

# 1.

## Osnovni pojmovi o elektricitetu

### 1.0. Uvod

Starogrčki filozof *Tales* je oko 600 godina prije nove ere zapisao da jantar natrljan krznom privlači lake predmete kao što su kosa, vuna, drvena piljevina i slično.

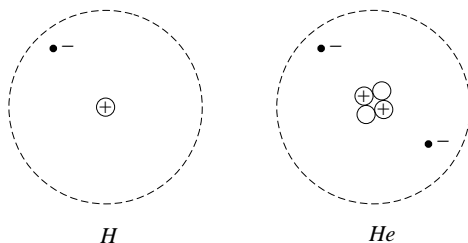
Engleski je liječnik *William Gilbert* oko 1600. godine zapazio da i neka druga tijela kao npr. staklo ili krzno trljanjem stiču ista svojstva kao natrljani jantar. Budući da se jantar na starogrčkom jeziku zove **elektron**, Gilbert je rekao da su se ta tijela trljanjem naelektrizirala. Tek u drugoj polovici 18. stoljeća došlo je do spoznaje da je naelektriziranost tijela posljedica prisutnosti neke supstance koja je nazvana elektricitet te da ima dvije vrste elektriciteta. Jedna vrsta stvara se na staklenom štapu kada se trlja svilom, a druga vrsta na štapu od ebonita kada se trlja krznom. Još i danas se ne zna što je električni naboj, ali se znaju njegova svojstva.

Američki fizičar *Benjamin Franklin* (1706. – 1790.) bez ikakvog je razloga nazvao elektricitet na staklenom štapu pozitivnim, a na ebonitu negativnim. Takav naziv zadržan je i danas, jer pojednostavnjuje matematičko opisivanje pojmova. Stupanj naelektriziranosti tijela ovisi o stvorenoj količini elektriciteta, odnosno količini električnog naboja ili kraće naboja.

Prvi je zakon otkrio *Coulomb* 1785. godine i za posljednjih 200 godina otkriveno je sve što se sada zna o električnim pojavama. Na osnovu toga napravljeni su razni složeni uređaji poput radija, televizije, računala i slično.

Danas se zna da je materija sastavljena od sitnih oku nevidljivih čestica zvanih atomi, koji se ne mogu jednostavnim sredstvima rastaviti. U prirodi oko nas postoji 90 vrsta atoma, koji se međusobno razlikuju po svojoj unutrašnjoj građi i nekim drugim osobinama. Promjer atoma je oko  $10^{-10}$  m. On se sastoji od jezgre i elektrona. Promjer jezgre atoma je oko  $10^{-14}$  m. Ona se sastoji od protona i neutrona,

koji imaju svoju masu. Pored mase, svaki proton sadrži električni naboj, tzv. elementarni naboj, kojemu je dan predznak plus (+). Oko jezgre čiji je promjer oko  $10^{-15}$  m, kruže velikom brzinom elektroni. Elektroni imaju masu mnogo manju od mase protona i elementarni negativni naboj po iznosu jednak naboju protona. Broj elektrona i protona u atomu mora biti uvijek isti. Vrsta atoma određena je brojem protona, a broj neutrona može biti donekle različit. Najjednostavniji je atom vodika (H) koji ima jedan proton i jedan elektron (sl. 1.1). Sljedeći element je helij (He), koji ima dva protona, dva elektrona i dva neutrona (sl. 1.1).



Sl. 1.1. Shematski prikaz građe atoma vodika i helija.

Ostali elementi imaju veći broj protona i neutrona, kao i elektrona. Tako npr. bakar (Cu) ima 29 protona i 29 elektrona, koji čine elektronski omotač oko jezgre. Raspored tih elektrona nije slučajna, već je strogo određen. Različiti eksperimenti pokazali su da svaki elektron u atomu ima određenu energiju. Elektroni se u atomu nalaze u različitim, ali točno određenim energetskekim nivoima ili ljuskama. Postoji sedam takvih ljuski (K, L, M, N, O, P, Q). U prvoj ljusci mogu biti najviše dva elektrona u različitim podljuskama. Vodik i helij imaju samo jednu ljusku, dok bakar ima četiri ljuske, tako da se u posljednjoj, četvrtoj nalazi 11 elektrona. Posljednja ljuska svakog atoma zove se valentna ljuska i o njoj ovise određena svojstva atoma. Samo elektron iz valentne ljuske pod određenim uvjetima može napustiti atom, dok elektroni iz prethodnih ljuski ne mogu napustiti atom.

