



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Υπολογισμός ηλεκτρικών πεδίων

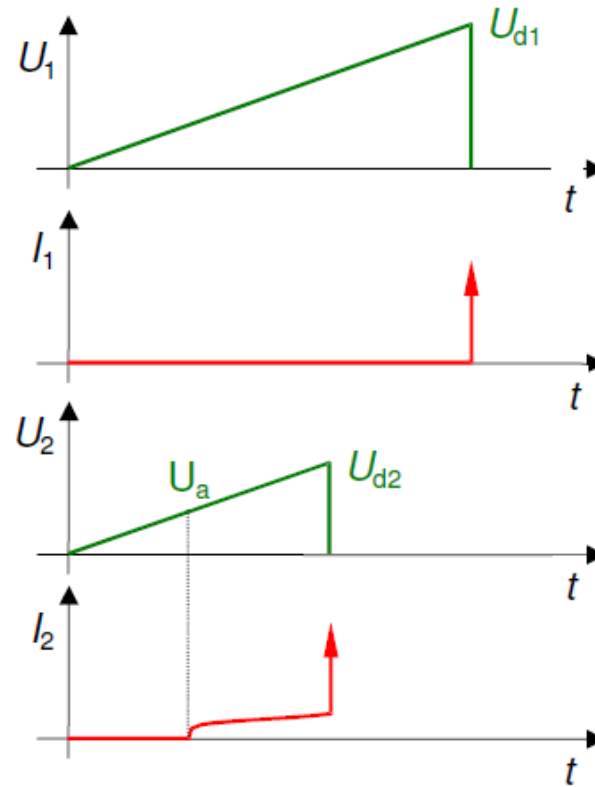
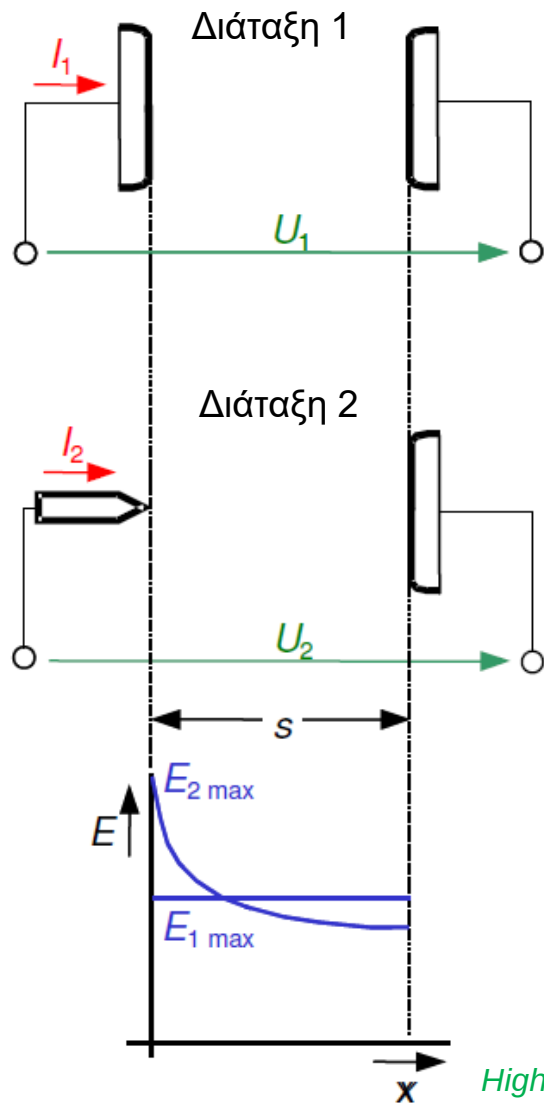
Γιατί;

- Οικονομία
- Ύψος γραμμών – αποστάσεις μεταξύ τους

Πώς;

- Αναλυτικές μέθοδοι
- Αριθμητικές μέθοδοι

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου



U_d : Τάση διάσπασης

U_a : Τάση έναρξης εκκενώσεων

E_d : Ένταση ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διάσπαση

E_a : Ένταση ηλεκτρικού πεδίου έναρξης εκκενώσεων

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Ομογενές πεδίο:

$$E_d = U_d / S$$

Ελαφρώς ανομοιογενές πεδίο:

$$E_a = E_d = E_{\max}(X) > U_d / S \quad \text{όταν } U = U_d$$

Ισχυρά ανομοιογενές πεδίο:

$$E_a = E_{\max}(X) < U_d / S \quad \text{όταν } U = U_a$$

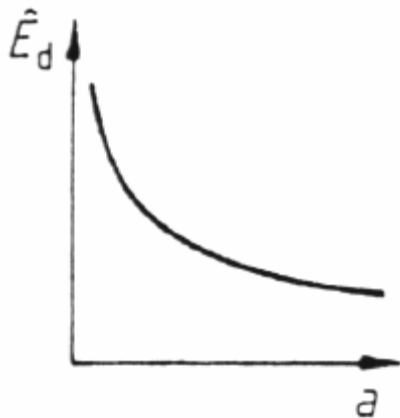
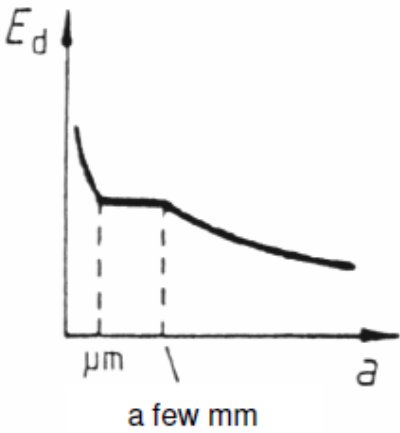
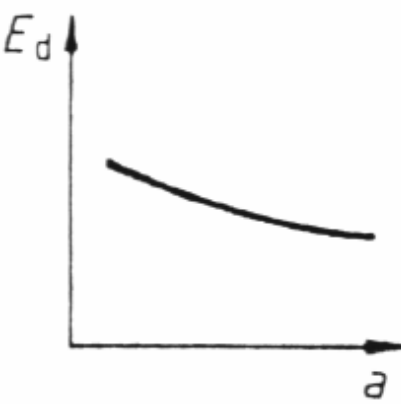
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Διηλεκτρική αντοχή...

...διάσπαση. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_d στην περίπτωση ομογενούς ή ελαφρώς ανομοιογενούς πεδίου

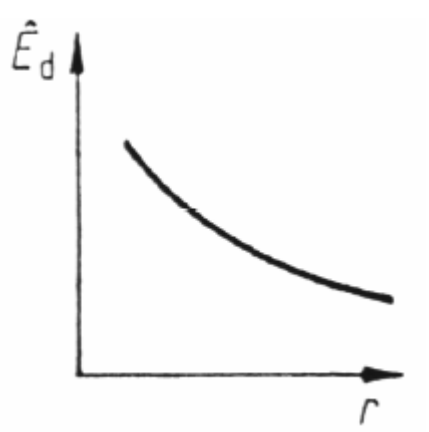
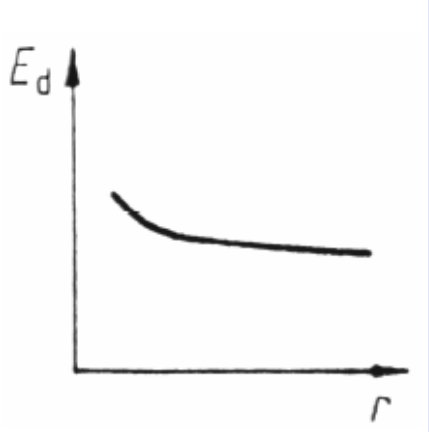
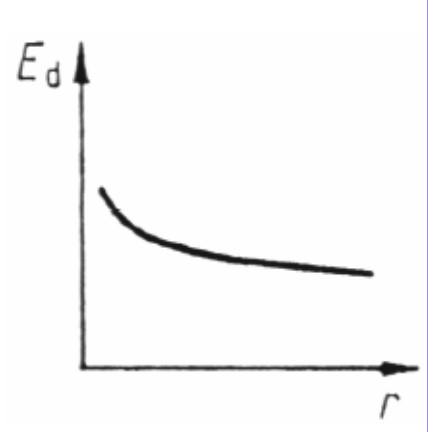
...έναρξη εκκενώσεων. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E_a στην περίπτωση ισχυρά ανομοιογενούς πεδίου

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

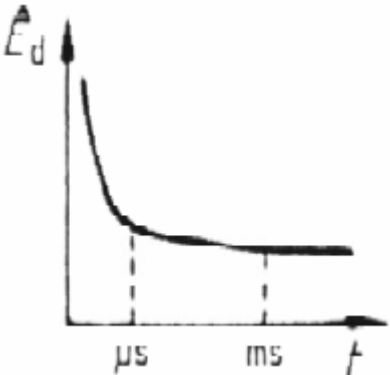
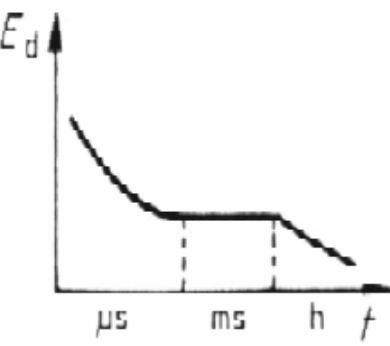
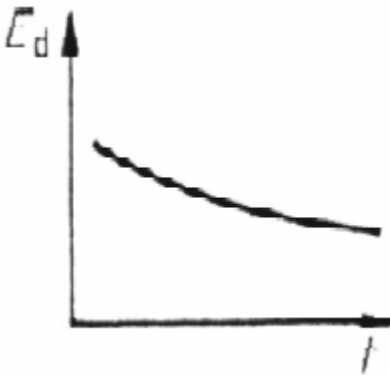
Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Απόσταση a			

High Voltage technology, TU Darmstadt

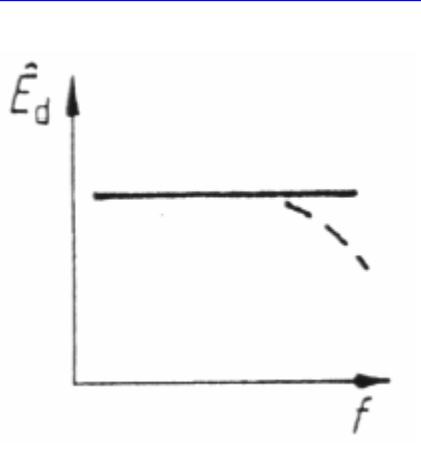
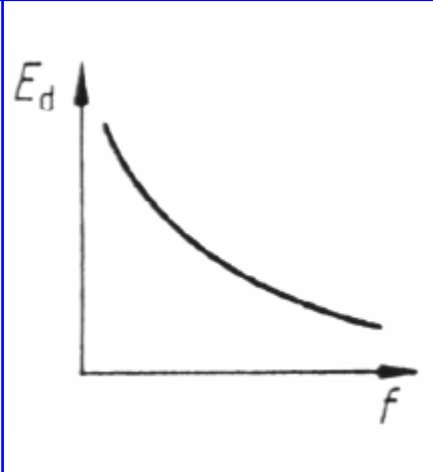
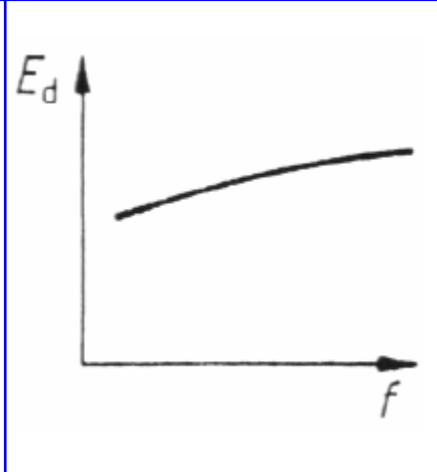
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Ακτίνα r του ηλεκτροδίου			

