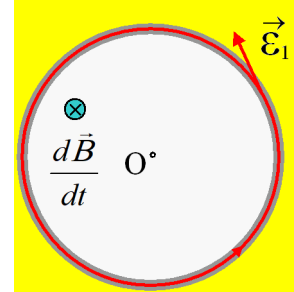


## Δύο ηλεκτρικά πεδία, το ένα συντηρητικό

Με αφορμή τη συζήτηση [Διαφορά δυναμικού σε κύκλωμα με ΗΕΔ](#), ας δούμε διευκρινιστικά κάποια πράγματα, σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο. Είναι ένα ή δύο και πώς προκύπτουν;

Έστω η κυκλική τομή ενός κυλινδρικού μαγνητικού πεδίου, στο οποίο έχουμε έναν σταθερό ρυθμό μεταβολής του μαγνητικού πεδίου και ένα κυκλικός αγωγός κέντρου  $O$ , πάνω στον άξονα του σωληνοειδούς, ο οποίος περιβάλλει το σωληνοειδές. Στο σχήμα έχει σχεδιαστεί μια κόκκινη κυκλική γραμμή, η οποία παριστά μια δυναμική γραμμή του επαγωγικού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται, εξαιτίας της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου. Από τον νόμο της επαγωγής παίρνουμε:



$$E_{\varepsilon\pi} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB}{dt} \pi R^2$$

όπου το (-) καθορίζει την πολικότητα της ΗΕΔ. Έτσι για την απόλυτη τιμή της, που μας ενδιαφέρει εδώ, θα έχουμε:

$$E_{\varepsilon\pi} = \frac{dB}{dt} \pi R^2$$

Εξ ορισμού η ΗΕΔ συνδέεται με το έργο που η ΗΕΔ παρέχει στα ηλεκτρικά φορτία του κυκλώματος:

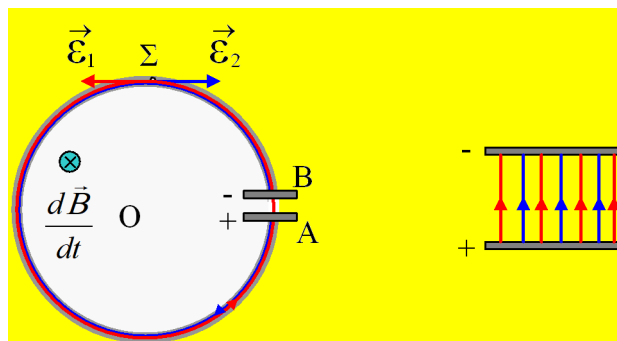
$$E_{\varepsilon\pi} = \frac{W}{q} = \frac{F \cdot 2\pi R}{q} = \frac{q \mathcal{E}_1 \cdot 2\pi R}{q} = \mathcal{E}_1 \cdot 2\pi R \rightarrow$$

$$\mathcal{E}_1 = \frac{1}{2\pi R} E_{\varepsilon\pi}$$

όπου  $\mathcal{E}_1$  η ένταση του επαγωγικού ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται, εφαπτόμενη στην δυναμική γραμμή που έχει σχεδιαστεί στο σχήμα.

Αξίζει να προσέξουμε ότι έργο παράγει η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου, πάνω σε κάθε φορτίο που θέτει σε κίνηση και για μια πλήρη κυκλική τροχιά το έργο αυτό, ίσο με  $W=q \cdot E_{\varepsilon\pi}$  είναι διάφορο του μηδενός, πράγμα που σημαίνει ότι το πεδίο αυτό **δεν είναι συντηρητικό**.

Ας κόψουμε τώρα τον κυκλικό αγωγό σε ένα σημείο και ας παρεμβάλουμε έναν πυκνωτή, όπως στο σχήμα.