**Svi elektroni imaju istu masu**

$$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} .$$

**i električni elementarni negativni naboj**

$$e_0 = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C (kulona)} .$$

Isto tako **svi protoni imaju istu masu**

$$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} .$$

**i električni elementarni pozitivni naboj**

$$e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C (kulona)} .$$

Jedinica za mjerenje količine naboja je kulon (coulomb) i skraćeno se označava sa C. Isto tako upotrebljava se da je  $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$  (amper sekunda). Iz praktičnih

razloga za elementarni naboj elektrona i protona izabrana je tako mala jedinica. Kako je došlo do izbora te veličine, za nas nije toliko bitno pa se nećemo upuštati u daljnje objašnjavanje.

---

---

## 1.1. Električni naboj

---

---

Vidjeli smo da se djelovanje između dva naelektrizirana tijela odvija bez vidljivog posrednika. To djelovanje pripisujemo električnom naboju. Elementarni pozitivni naboj nosi proton, a negativni elektron. U svakom atomu ima isti broj protona i elektrona, pa je atom električki neutralan. Trljanjem se ta ravnoteža u nekim tvarima može poremetiti, jer jedno tijelo ostane bez određenog broja elektrona pa ima višak pozitivnog naboja, a drugo tijelo ima višak negativnog naboja. Na taj način jedno tijelo postaje pozitivno naelektrizirano, a drugo negativno naelektrizirano. Tako naelektrizirano tijelo djeluje na sitne predmete silom. Ta sila potječe od viška električnog naboja na tom tijelu. Dakle, mi znamo da električne sile postoje, ali ne znamo zbog čega one djeluju, jer ne znamo što je električni naboj. Iako ne znamo što je električni naboj, mi poznajemo mnoga njegova svojstva, što nam je dovoljno da možemo izračunati tu električnu silu. Osnovna svojstva električnog naboja navest ćemo u sljedećim točkama:

1. Postoje dvije vrste naboja, pozitivni i negativni.
2. Istoimeni naboji se odbijaju, a raznoimeni privlače.
3. U prirodi postoji najmanji naboj, tzv. elementarni naboj. Nositelji elementarnih naboja su elementarne čestice, elektroni i protoni. Elektron ima negativan, a proton pozitivan električni elementarni naboj, koji se označava slovom  $e_0$  i iznosi

$$e_0 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C (kulona).}$$

4. Smatra se da se električni naboj pojavljuje na tijelima kao višekratnik elementarnog naboja, tj.

$$\boxed{Q = ne_0} \quad (1.1)$$

gdje je  $Q$  — oznaka za količinu naboja, a  $n$  — cijeli broj ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

5. Ako neko tijelo ima više jedne vrste naboja (pozitivnog ili negativnog), onda kažemo da je takvo tijelo naelektrizirano pozitivno ili negativno.
6. Električki neutralno tijelo mora imati isti broj pozitivnih i negativnih naboja, jednako raspoređenih po tijelu. Ako bi se na jednom dijelu tijela nakupilo više jedne vrste naboja, a na drugom više suprotnog naboja, tada se takvo tijelo ne bi ponašalo neutralno, već kao naelektrizirano tijelo.

Elementarni naboj u atomu raspoređen je tako da je atom prema okolini električki neutralan.

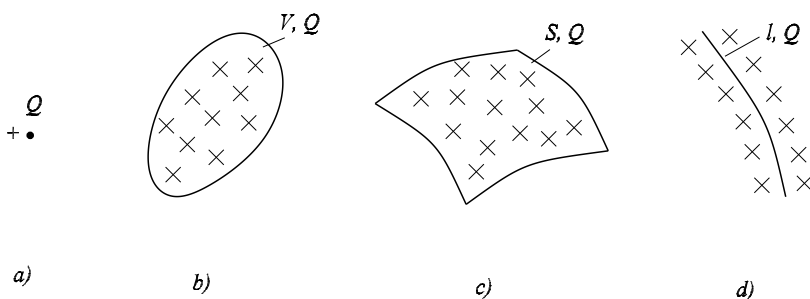
7. Kako se elektron i proton ne mogu uništiti, tako se ni elementarni naboj ne može uništiti. Iz toga proizlazi da je suma naboja u zatvorenom i izoliranom prostoru konstantna. Taj se zakon zove **zakon o očuvanju naboja**.