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Χρόνος t			

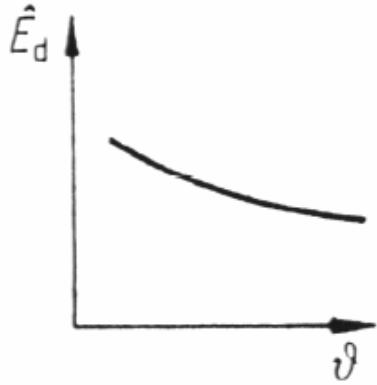
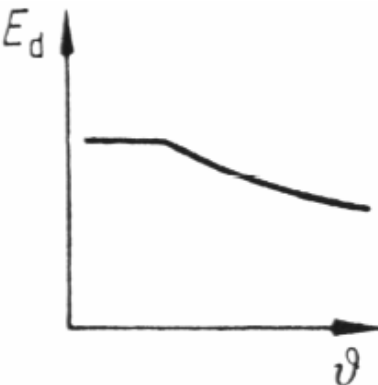
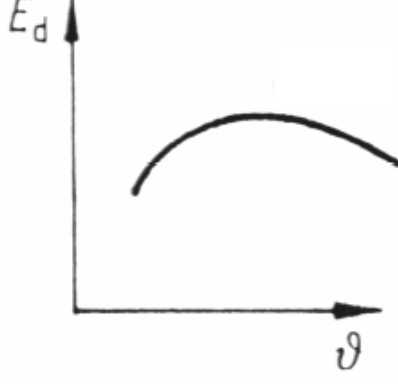
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Συχνότητα f ($1 \leq f \leq 1\text{kHz}$)			

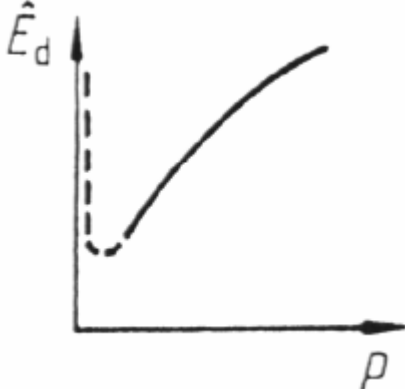
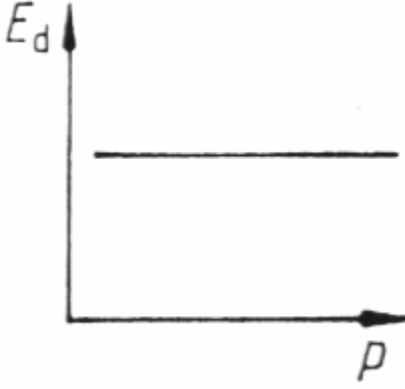
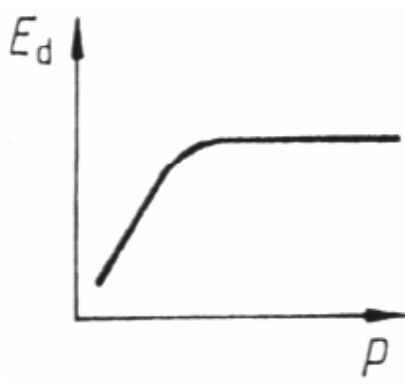
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Τάση	Μέγιστη τιμή	r.m.s τιμή	Μέγιστη τιμή ή r.m.s τιμή ανάλογα με το αέριο που περιέχεται

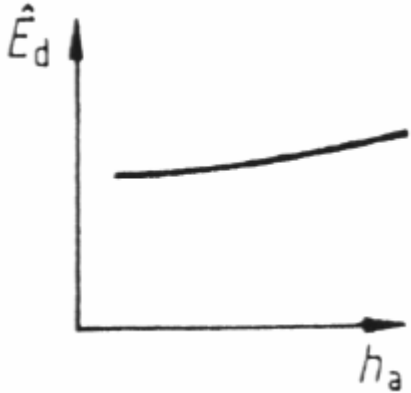
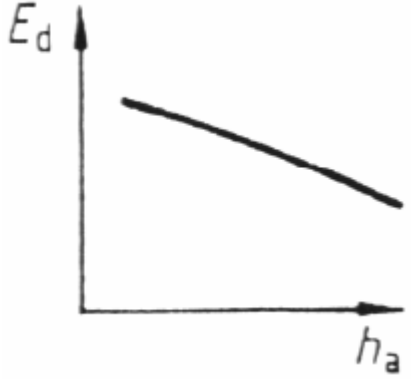
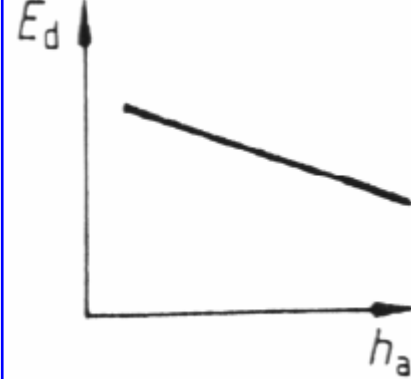
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Θερμοκρασία θ			

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

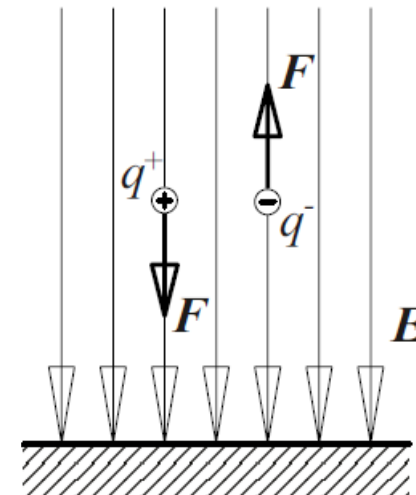
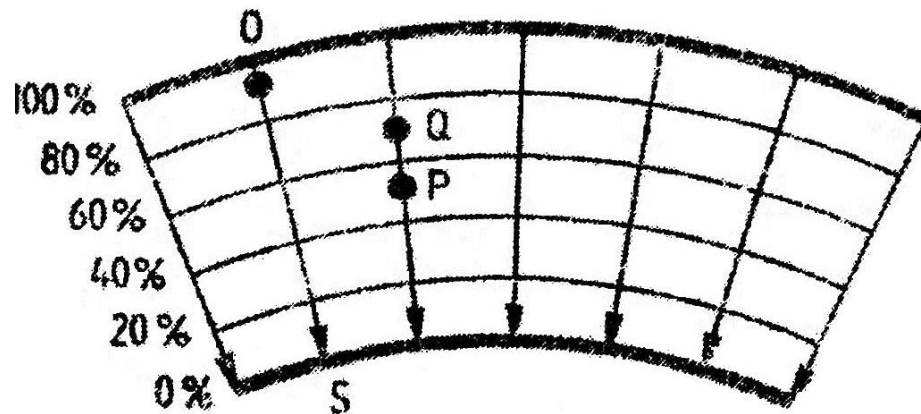
Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Πίεση p			

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Παράμετρος	Αέρια	Στερεά	Υγρά
Απόλυτη υγρασία h_a			

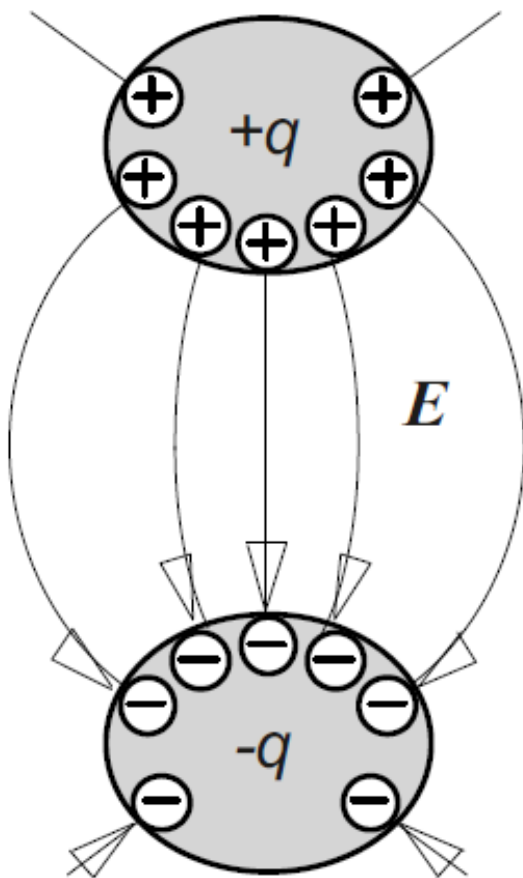
Ισοδυναμικές γραμμές και γραμμές πεδίου

- Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί από τις ισοδυναμικές γραμμές και τις γραμμές του πεδίου.
- Οι ισοδυναμικές γραμμές είναι γραμμές όπου το δυναμικό έχει σταθερή τιμή.
- Οι γραμμές του πεδίου απεικονίζουν την τροχιά, που θα ακολουθούσε ένα μικρό ελεύθερο θετικό φορτίο.
- Οι ισοδυναμικές γραμμές και οι γραμμές του πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους.



Το ηλεκτρικό πεδίο

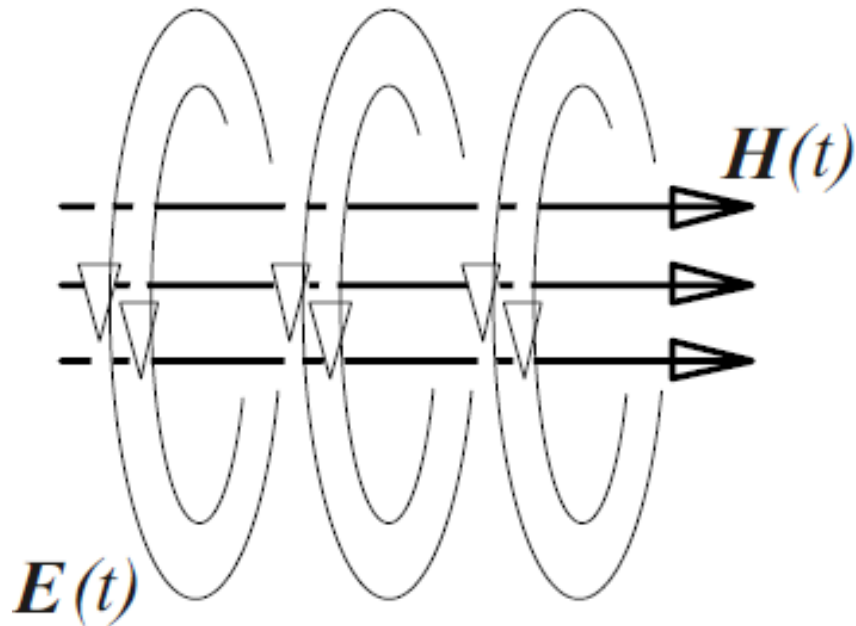
Βαθμωτό πεδίο



- Όλες οι γραμμές πεδίου έχουν αρχικό σημείο και τελικό σημείο.
- Τα αρχικά και τα τελικά σημεία καθορίζονται από θετικά και αρνητικά ηλεκτρικά φορτία.
- Τα τελικά σημεία μπορεί να βρίσκονται στο άπειρο.

Το ηλεκτρικό πεδίο

Περιστροφικό πεδίο



- Όλες οι γραμμές πεδίου είναι κλειστές και δεν έχουν αρχικό και τελικό σημείο.
- Δημιουργείται π.χ. από χρονομεταβλητό μαγνητικό πεδίο

Το ηλεκτρικό πεδίο

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού του διακένου.