Αν κάποια στιγμή  $t_1$  αρχίσει να μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, το επαγωγικό ηλεκτρικό πε-

δίο αρχίζει να μεταφέρει (ας δουλέψουμε με την συμβατική φορά του ρεύματος) θετικά φορτία, στον οπλισμό Α του πυκνωτή, ο οποίος αρχίζει να φορτίζεται, με τον οπλισμό Β να αποκτά αρνητικό φορτίο. Αλλά τότε η συσσώρευση φορτίων στους δύο οπλισμούς, έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται στο εσωτερικό του και ένα δεύτερο ηλεκτροστατικό πεδίο με δυναμικές γραμμές όπως φαίνεται στο δεξιό παραπάνω σχήμα, από τον θετικό οπλισμό Α στον αρνητικό Β (με μπλε χρώμα). Στο χώρο δηλαδή έχουμε και την εμφάνιση δεύτερου πεδίου συντηρητικού, το οποίο δημιούργησε η μετακίνηση φορτίων που οφείλεται στην ΗΕΔ από επαγωγή και τελικά το επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο. Ας προσέξουμε όμως ότι το συντηρητικό αυτό πεδίο δεν περιορίζεται μόνο στο χώρο μεταξύ των οπλισμών, αλλά επεκτείνεται στο γύρω χώρο και στο σχήμα έχει σχεδιαστεί μια μπλε κυκλική δυναμική γραμμή που ξεκινά από τον οπλισμό Α και φτάνει στον Β, με την ίδια ακτίνα R, με τον αγωγό μας. Έτσι σε κάθε σημείο, όπως το σημείο Σ στο σχήμα, έχουμε δύο πεδία με αντίθετες εντάσεις  $\mathcal{E}_1$  και  $\mathcal{E}_2$ , όπου το πρώτο είναι μη συντηρητικό, ενώ το δεύτερο είναι συντηρητικό.

Αν τη στιγμή αυτή  $t_1$  ο κυκλικός αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $i_1$ , μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή επικρατεί διαφορά δυναμικού  $V_A - V_B = V_1$ , ενώ πάνω στην (εσωτερική) αντίσταση του αγωγού μια πτώση τάσης  $V_2$ . Τη στιγμή αυτή η ΗΕΔ από επαγωγή (το επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο) προσφέρει ενέργεια στα φορτία με ρυθμό:

$$\frac{dW}{dt} = P_E = E_{επ} \cdot i_1 \quad (1)$$

Τι γίνεται η παραπάνω ενέργεια; Ένα μέρος μεταφέρεται στον πυκνωτή και αποθηκεύεται στο ηλεκτρικό του πεδίο με την αντίστοιχη ισχύ να είναι ίση:

$$P_c = \frac{dW_1}{dt} = V_1 \cdot i_1 \quad (2)$$

Το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στην αντίσταση  $r$  του αγωγού, με ρυθμό:

$$P_r = \frac{dW_2}{dt} = V_2 \cdot i_1 \quad (3)$$

Αξίζει να επισημανθεί μια τεράστια διαφορά για τα παραπάνω έργα. Στην εξίσωση (1) η ενέργεια δίνεται στα φορτία, στις εξισώσεις (2) και (3) η ενέργεια μεταφέρεται από τα φορτία (το ηλεκτρικό ρεύμα) σε πυκνωτή και αντίσταση.

Από την διατήρηση της ενέργειας παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} = P_E = P_c + P_r \rightarrow E_{επ} \cdot i_1 = V_1 \cdot i_1 + V_2 \cdot i_1 \rightarrow \\ E_{επ} = V_1 + V_2 \end{aligned}$$

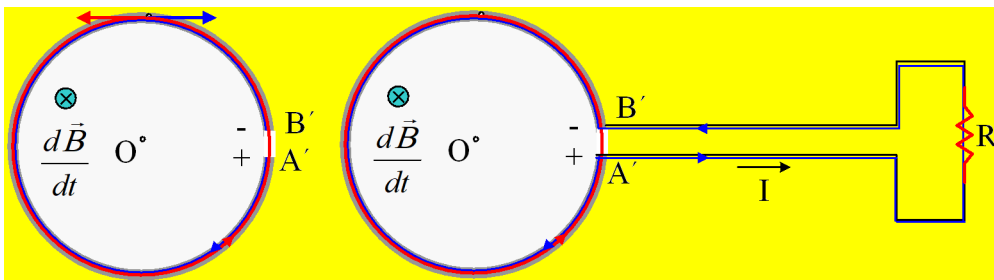
Η τελευταία εξίσωση, δεν είναι τίποτα άλλο, παρά ο 2ος κανόνας του Kirchhoff! Προσοχή όμως το πρώτο μέλος της εξίσωσης είναι η ΗΕΔ από επαγωγή, η οποία συνδέεται με το επαγωγικό μη συντηρητικό πεδίο, ενώ το δεύτερο μέλος περιέχει τάσεις! Τάσεις που οφείλονται στο ηλεκτροστατικό και άρα συντηρητικό πεδίο που εμφανίζεται. Δεν έχουμε μόνο ένα ηλεκτρικό πεδίο, αλλά δύο!