Premda se elektron u atomu giba velikom brzinom, za vanjskog promatrača on praktički miruje. U slučaju kada se višak naboja skupi na maloj kuglici, tada se obično kaže da se radi o točkastom naboju, (sl. 1.2a). Međutim, naboj može biti raspodijeljen kontinuirano po volumenu, površini i liniji. Često je ta raspodjela jednolika, pa se u tom slučaju može jednostavno definirati gustoća raspodjele.

Tako na primjer, ako je naboj jednoliko raspodijeljen po tijelu volumena  $V$ , (sl. 1.2b), tada je **volumna gustoća naboja**

$$\rho = \frac{Q}{V}, \quad \frac{C}{m^3} \quad (1.2)$$

( $\rho$  je grčko slovo  $\rho$ ). Jedinica za volumnu gustoću je  $C/m^3$ .



Sl. 1.2. Električni naboj: a) točkasti; b) volumni u tijelu volumena  $V$ ; c) površinski po površini  $S$ ; d) linijski po liniji  $l$ .

Isto tako, ako je naboj jednoliko raspoređen po površini  $S$  neke plohe, (sl. 1.2c), tada je **plošna gustoća**

$$\sigma = \frac{Q}{S}, \quad \frac{C}{m^2} \quad (1.3)$$

( $\sigma$  je grčko slovo  $\sigma$ ). Jedinica za plošnu gustoću je  $C/m^2$ .

Analogno se definira **linijska gustoća**

$$\lambda = \frac{Q}{l}, \quad \frac{C}{m} \quad (1.4)$$

( $\lambda$  je grčko slovo  $\lambda$ ). Ovdje je  $Q$  naboj jednoliko raspoređen po liniji duljine  $l$ , (sl. 1.2d). Jedinica za linearnu gustoću je  $C/m$ .

**Primjer 1.1.** *Odredite koliko protona ima u naboju  $Q = 1 \text{ C}$ .*

*Rješenje.* Iz relacije (1.1) slijedi da je

$$n = \frac{Q}{e_0} = \frac{1 \text{ C}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6.25 \cdot 10^{18} \text{ protona.}$$

To je zaista velik broj, ali treba imati na umu da u  $1 \text{ m}^3$  čvrstih tijela ima oko  $10^{29}$  atoma. Gornji bi broj atoma stao u kuglicu polumjera manjeg od  $0.1 \text{ mm}$ .

**Primjer 1.2.** *Na ploči površine  $S = 4 \text{ m}^2$  nalazi se jednoliko raspodijeljen naboj  $Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ . Kolika je plošna gustoća naboja?*

*Rješenje.* Iz relacije (1.3) slijedi da je plošna gustoća

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{4} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2.$$

## 1.2. Vodiči, izolatori i poluvodiči

**U električnom pogledu materijali se mogu podijeliti na vodiče i dielektrike.** Za električne pojave najveću ulogu imaju valentni elektroni, tj. elektroni u posljednjoj ljusci atoma, koja može biti i nepopunjena. Kod nepopunjene valentne ljuske elektroni se mogu pomicati na njezine slobodne putanje. Veza takvih elektrona s jezgrom je slaba. Pod djelovanjem vanjskih sila ti elektroni se lako odvajaju od svog atoma i mogu se slobodno kretati u krutim tvarima, od atoma do atoma. Takvi se elektroni zovu **slobodni elektroni**, ili **elektroni vodljivosti**. Smatra se da u metalima na svaki atom dolazi po jedan slobodni elektron. Tako npr. u kubnom metru ( $\text{m}^3$ ) ima oko  $10^{29}$  atoma a isto toliko i slobodnih elektrona. Materijali koji imaju tako veliki broj slobodnih elektrona zovu se vodiči. Pod djelovanjem i najmanjih električnih sila slobodni elektroni se počinju kretati u smjeru tih sila. Najbolji vodiči su metali: srebro, bakar, aluminij itd.

Za razliku od vodiča kod dielektrika ima mnogo manji broj slobodnih elektrona. Kod dielektrika su elektroni čvrsto vezani za atome pa je za njih karakteristična tzv. **polarizacija** atoma i molekula o čemu će biti kasnije detaljnije govora. Dielektrici mogu biti krute, tekuće i plinovite tvari. Posebnu grupu dielektrika čine **izolatori**, koji imaju mnogo puta manji broj slobodnih elektrona nego kod vodiča.

U tekućinama neutralne molekule raspadaju se na tzv. pozitivne i negativne ione. Pod utjecajem električnih sila ti ioni počinju se kretati u smjeru tih sila.