- Πυκνότητα ηλεκτρικής ροής

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

$$\epsilon_0 = 8,8542 \text{ pF/m}$$

ϵ_r

Bakelite	6
Barium titanate	1000 ... 4000
Amber	2.8
Epoxy resin	3.7
Paper-air insulation	1.6 ... 2
Glass	10
Mica	8
Rubber (technical)	2.6
Rubber (caoutchouk)	2.4
Gases (air, SF ₆ , ...)	1
Mineral oil	2.2
Paper, clophene	5.4
Paper, paraffin	4
Pertinax	5
Polyethylene (PE)	2.3
Polystyrene (PS)	2.5
Polyvenylchloride (PVC)	3.1
Porcelain	5.5
Paper-oil insulation (cables)	3 ... 4.5
Transformer oil	2.5
Water	80

Το ηλεκτρικό πεδίο

3-D απεικόνιση $\longrightarrow$

Ισοδυναμικές επιφάνειες

2-D απεικόνιση $\longrightarrow$

Ισοδυναμικές γραμμές

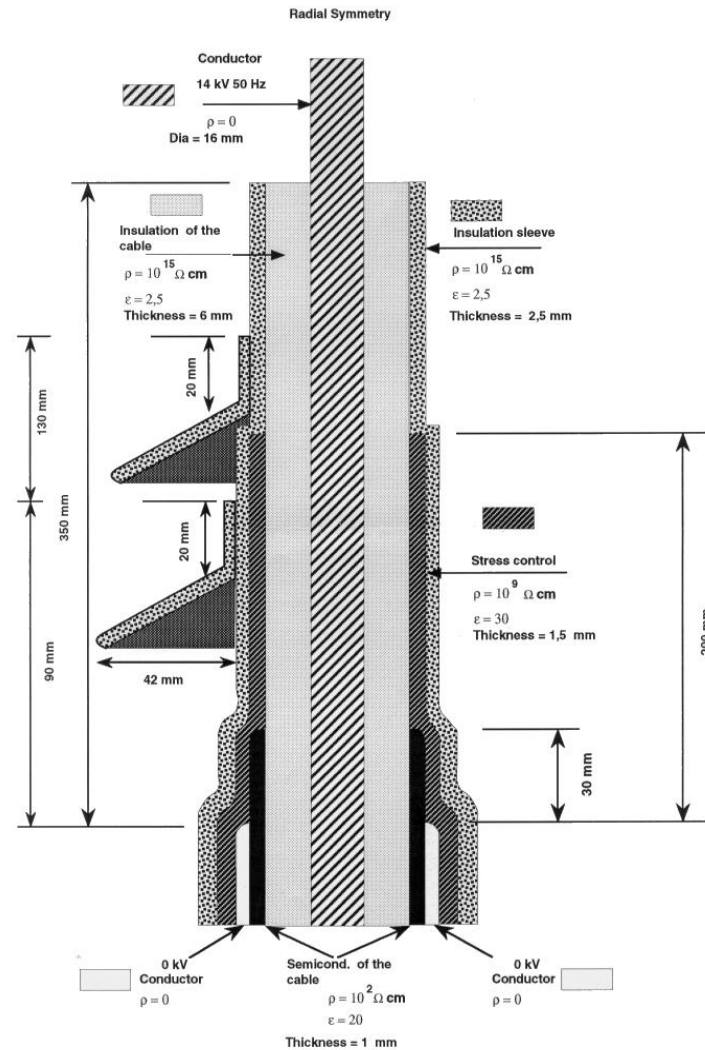
- Αν η κατανομή δυναμικού είναι γνωστή, τότε το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \{E_x, E_y, E_z\} = -\text{grad}\Phi = -\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right\}$$

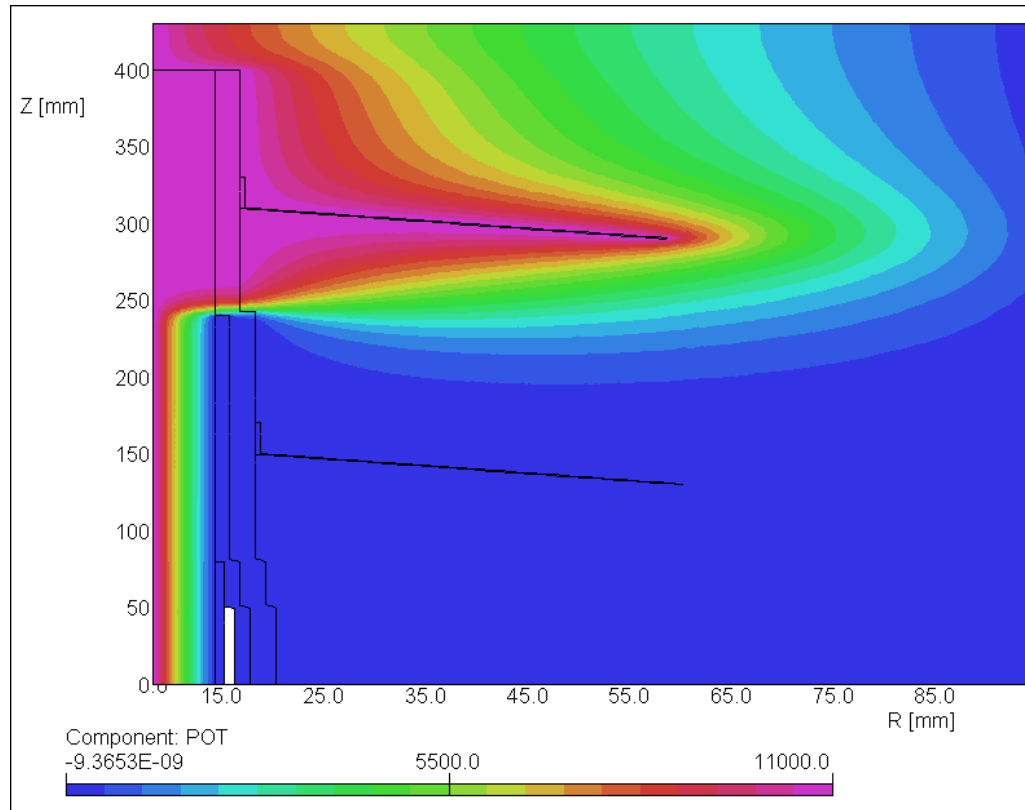
- Η εκτίμηση και βελτιστοποίηση της κατανομής δυναμικού αποτελεί κύριο αντικείμενο της τεχνολογίας υψηλών τάσεων.

Υπολογισμός πεδίου σε καλώδιο (1)

Καλώδιο μέσης τάσης τύπου
TTE 24-185

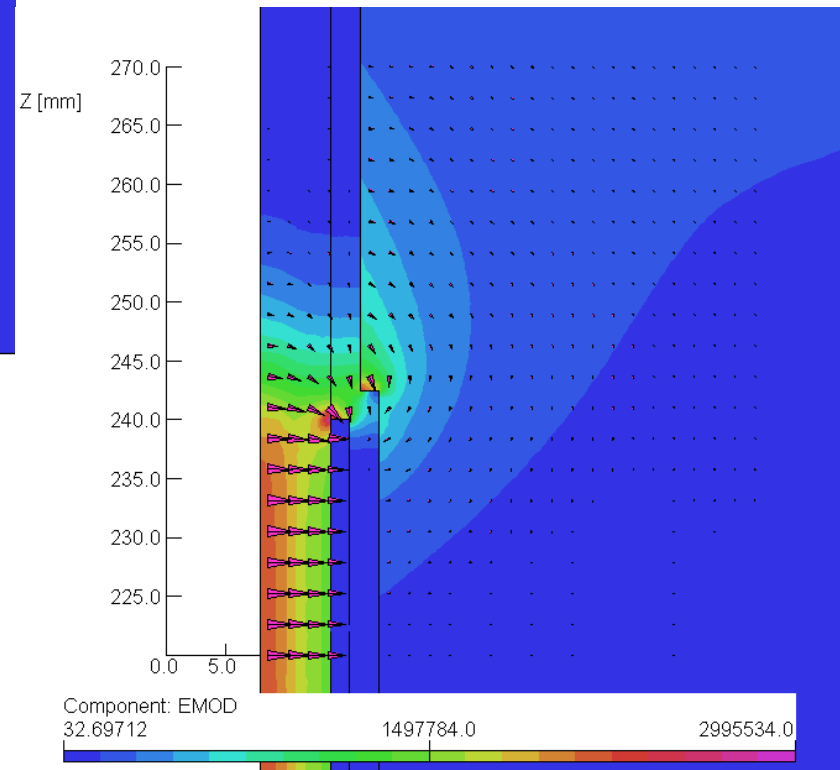


Υπολογισμός πεδίου σε καλώδιο (2)



Κατανομή δυναμικού

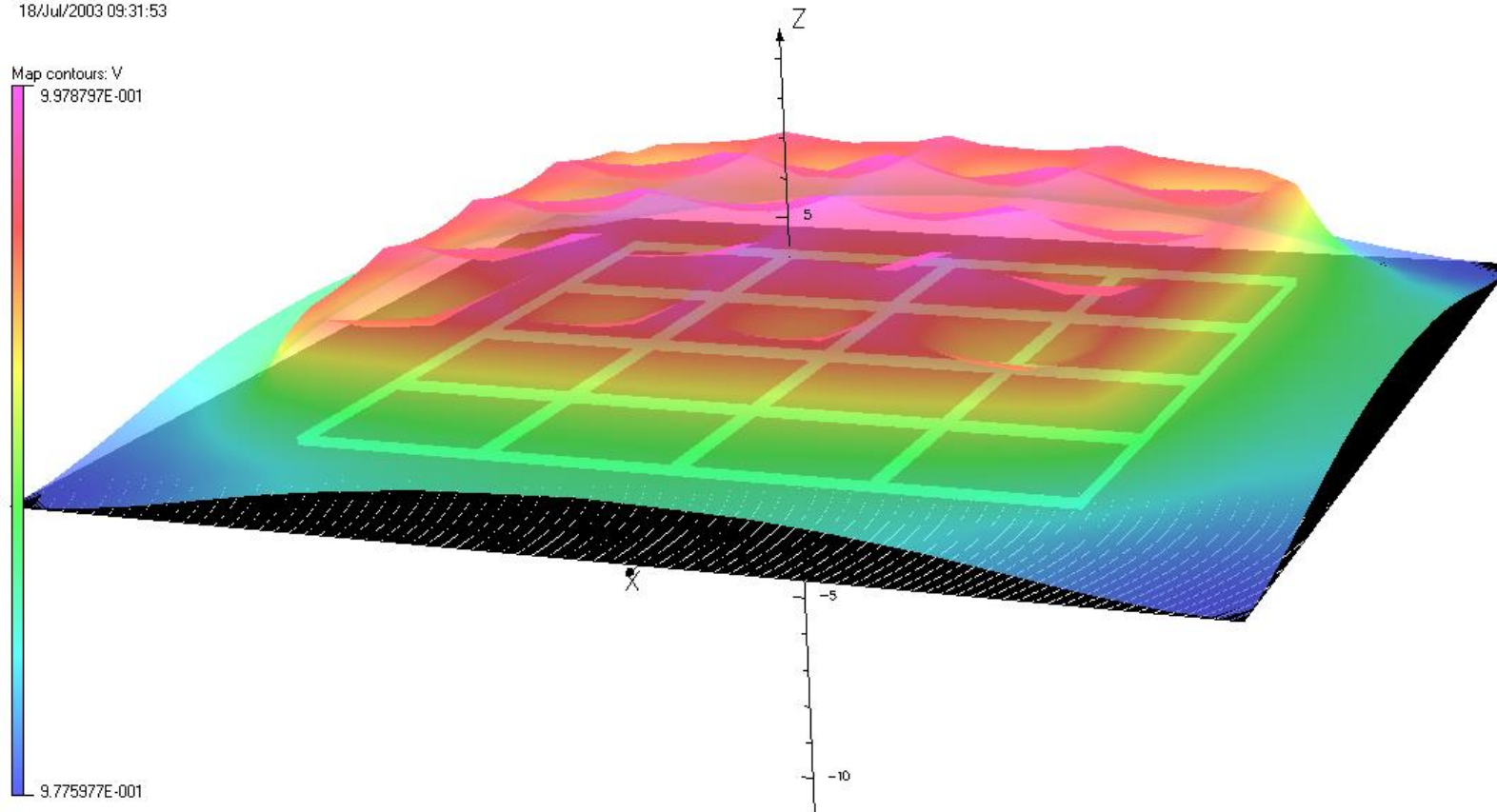
Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου



Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους

18/Jul/2003 09:31:53

Map contours: V
9.978797E-001



UNITS

Length	m
Magn Flux	T
Density	
Magn Field	A/m
Magn Scalar	A
Pot	
Magn Vector	Wb/m
Pot	
Elec Flux	C/m ²
Density	
Elec Field	V/m
Conductivity	S/m
Current Density	A/m ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA

rectgrid_ref1_allg.op3
TOSCA Current flow
Linear materials
Simulation No 1 of 1
2476817 elements
450737 nodes
Nodally interpolated fields

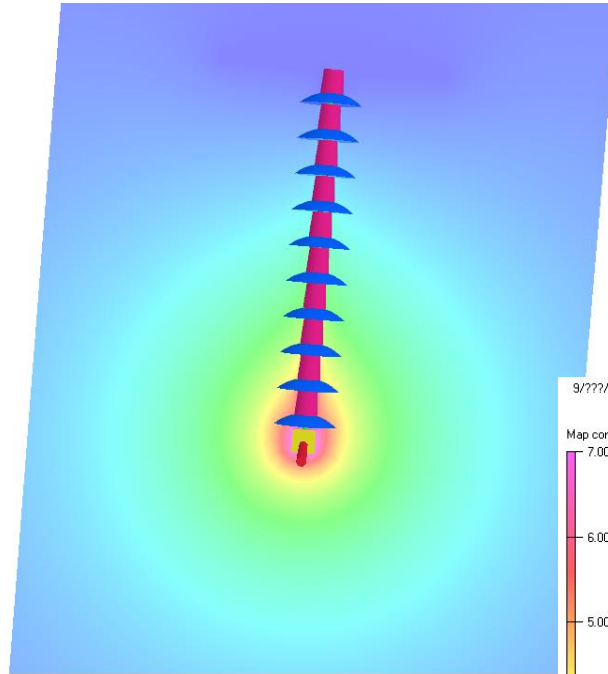
Local Coordinates

Origin: 0.0, 0.0, 0.0
Local XYZ = Global XYZ

Υπολογισμός πεδίου σε μονωτήρα

9/7/2006 12:16:51

Map contours: V
8.660300E+004
8.000000E+004
7.000000E+004
6.000000E+004
5.000000E+004
4.000000E+004
3.000000E+004
2.000000E+004
1.000000E+004
0.000000E+000



Κατανομή δυναμικού

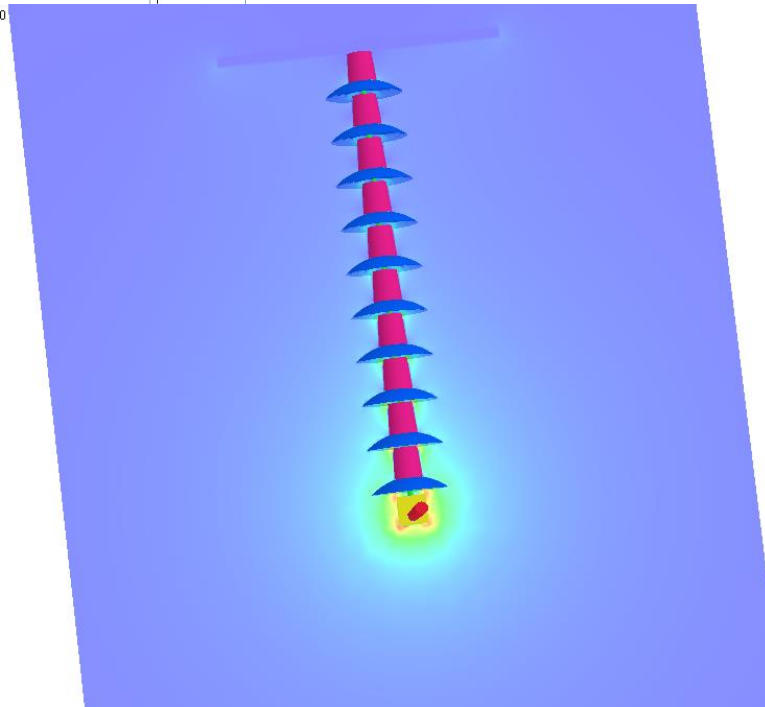
UNITS
Length mm
Magn Flux T
Density
Magn Field A/m
Magn Scalar A
Pot V
Magn Vector Wb/m²
Elec Flux C/m
Density V/m
Elec Field S
Conductivity mm
Current A
Density mm
Power W
Force N
Energy J

PROBLEM DATA
porcelainaggla9.op2
TOSCA
Electrostatic
Linear materials
Simulation No 1 of 1

Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου

9/7/2006 12:13:40

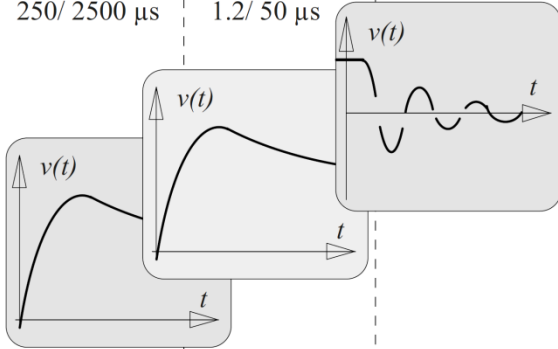
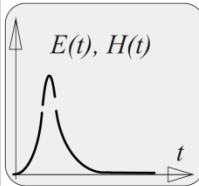
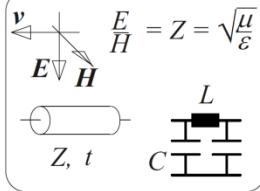
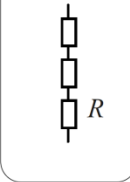
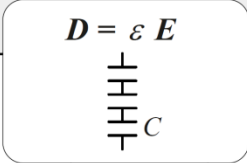
Map contours: EMOD
7.000000E+005
6.000000E+005
5.000000E+005
4.000000E+005
3.000000E+005
2.000000E+005
1.000000E+005
0.000000E+000



UNITS
Length mm
Magn Flux T
Density
Magn Field A/m
Magn Scalar A
Pot V
Magn Vector Wb/m²
Elec Flux C/m
Density V/m
Elec Field S
Conductivity mm
Current A
Density mm
Power W
Force N
Energy J

PROBLEM DATA
porcelainaggla9.op2
TOSCA
Electrostatic
Linear materials
Simulation No 1 of 1
3785164 elements
640648 nodes
Nodally interpolated fields

Local Coordinates
Origin: 0.0, 0.0, 0.0
Local XYZ = Global XYZ

DC voltage		AC voltage			Impulse voltage			Fast rising impulses
Steady-state DC voltages	Switching operations Polarity reversals	VLF 0.1 Hz	AC 50/ 60 Hz	AC 100/ 120 Hz 10 .. 500 Hz	Switching-impulse voltages	Lightning-impulse voltages	Pulsed discharges	
Days ... months	Hours, Changes in minutes	T = 10 s	T = 20 ms	T = 10 ms	250/ 2500 μs	1.2/ 50 μs		Rise times in the ns-range 
Electrical conduction fields stationary quasi-stationary Equivalent circuits with resistances		"Electrostatic" fields/ Quasi-static (quasi-stationary) displacement fields Equivalent circuits with capacitances						
$J = \kappa E$ 	$D = \epsilon E$ 							
High-voltage direct-current (HVDC) transmission X-ray tubes Monitors Lasers Charging devices Electrostatic percipitator Coating Electrostatic flock finishing		Three-phase alternating current 50(60) Hz harmonics n·50/ 60 Hz Cable testing Transformer testing Resonance testing (on-site)			"Internal" (switching-) overvoltages Switching-impulse withstand tests	"External" (lightning-) overvoltages Lightning-impulse withstand tests	Chopped lightning impulses Discharging of impulse-capacitors: Medical eng. Biotengineering Production Impulse lasers Recycling	Fast transients Pulsed power Nuclear Electromagnetic Pulse (NEMP) Partial Discharge (PD) impulses

Τυπικές
κυματομορφές

Είδος πεδίου
και ισοδύναμο
κύκλωμα

Τυπικές
εφαρμογές

Μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών πεδίων

Αναλυτικές μέθοδοι

- Εξίσωση Laplace/Poisson
- Μετασχηματισμός συντεταγμένων
- Σύμμορφη απεικόνιση

Αριθμητικές μέθοδοι

- Διαφορικές μέθοδοι
 - Διαδοχικές επαναλήψεις
 - Πεπερασμένα στοιχεία
- Ολοκληρωτικές μέθοδοι
 - Ισοδύναμα φορτία
 - Επιφανειακά τμήματα
- Υβριδική μέθοδος (πεπερασμένα στοιχεία και ισοδύναμα φορτία)

Αναλυτικές μέθοδοι (1)

Βασικές σχέσεις:

$$\text{Εξίσωση Laplace} \quad \Delta \Phi = 0 \quad \text{Εξίσωση Poisson} \quad \Delta \Phi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\bar{\mathbf{E}} = -\text{grad} \Phi \quad \bar{\mathbf{D}} = \varepsilon \bar{\mathbf{E}} \quad \text{rot} \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad \text{div} \bar{\mathbf{E}} = -\Delta \Phi = \frac{\rho}{\varepsilon} \Rightarrow \text{div} \bar{\mathbf{D}} = \rho$$

$$\text{Gauss} \quad \oint \rho \, dV = \oint \mathbf{D}_n \, dA = Q$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\text{div} \bar{\mathbf{E}} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

$$\text{grad} = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\text{rot} \bar{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{bmatrix}$$

Αναλυτικές μέθοδοι (2)

Αλγόριθμος:

- Διαλέγουμε κατάλληλη επιφάνεια ($\bar{D} = \text{σταθερό}$)
- Νόμος Gauss
- Εφαρμόζουμε το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της πεδιακής έντασης $\int_{\text{επικ.}} \bar{E} d\bar{\ell} = U$
- Με απαλοιφή του Q από τις σχέσεις $\bar{E} = f(Q)$ και $U = f(Q)$ προκύπτει η πεδιακή ένταση $\bar{E} = f(U)$
- Υπολογισμός της χωρητικότητας της διάταξης $C = \frac{Q}{U}$
- Εκτίμηση της μέγιστης έντασης ηλεκτρικού πεδίου $E_{\max}$
- Βελτιστοποίηση (π.χ. ελαχιστοποίηση της $E_{\max}$)

Συντελεστής αξιοποίησης/χρησιμοποίησης ηλεκτρικού πεδίου

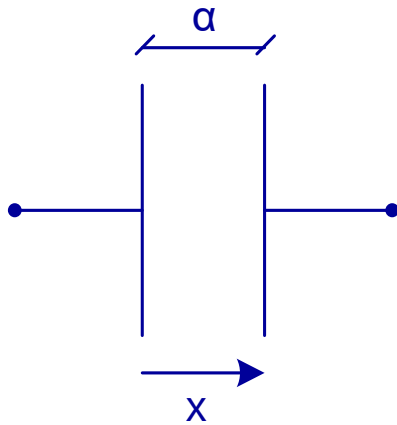
$$\eta = \frac{E_{\text{hom}}}{E_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{U/d}{E_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

