ηλεκτρική δύναμη, (ii) στη χημική δύναμη, (iii) σε άλλες δυνάμεις που καταναλώνουν ενέργεια **(β)** στον φορέα φορτίου, **(γ)** στο ηλεκτρικό πεδίο, **(δ)** σε βαρυτική δυναμική ενέργεια του συστήματος σώματος - Γης, εσωτερική κινητική ενέργεια του σώματος και του περιβάλλοντος (αυξημένη θερμοκρασία), και εσωτερική δυναμική ενέργεια του σώματος και του περιβάλλοντος, **(ε)** ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος φορέα φορτίου - μπαταρίας, εσωτερική κινητική ενέργεια του σώματος και της μπαταρίας (αυξημένη θερμοκρασία), και εσωτερική δυναμική ενέργεια του σώματος και της μπαταρίας.
- 8.13.4.** Μέσα στην πηγή, οι θετικοί φορείς φορτίου μετακινούνται από τον αρνητικό στον θετικό πόλο. Το έργο της χημικής και της ηλεκτρικής δύναμης είναι αντίθετα:

$$W_{\chi\eta\mu} + W_{\eta\lambda} = 0 \Rightarrow W_{\chi\eta\mu} + q(V_A - V_{\Theta}) = 0 \Rightarrow W_{\chi\eta\mu} = q(V_{\Theta} - V_A)$$

Χημική ενέργεια της πηγής μετατρέπεται σε ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.

Στο υπόλοιπο κύκλωμα, οι θετικοί φορείς μετακινούνται από τον θετικό στον αρνητικό πόλο. Το έργο της ηλεκτρικής δύναμης και των δυνάμεων από τον αντιστάτη στους φορείς φορτίου είναι αντίθετα:

$$W_{\acute{\alpha}\lambda\lambda\epsilon\varsigma} + W_{\eta\lambda} = 0 \Rightarrow W_{\acute{\alpha}\lambda\lambda\epsilon\varsigma} + q(V_{\Theta} - V_A) = 0 \Rightarrow q(V_{\Theta} - V_A) = -W_{\acute{\alpha}\lambda\lambda\epsilon\varsigma}$$

Προσθέτοντας τις δύο σχέσεις, παίρνουμε:

$$W_{\chi\eta\mu} + q(V_{\Theta} - V_A) = q(V_{\Theta} - V_A) - W_{\alpha\lambda\lambda\epsilon\varsigma} \Rightarrow W_{\chi\eta\mu} = -W_{\alpha\lambda\lambda\epsilon\varsigma}$$

Το έργο των δυνάμεων από τον αντιστάτη στους φορείς φορτίου μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια του αντιστάτη (ο αντιστάτης θερμαίνεται):

$$\Delta E_{\epsilon\sigma\omega\tau} = -W_{\alpha\lambda\lambda\epsilon\varsigma} > 0$$

Τελικά:

$$W_{\chi\eta\mu} = \Delta E_{\epsilon\sigma\omega\tau}$$

Χημική ενέργεια της πηγής μετατρέπεται σε εσωτερική κινητική και δυναμική ενέργεια των φορέων φορτίου και του αντιστάτη.