Ioni postoje i u plinovima, koji se također usmjereno kreću u smjeru električnih sila. U nekim plinovima nema iona, pa ne može doći do takvog kretanja čestica plina pod djelovanjem električnih sila. Takvi plinovi ponašaju se kao dobri izolatori.

Kruta tijela koja imaju manje od  $10^{10}$  slobodnih elektrona u prostornom metru spadaju u izolatore. Što je broj slobodnih elektrona manji, materijal je bolji izolator. Izolatori su npr. plastika, porculan, guma, staklo, zrak, papir i sl.

Kod poluvodiča se broj slobodnih elektrona kreće od  $10^{12}$  do  $10^{20}$  u prostornom metru. O poluvodičima bit će više govora u predmetu *Elektronički materijali i komponente*.

Za razliku od izolatora, vodiči se ne mogu naelektrizirati trljanjem, već samo dodirom.

---



---

### 1.3. Mjerne jedinice

---



---

U elektrotehnici je prihvaćen sustav jedinica koji nosi naziv MKSA. Taj naziv dobiven je po početnim slovima četiriju osnovnih jedinica: **metar**, **kilogram**, **sekunda** i **amper**, čije su vrijednosti usvojene dogovorom. Taj je sustav dio potpunog internacionalnog sustava jedinica čija je zvanična skraćenica SI, prema početnim slovima francuskog izraza *Système International*.

U elektrotehnici se upotrebljavaju razne fizikalne veličine, kao što su sila, snaga, brzina, ubrzanje, itd. Prve tri od navedenih jedinica upotrebljavaju se u mehanici, a kao četvrta definirana je električna jedinica za jakost struje. Iz te četiri osnovne jedinice izvode se ostale jedinice kako u mehanici, tako i u elektrotehnici. Izvedene jedinice koje se upotrebljavaju u elektrotehnici objasniti ćemo u postupku uvođenja određenih fizikalnih veličina i zakona. Jednu smo takvu jedinicu već upotrijebili: jedinica za količinu električnog naboja je kulon (C), čija je dimenzija

$$1 \text{ C (kulon)} = 1 \text{ As (ampersekunda)}$$

**Za napon se koristi jedinica volt (V).**

Tablica 1.1.

veličina	oznaka veličine	jedinica
duljina	$s, l, d$	metar (m)
vrijeme	$t$	sekunda (s)
masa	$m$	kilogram (kg)
površina	$S$	kvadratni metar ( $\text{m}^2$ )
volumen	$V$	kubni metar ( $\text{m}^3$ )
brzina	$v$	metar u sekundi (m/s)
akceleracija	$a$	metar u sekundi na kvadrat ( $\text{m/s}^2$ )
sila	$F$	Newton (N)
energija i rad	$W, A$	Joule (J)
snaga	$P$	Watt (W)

Jedinice koje se upotrebljavaju u mehanici bit će definirane u predmetu Fizika. Stoga ćemo mi samo navesti neke jedinice u kojima se mjere određene fizikalne veličine. Tako npr. masa se mjeri u kilogramima (kg), dužina u metrima (m), a vrijeme u sekundama (s). U tablici 1.1. su uz osnovne navedene i još neke izvedene jedinice iz mehanike, koje se koriste i u elektrotehnici.

Pored četiri navedene osnovne jedinice (m, kg, s, A), SI sustav ima još tri osnovne jedinice: za temperaturu **kelvin** (K), za intenzitet svjetlosti **kandela** (cd) i za množinu tvari **mol** (mol).

Uz ove jedinice MKSA sustav dozvoljava korištenje i nekoliko izvedenih jedinica, poput litre (l),  $1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$ .

U elektrotehnici se često susreću razne fizikalne jedinice čije su brojčane vrijednosti mnogo manje ili mnogo veće od jedinice kojom se mjeri. Radi toga su uvedene pomoćne jedinice koje se razlikuju od osnovnih jedinica za faktor  $10^n$ , a  $n$  je cijeli broj (pozitivan ili negativan). Te pomoćne jedinice imaju isto ime, samo se uz naziv osnovne jedinice dodaje određeni prefiks, kako je prikazano u sljedećoj tablici (tablica 1.2.).