Τάση ενάρξεως εκκενώσεων

$$U_{\alpha} = \frac{E_{\alpha} \cdot \alpha \cdot \eta}{100}$$

Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (1)

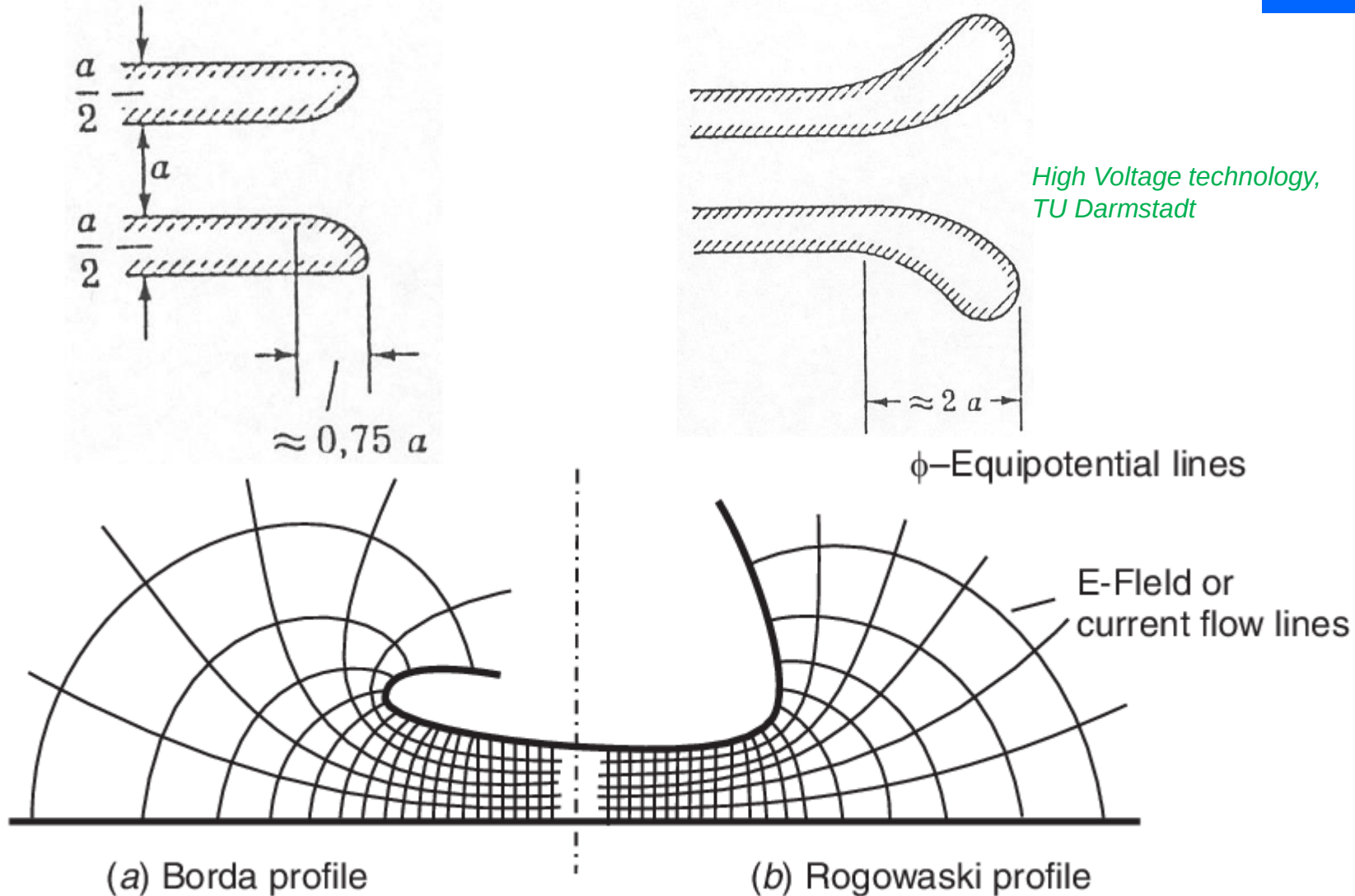


$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = 0 \Rightarrow \Phi = \frac{U}{\alpha} \cdot x$$

$$E_x = \frac{U}{\alpha}$$

$$\eta = 100\%$$

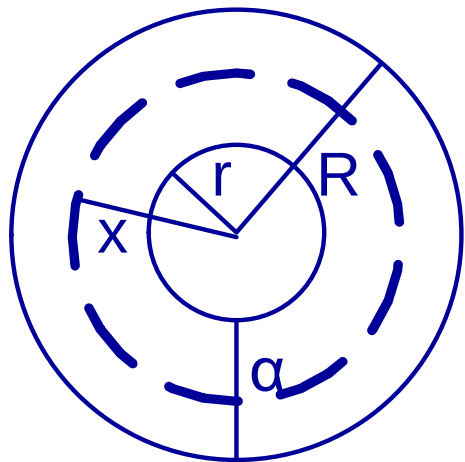
Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (2)



High Voltage technology,
TU Darmstadt

Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (3)

Κύλινδρος



$$Q = \oint D_n dA = D_x \cdot 2\pi x \ell \Rightarrow D_x = \frac{Q}{2\pi x \ell}$$

$$E_x = \frac{Q}{2\pi \epsilon x \ell} \quad (1)$$

$$U = \int_{\epsilon\pi\kappa.} E_x dx = \frac{Q}{2\pi \epsilon \ell} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

$$\frac{E_x}{U} = \frac{1/x}{\ln(R/r)} \Rightarrow E_x = \frac{U}{x \cdot \ln(R/r)} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{\min} = \frac{U}{R \cdot \ln(R/r)} \\ E_{\max} = \frac{U}{r \cdot \ln(R/r)} \end{array} \right.$$

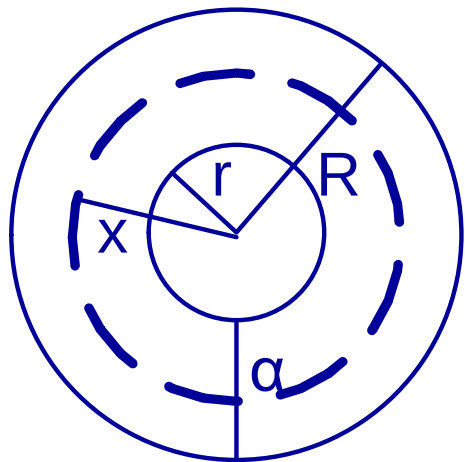
$$\eta = \frac{r \cdot \ln(R/r)}{R - r} = \frac{\ln p}{p - 1} \quad (\text{Καλώδια: } \eta = 70 \dots 40\%)$$

$$p = \frac{\alpha + r}{r} = \frac{R}{r} \quad (p = 2 \dots 5)$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi \epsilon \ell}{\ln(R/r)}$$

Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (4)

Σφαίρα



$$Q = \oint D_n dA = D_x \cdot 4\pi x^2 \Rightarrow D_x = \frac{Q}{4\pi x^2}$$

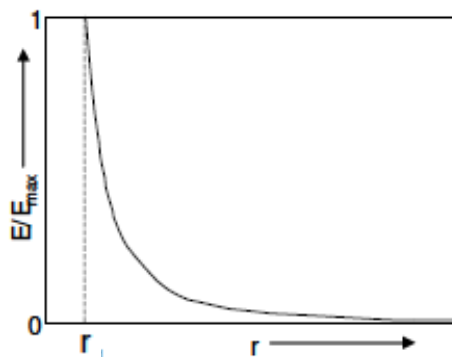
$$E_x = \frac{Q}{4\pi\epsilon x^2} \quad (1)$$

$$U = \int_{\text{επικ.}} E_x dx = \frac{Q}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{R - r}{R \cdot r} \quad (2)$$

$$\frac{E_x}{U} = \frac{R \cdot r}{R - r} \cdot \frac{1}{x^2} \Rightarrow E_x = U \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \frac{R \cdot r}{R - r} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{\min} = U \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{R - r} \\ E_{\max} = U \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{R}{R - r} \end{array} \right.$$

$$\eta = \frac{r}{R}$$

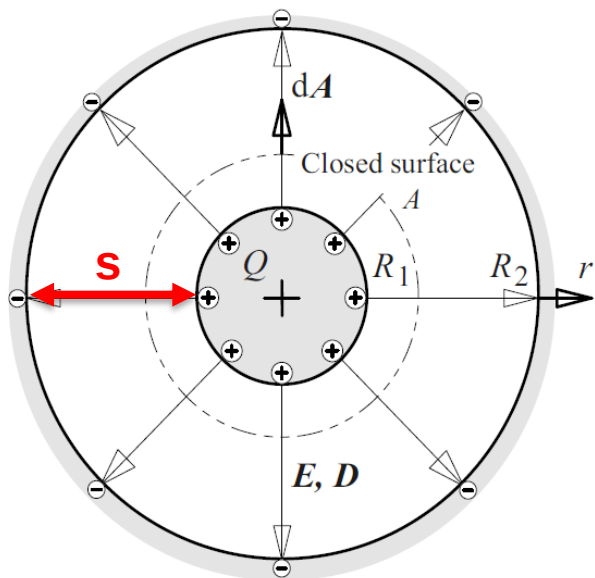
$$p = \frac{\alpha + r}{r} = \frac{R}{r} = \frac{1}{\eta}$$



$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon \cdot \frac{R \cdot r}{R - r}$$

Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (5)

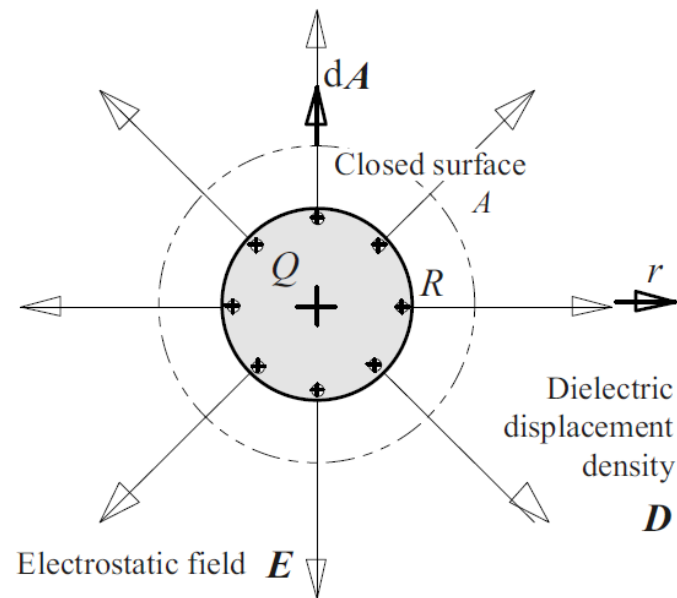
Ομόκεντρες σφαίρες



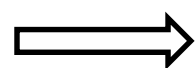
$$C_{conc} = 4\pi\epsilon R_1 \cdot \frac{s + R_1}{s}$$

$$C_{conc} = C_{free} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{s}\right)$$