Και τι θα γίνει τελικά; Τελικά ο πυκνωτής θα φορτισθεί, ο αγωγός θα πάψει να διαρρέεται από ρεύμα και η

τάση, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή, θα γίνει ίση με την  $E_{επ}$ . Αυτό συμβαίνει όταν ένα φορτίο στο σημείο Σ, δεν θα δέχεται δύναμη! Πότε; Όταν η συνισταμένη ένταση από τα δύο πεδία είναι μηδενική, δηλαδή:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 0$$

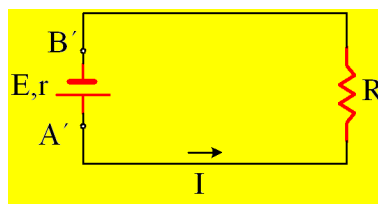
Ας έρθουμε τώρα σε ένα πρόσφατο ... κύκλωμα. Αν βγάλουμε τον πυκνωτή, ενώ έχουμε κομμένο τον κυκλικό αγωγό τι θα γίνει; Απλά τα σημεία Α' και Β' θα αποκτήσουν ξανά αντίθετα φορτία, όπως στο αριστερό σχήμα, όπως και στην περίπτωση του πυκνωτή, απλά θα έχουμε πολύ μικρότερη χωρητικότητα και πολύ μικρότερη συσσώρευση φορτίων. Θα δημιουργηθεί και πάλι το ηλεκτροστατικό πεδίο με ένταση αντίθετη της έντασης του επαγωγικού πεδίου και μια διαφορά δυναμικού, λόγω φορτίων  $V_{A'B'}$  ίση με  $E_{επ}$ .



Και αν τώρα στα άκρα Α' και Β' συνδέσουμε δυο πολύ μακριά σύρματα, χωρίς αντίσταση, στα δεξιά άκρα των οποίων συνδέσουμε ένα κύκλωμα, όπως στο δεξιό σχήμα, τι θα γίνει;

Θα έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα που θα διαρρέει το κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα, όπου στο τμήμα δεξιά του κυκλικού αγωγού, το μόνο ηλεκτρικό πεδίο που θα υπάρχει και θα είναι υπεύθυνο για την διέλευση του ρεύματος, θα είναι το συντηρητικό ηλεκτροστατικό πεδίο, οφειλόμενο στην «συσσώρευση» των φορτίων στα άκρα Α' και Β'. (Στο χώρο θα υπάρχει και επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο με δυναμικές γραμμές ομόκεντρους κύκλους, πεδίο που δεν παίζει κανένα ρόλο για το ρεύμα έντασης I που θα διαρρέει την αντίσταση, αφού η ένταση του επαγωγικού ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη στα σύρματα μεταφοράς).

Δεν έχουμε τώρα, παρά να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως στο σχήμα:



Ο κυκλικός αγωγός ισοδυναμεί με μια πηγή ΗΕΔ  $E_{επ}$  και εσωτερικής αντίστασης  $r$ , ενώ το εξωτερικό κύκλωμα περιέχει μια αντίσταση  $R$ .

Στο εσωτερικό της πηγής έχουμε δύο πεδία. Το μη συντηρητικό επαγωγικό ηλεκτρικό πεδίο το οποίο ονομάζουμε και **ηλεκτροχωριστικό** (διαχωρίζει τα φορτία...) και το συντηρητικό με αντίθετης φοράς ένταση, ενώ στο εξωτερικό κύκλωμα έχουμε μόνο το συντηρητικό ηλεκτροστατικό πεδίο, στο οποίο ορίζεται και δυναμικό και διαφορά δυναμικού...