**Tablica 1.2.**

$n$	$10^n$	Prefiks (i njegova skraćenica)	Primjer
-18	$10^{-18}$	ato (a)	aJ = $10^{-18}$ J
-15	$10^{-15}$	femto (f)	fm = $10^{-15}$ m
-12	$10^{-12}$	piko (p)	pJ = $10^{-12}$ J
-9	$10^{-9}$	nano (n)	ns = $10^{-9}$ s
-6	$10^{-6}$	mikro ( $\mu$ )	$\mu\text{m}$ = $10^{-6}$ m
-3	$10^{-3}$	mili (m)	mV = $10^{-3}$ V
-2	$10^{-2}$	centi (c)	cm = $10^{-2}$ m
-1	$10^{-1}$	deci (d)	dl = $10^{-1}$ l
1	$10^1$	deka (da)	dag = 10 g
2	$10^2$	hekto (h)	hl = $10^2$ l
3	$10^3$	kilo (k)	kV = $10^3$ V
6	$10^6$	mega (M)	MW = $10^6$ W
9	$10^9$	giga (G)	GJ = $10^9$ J
12	$10^{12}$	tera (T)	TW = $10^{12}$ W
15	$10^{15}$	peta (P)	Ps = $10^{15}$ s
18	$10^{18}$	eksa (E)	Em = $10^{18}$ m

\* \* \*

### Provjerite svoje znanje

1. Što znate o naelektriziranosti tijela i vrsti naboja?
2. Što znate o građi atoma?
3. Što je elementarni naboj?
4. Od čega se sastoji atomska ljuska?
5. Što su valentni elektroni?
6. Što sadrže elektron, proton i neutron?
7. Koja je jedinica za količinu naboja?
8. Koliki je iznos elementarnog naboja?
9. Koja su svojstva električnih naboja?
10. Može li se naboj uništiti?
11. Kad je tijelo naelektrizirano?
12. Kad je tijelo električki neutralno?
13. Što je točkasti naboj?
14. U tijelu volumena  $V = 100 \text{ cm}^3$  raspoređen je jednoliko naboj  $Q = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ . Kolika je volumna gustoća naboja?
15. Kolika je površinska gustoća naboja ako se na površini  $S = 200 \text{ cm}^2$  nalazi jednoliko raspodijeljen naboj  $Q = 8 \mu\text{C}$ .
16. Na štapu duljine  $0.5 \text{ m}$  jednoliko je raspodijeljen naboj  $Q = 25 \text{ nC}$ . Kolika je linijska gustoća naboja?
17. Koliko elektrona ima u naboju  $Q = 100 \text{ mC}$ ?
18. Koliko elektrona u  $\text{cm}^3$  volumena ima u 14. zadatku?
19. Koliko elektrona u  $\text{cm}^2$  površine ima u 15. zadatku?
20. Koliko elektrona u  $\text{cm}$  duljine ima u 16. zadatku?
21. Koje su osnovne jedinice sustava SI?
22. Koje izvedene jedinice poznajete?
23. Što znate o pomoćnim jedinicama?

---



---

## 1.4. Coulombov zakon

---



---

Prva istraživanja zakona sile između dva naelektrizirana tijela izveo je francuski fizičar *Charles Augustin Coulomb* 1784. i 1785. godine. Pomoću torzijske vage on je mjerio sile između dva naelektrizirana tijela čije su dimenzije mnogo manje od njihovog razmaka.

U tom se slučaju ta dva naboja mogu promatrati kao točkasti naboji. Budući da tijela miruju, naboji se zovu **statički** (mirni) naboji, jer kruženje elektrona oko jezgre ne izaziva nikakve vanjske električne efekte.

Coulomb je došao do zaključka da dva istoimena točkasta naboja među sobom djeluju odbojnom, a dva raznoimena privlačnom silom koja je proporcionalna produktu naboja  $Q_1$  i  $Q_2$  a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti  $r^2$ . **Sila na svaki naboj je ista**, tj.  $F_{12} = F_{21} = F$  i iznosi

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{\epsilon_r r^2} \quad (1.5)$$



gdje se sila mjeri u njutnima (N), naboj u kulonima (C), razmak u metrima (m), a  $k$  je konstanta proporcionalnosti. Ona ovisi o sredstvu u kome se obavlja mjerenje i iznosi

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \text{Nm}^2\text{C}^{-2}. \quad (1.6)$$