Σφαίρα σε ελεύθερο χώρο



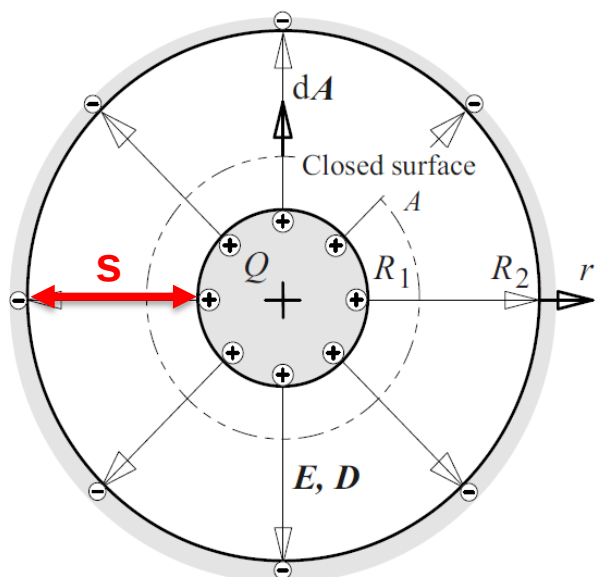
$$C_{free} = 4\pi\epsilon R$$



$$\text{πάντα } C_{conc} > C_{free}$$

Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (6)

Ομόκεντρες σφαίρες

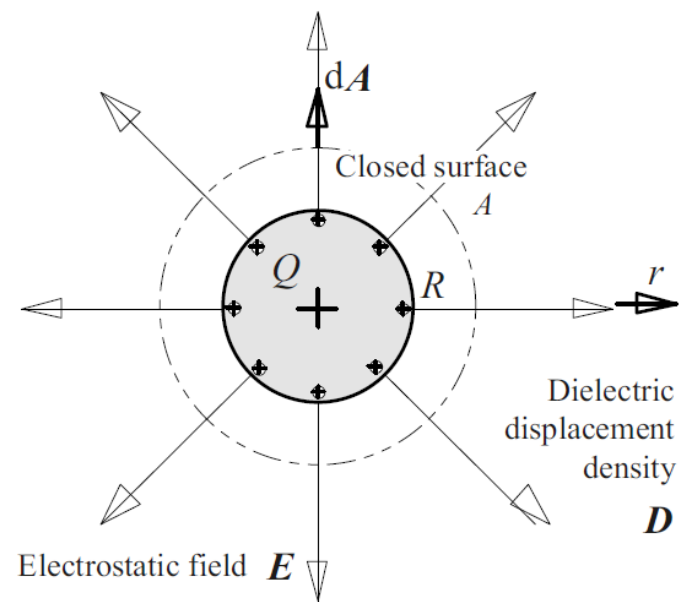


$$E_{\max, \text{conc}} = \frac{U}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_2 - R_1}$$

$$E_{\max, \text{conc}} = E_{\max, \text{free}} \cdot \frac{R_2}{R_2 - R_1} \implies \text{πάντα } E_{\max, \text{conc}} > E_{\max, \text{free}}$$

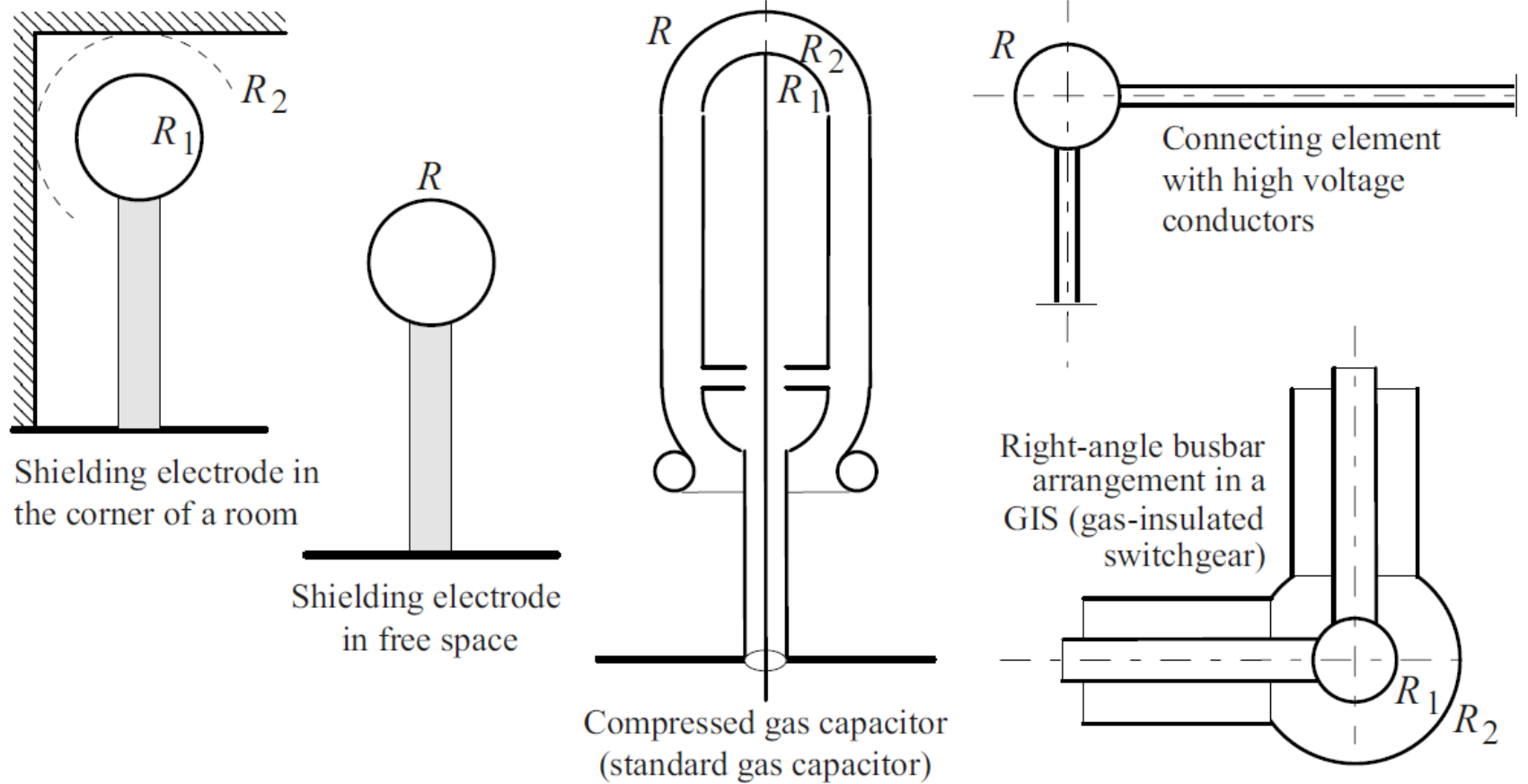
$$\text{π.χ. } R_2 = 5 \cdot R_1 \implies E_{\max, \text{conc}} = 1,25 \cdot E_{\max, \text{free}}$$

Σφαίρα σε ελεύθερο χώρο



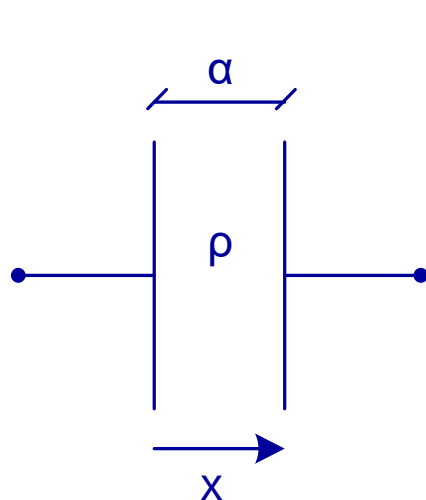
$$E_{\max, \text{free}} = \frac{U}{R}$$

Παραδείγματα σφαιρικών και κυλινδρικών πεδίων

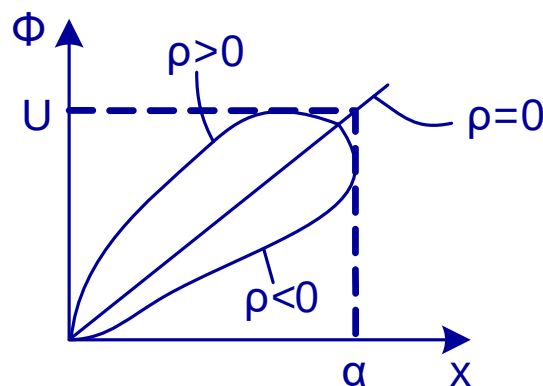


Εφαρμογές αναλυτικής μεθόδου (7)

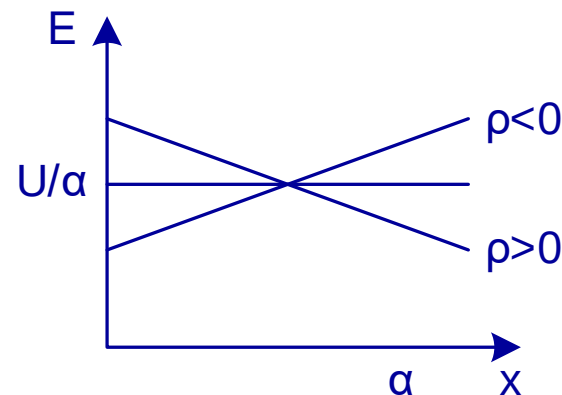
Με χωρικό φορτίο



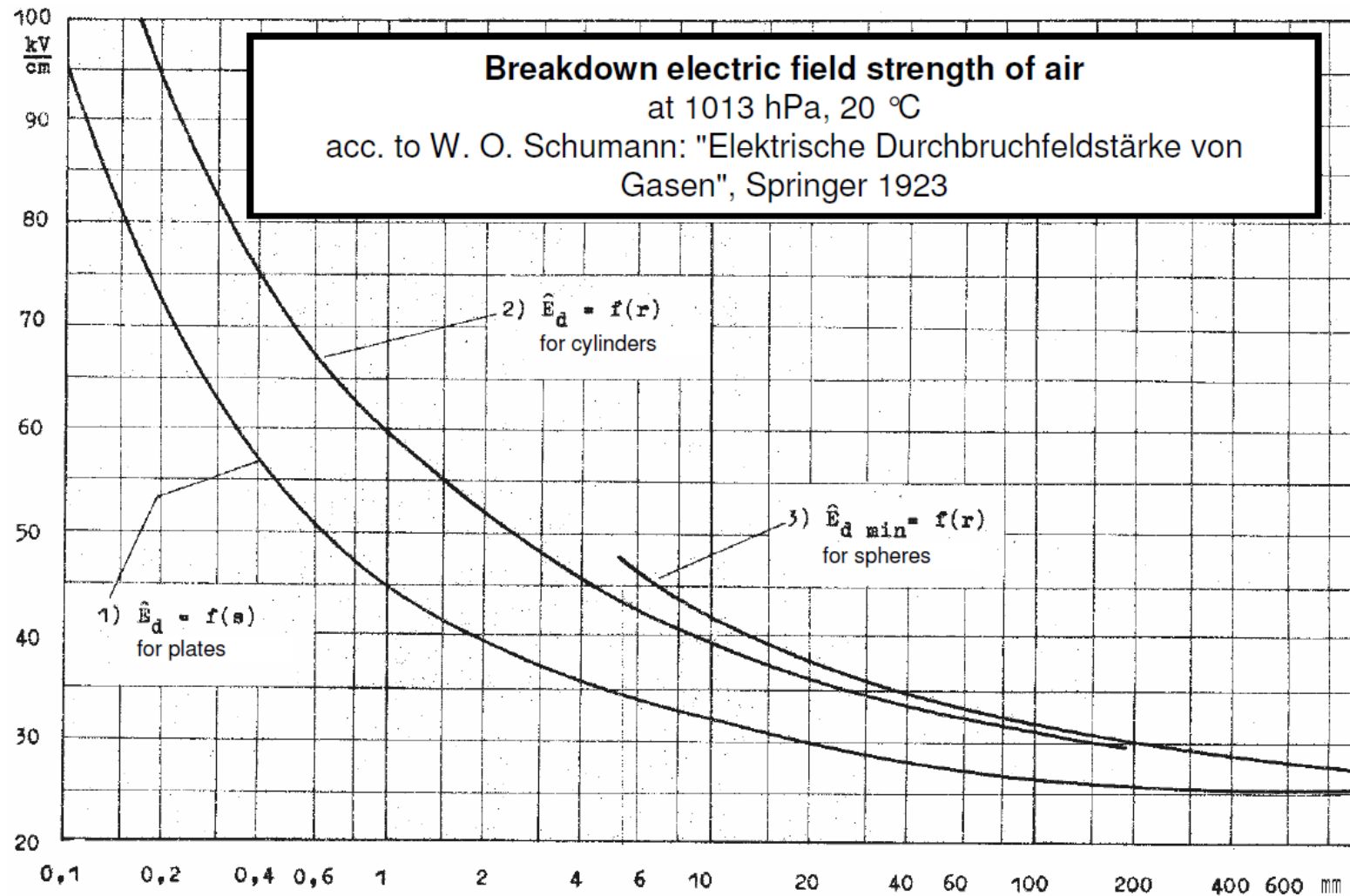
$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \Phi = \frac{U}{\alpha} \cdot x + \frac{\rho}{\epsilon} \cdot \frac{x}{2} \cdot (\alpha - x)$$



$$E = -grad\Phi = -\left[\frac{U}{\alpha} + \frac{\rho}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\alpha}{2} - x \right) \right]$$