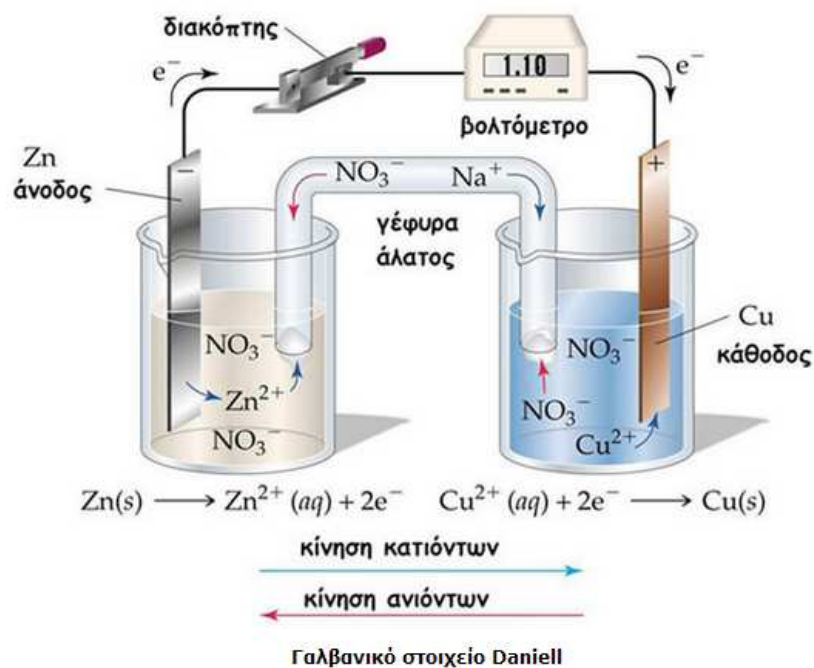
Αλλά μήπως το ίδιο δεν έχουμε και στην περίπτωση μιας... κλασσικής μπαταρίας; Ενός γαλβανικού στοιχεί-

ου ή ενός στοιχείου **Daniell**;

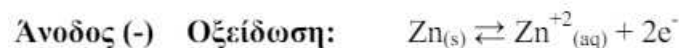
Αντιγράφο από την παλιότερη ανάρτηση: [Το ηλεκτρικό ρεύμα και οι πηγές του. Μέρος 4ο:](#)

### 4.1 Γαλβανικό στοιχείο

Τα γαλβανικά στοιχεία είναι πειραματικές διατάξεις όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα με τη βοήθεια μιας αυθόρμητης οξειδοαναγωγικής αντίδρασης. Έχουμε δηλαδή μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διάταξης, είναι το **στοιχείο Daniell**, του παρακάτω σχήματος.

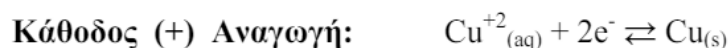


Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η άνοδος είναι μια ράβδος Zn βυθισμένη σε διάλυμα ιόντων  $\text{Zn}^{2+}$  (διάλυμα νιτρικού ψευδαργύρου  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ) και αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο (**ημιστοιχείο ανόδου**), όπου συμβαίνει διαδικασία οξείδωσης σύμφωνα με την αντίδραση:

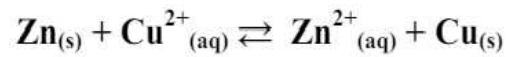


Εδώ «γεννιούνται» τα ηλεκτρόνια τα οποία μετακινούνται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος προς την κάθοδο.

Η κάθοδος είναι μια ράβδος Cu βυθισμένη σε διάλυμα ιόντων  $\text{Cu}^{2+}$  (διάλυμα  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) και αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο (**ημιστοιχείο καθόδου**), όπου συμβαίνει διαδικασία αναγωγής σύμφωνα με την αντίδραση:

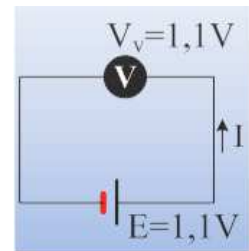


Η συνολική οξειδοαναγωγική αντίδραση που συμβαίνει προκύπτει από το άθροισμα των δύο ημιαντιδράσεων:



Η διαφορά δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων του γαλβανικού στοιχείου, όταν αυτό δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ονομάζεται **δυναμικό του στοιχείου** συμβολίζεται με  $\Delta E$  στη Χημεία και δεν είναι τίποτα άλλο, από αυτό που στη Φυσική λέγεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη του στοιχείου E**.

Αλλά τότε η παραπάνω διάταξη αντιστοιχεί στο διπλανό κύκλωμα.



[dmargaris@gmail.com](mailto:dmargaris@gmail.com)