Τάση διάσπασης



Μετασχηματισμός συντεταγμένων (1)

Σφαίρα – Ομογενές πεδίο (r, θ, φ)

$$\Phi = \Phi_o + E_h \cdot r \cdot \left[1 - \left(\frac{r_I}{r} \right)^3 \right] \cdot \cos \theta$$

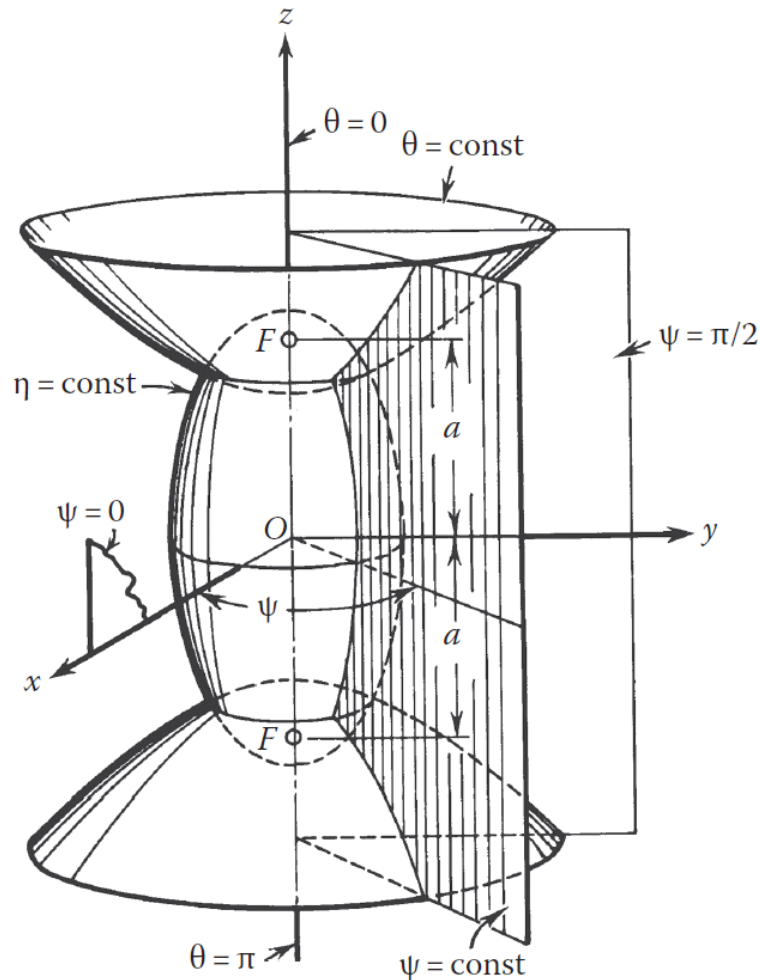
$$E = - \left[\alpha_r \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\alpha_\theta}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right]$$

$$E_r = -E_h \cdot \cos \theta \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{r_I}{r} \right)^3 \right]$$

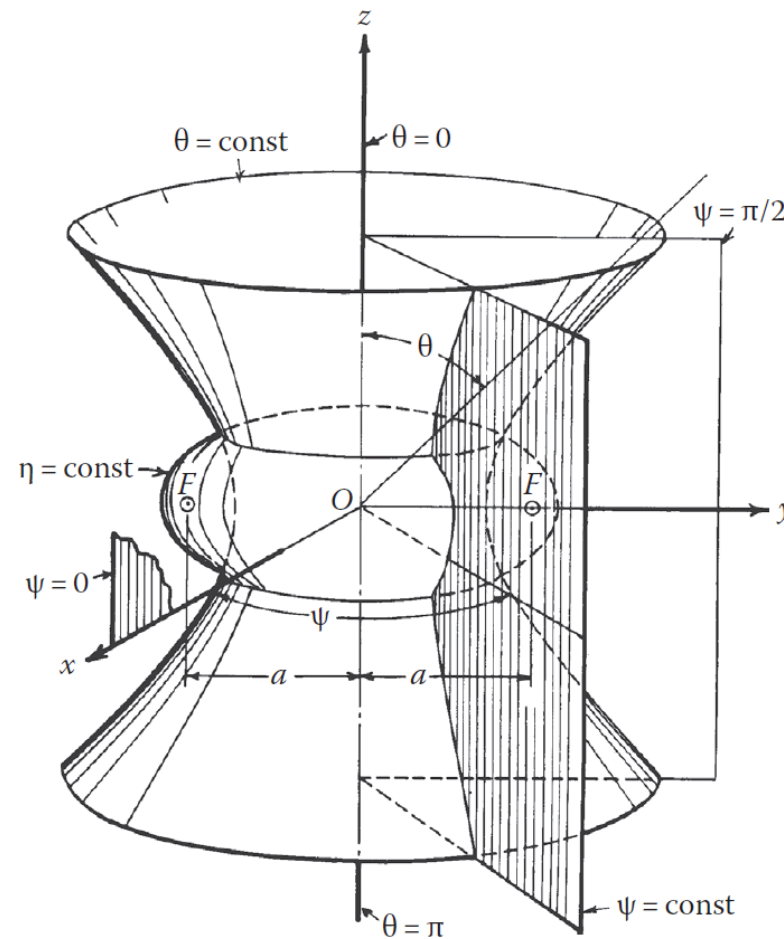
$$E_\theta = E_h \cdot \sin \theta \cdot \left[1 - \left(\frac{r_I}{r} \right)^3 \right]$$

$$E_r = -3 \cdot E_h \cdot \cos \theta \quad \text{επάνω στην επιφάνεια της σφαίρας.}$$

Μετασχηματισμός συντεταγμένων (2)



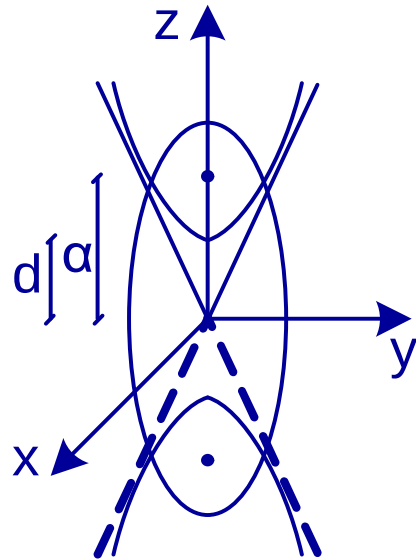
Prolate spheroidal coordinate system.



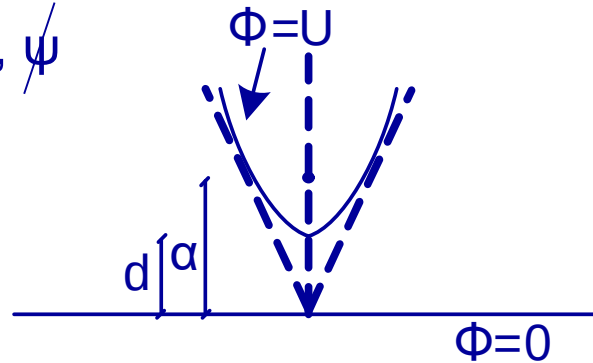
Oblate spheroidal coordinate system.

Μετασχηματισμός συντεταγμένων (3)

Υπερβολοειδές (Επιμήκεις Ελλειψοειδείς συντεταγμένες)



η, θ, ψ



$$d = \alpha \cdot \cos \theta_I, \quad \rho_1 = \alpha \cdot \cos \theta_I \cdot \tan \theta_I$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\theta^2} + \cot \theta \cdot \frac{d\Phi}{d\theta} = 0 \Rightarrow \Phi = A + B \cdot \ln \cot \left(\frac{\theta}{2} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \theta = \theta_I \rightarrow \Phi = U \\ \theta = \frac{\pi}{2} \rightarrow \Phi = 0 \end{array} \right\} \Phi = \frac{\ln \cot \left(\frac{\theta}{2} \right)}{\ln \cot \left(\frac{\theta_I}{2} \right)} \cdot U$$

Μετασχηματισμός συντεταγμένων (4)

$$\vec{E} = \frac{1}{\alpha \cdot \sqrt{\sinh^2 n + \sin^2 \theta}} \cdot \vec{\alpha}_\theta \cdot \frac{d\Phi}{d\theta}$$

$$|E| = \frac{\cos \theta_I}{d \cdot \sqrt{\sinh^2 n + \sin^2 \theta}} \cdot \frac{U}{\sin \theta \cdot \ln \cot \left(\frac{\theta_I}{2} \right)}$$

$$\text{Για } \theta = \theta_I, n = 0$$

$$E_{\max} = \frac{U}{d} \cdot \frac{\cos \theta_I}{\sin^2 \theta_I \cdot \ln \cot \left(\frac{\theta_I}{2} \right)} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\sin \theta_I \cdot \tan \theta_I \cdot \ln \cot \left(\frac{\theta_I}{2} \right)}$$

$$\text{Συντελεστής χρησιμοποίησης: } \eta = \frac{U/d}{E_{\max}} \Rightarrow \eta = \sin \theta_I \cdot \tan \theta_I \cdot \ln \cot \left(\frac{\theta_I}{2} \right)$$

Γραφική απεικόνιση του πεδίου

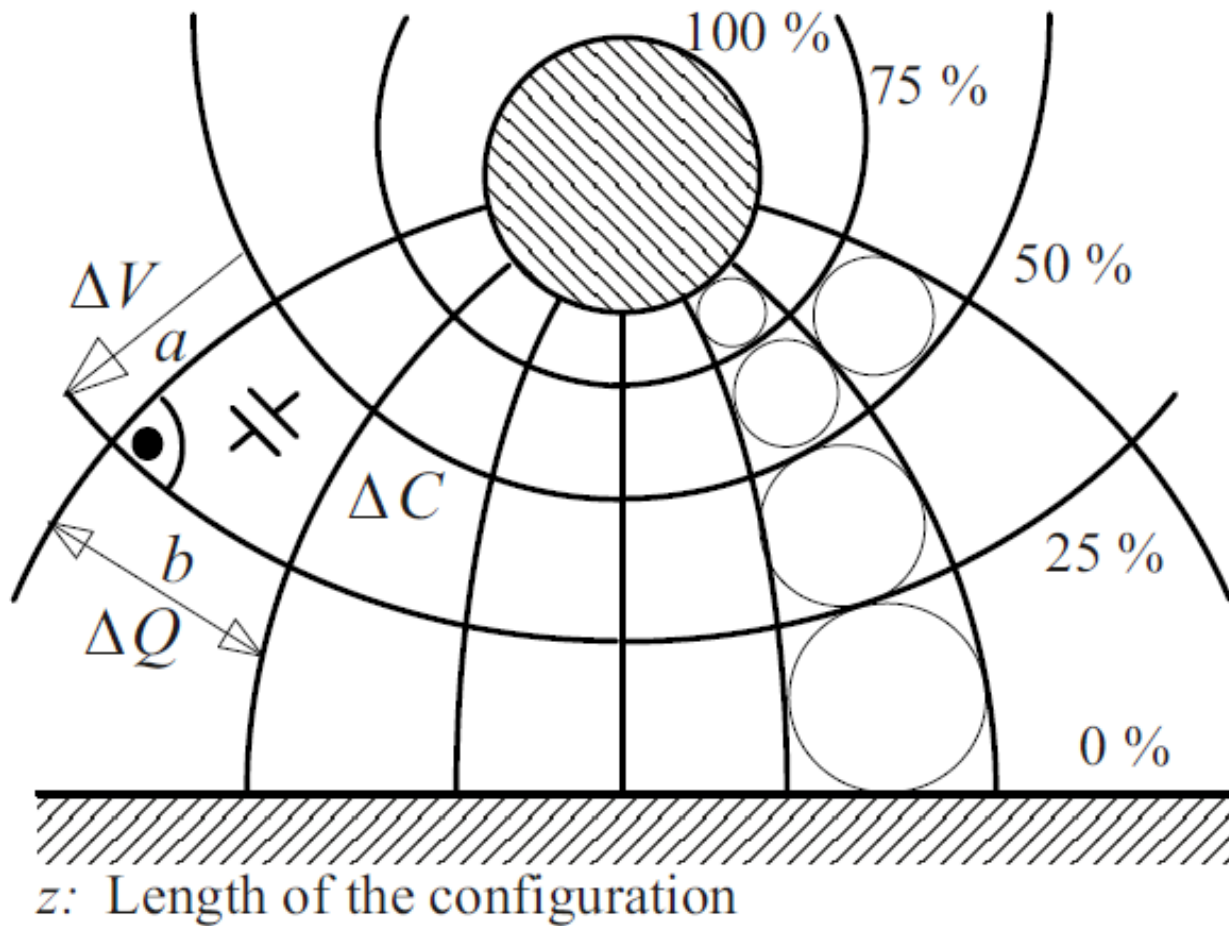
Για επίπεδο, διδιάστατο πεδίο:

- Οι γραμμές πεδίου και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες μεταξύ τους.
- Οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων είναι ισοδυναμικές επιφάνειες (συνήθως το δυναμικό αναφοράς είναι 0% και το δυναμικό υψηλής τάσης είναι 100%).
- Οι γραμμές πεδίου και οι επιφάνειες των ηλεκτροδίων είναι κάθετες.
- Η απόσταση a μεταξύ δύο ισοδυναμικών γραμμών σχετίζεται πάντα με την ίδια διαφορά δυναμικού ΔV . Η απόσταση b μεταξύ δύο γραμμών πεδίου σχετίζεται πάντα με το ίδιο φορτίο των ηλεκτροδίων ΔQ . Συνεπώς, η στοιχειώδης χωρητικότητα $\Delta C = \Delta Q / \Delta V$, η οποία σχετίζεται με κάθε 'κουτί' ή στοιχείο με μήκος z , είναι ίση για όλα τα 'κουτιά' (στοιχεία):

$$\Delta C = \Delta Q / \Delta V = \epsilon z b/a = \text{σταθερός}$$

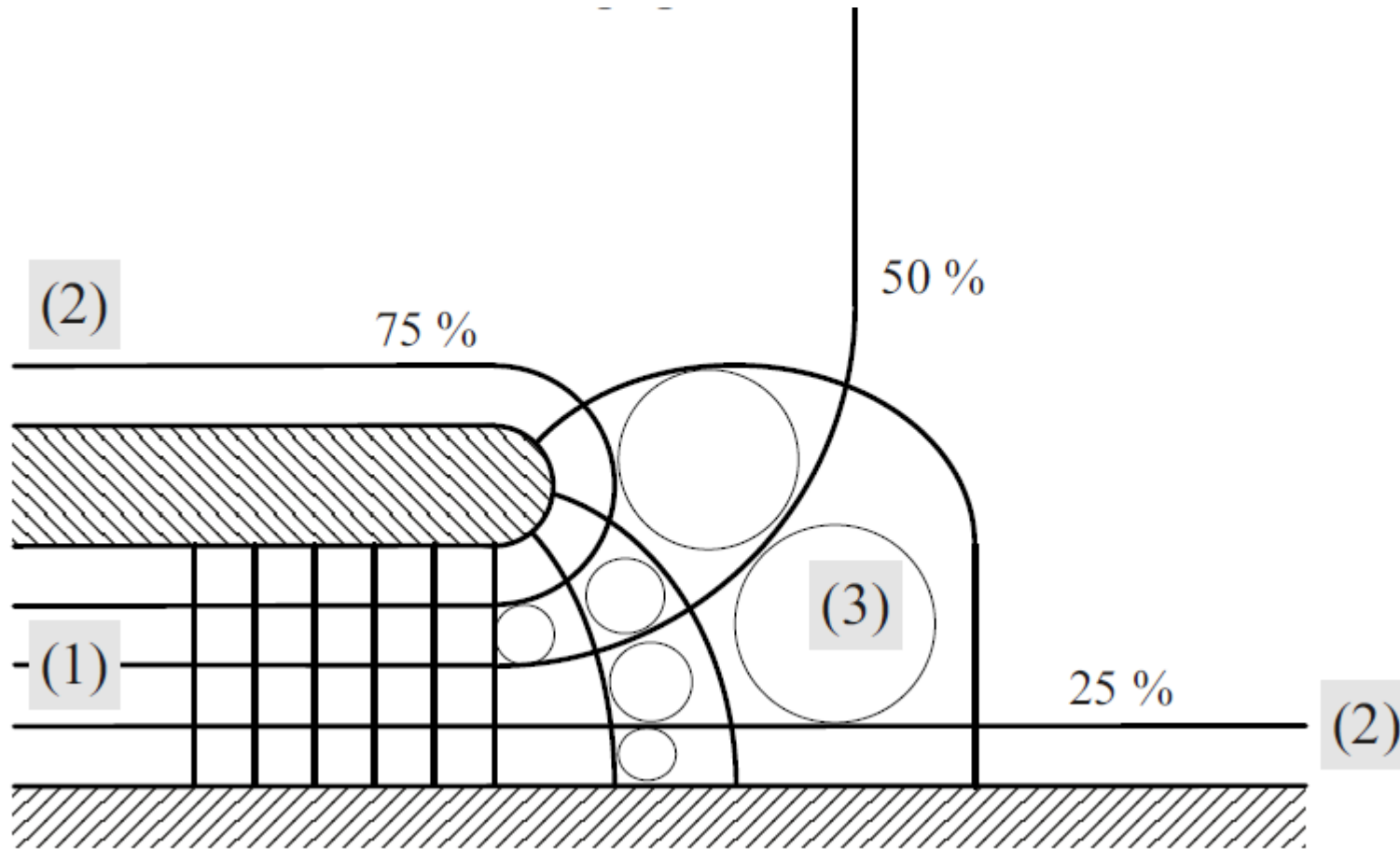
Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος του πλάτους προς το ύψος είναι σταθερός για όλα τα στοιχεία: $b/a = \text{σταθερός}$

Γραφική απεικόνιση του πεδίου



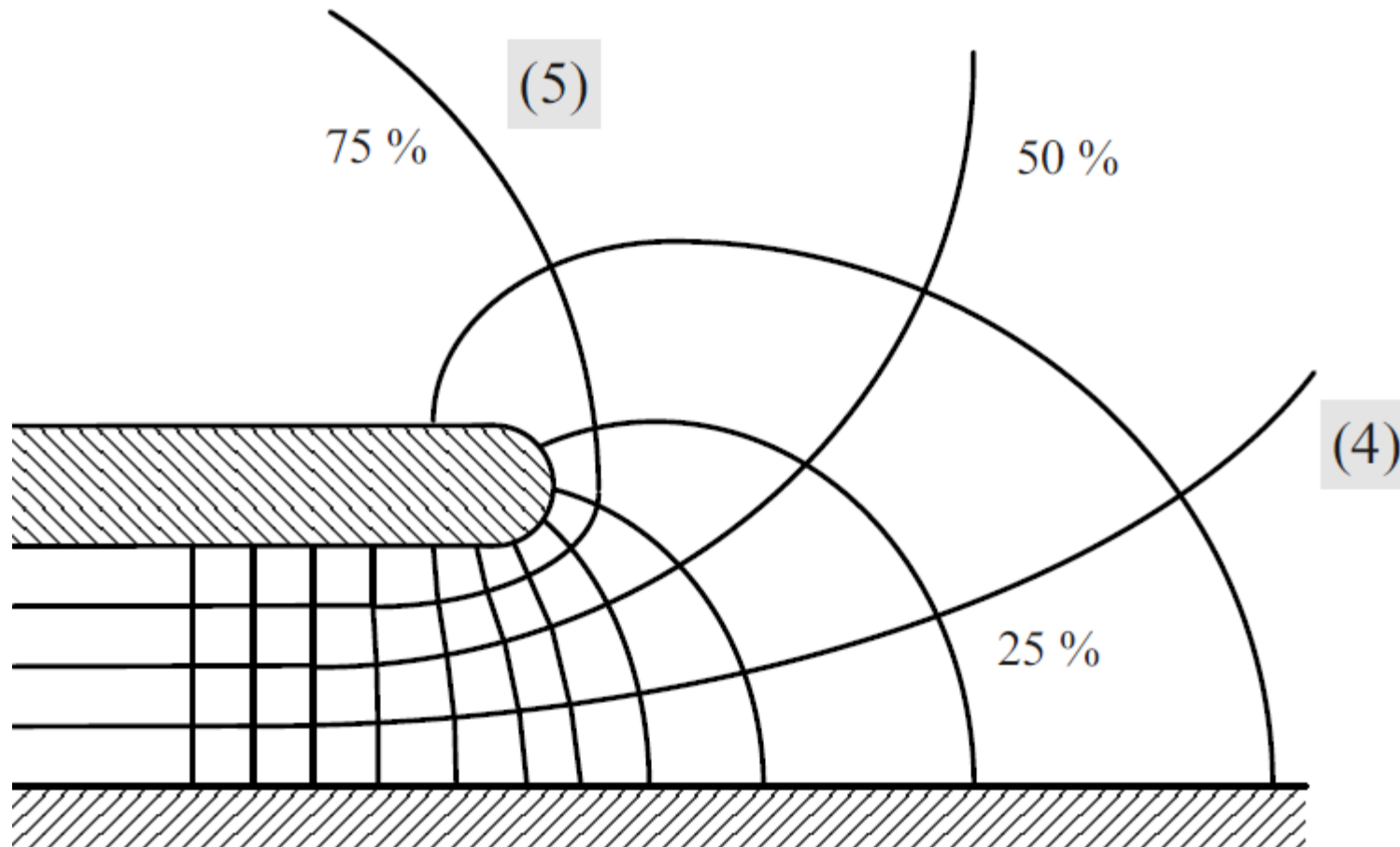
Γραφική απεικόνιση του πεδίου

Βήμα 1: Πρόχειρη προσέγγιση των γραμμών πεδίου και των ισοδυναμικών γραμμών



Γραφική απεικόνιση του πεδίου

Βήμα 2: Βελτίωση των γραμμών πεδίου και των ισοδυναμικών γραμμών



Γραφική απεικόνιση του πεδίου

Βήμα 3: Περαιτέρω βελτίωση των γραμμών πεδίου και των ισοδυναμικών γραμμών