Konstanta

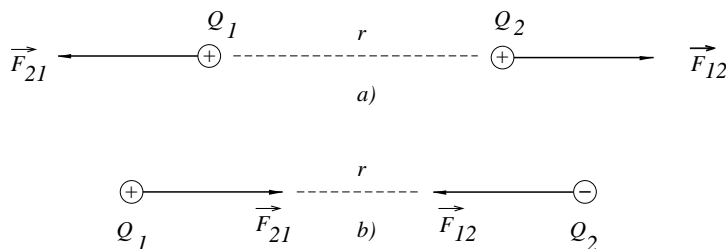
$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} (\text{C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2} = \text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}) \quad (1.7)$$

zove se **apsolutna permitivnost vakuuma**, a konstanta  $\epsilon_r$  zove se **relativna permitivnost** ili relativna dielektrična konstanta, koja za vakuum iznosi 1, za zrak  $\epsilon_r = 1.0006$  (približno 1), a za morsku vodu  $\epsilon_r = 81$  itd. Zbog toga se za vakuum i zrak može smatrati da je

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{Nm}^2\text{C}^{-2}. \quad (1.8)$$

Sila u dielektriku čija je relativna permitivnost  $\epsilon_r$ , bit će za  $\epsilon_r$  manja nego u vakuumu.

U izraz za silu treba uvrstiti predznake naboja  $Q_1$  i  $Q_2$ . Ako su oba naboja pozitivna (+) ili negativna (-), sile su odbojne (sl. 1.3a), a ako je jedan naboj pozitivan (+) a drugi negativan (-), tada je sila privlačna (sl. 1.3b).



Sl. 1.3. Coulombove sile između dvaju točkastih naboja: a) istoimenih; b) raznoimenih.

Sile između dvaju naboja djeluju na pravcu koji spaja ta dva naboja, a smjer ovisi o predznaku naboja (sl. 1.3). One su jednake po iznosu  $F_{12} = F_{21} = F$ , ali su suprotnih smjerova. **Fizikalna veličina koja ima iznos i smjer zove se vektorska veličina, koja se označava strelicom iznad odgovarajuće veličine, npr.  $\vec{F}_{12}$ .**

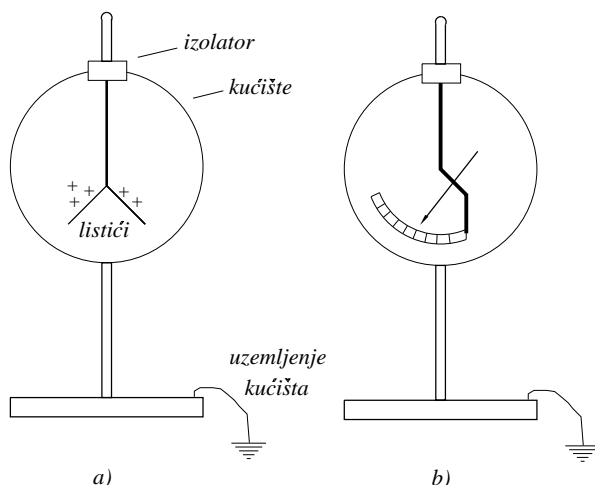
Na kraju treba primijetiti da je formula za Coulombovu silu slična formuli za gravitacijsku silu. Bitna je razlika u tome što ne postoje dvije vrste masa, a sile između masa su privlačne.

U čast Coulombou, jedinica za naboj zove se kulon (C). Naboj se može mjeriti spravom koja se zove **elektrometar**, a njezin se princip zasniva na radu **elektroskopa**. Elektroskop se sastoji od metalnog kućišta u obliku valjka u kome je metalni štapić, na čijem se donjem kraju nalaze dva listića od zlata ili aluminija (sl. 1.4). Štapić je izoliran od kućišta izolatorom, npr. porculanom. Na gornjem kraju štapića nalazi se metalna pločica ili kuglica. Listići se šire kad se naelektriziranim tijelom dodiruje kuglica elektroskopa, bez obzira kojim je nabojem naelektrizirano tijelo.

Ako je tijelo bilo naelektrizirano negativnim nabojem (koji se stvara u ebonitnom štapu), tad pri dodiru prelaze elektroni na kuglicu i listiće. Pritom se listići nabiju istoimenim nabojem jednakog iznosa, djeluju jedan na drugog odbojnom silom uslijed čega se oni šire. Kut između listića proporcionalan je s količinom naboja. Ako se skala elektroskopa baždari, tada takav elektroskop postaje instrument za mjerenje naboja i zove se elektrometar (sl. 1.4b).

Listići elektroskopa će se vratiti u početni položaj ako se kuglica elektroskopa natrlja krpom kojom je trljan štap. To pokazuje da se krpa naelektrizirala istom količinom suprotnog naboja od naboja na štapu.

Ponovite isti eksperiment sa staklenim štapom i objasnite pojavu. Što će se dogoditi ako se elektroskop koji je prethodno dotaknut nabijenim ebonitnim štapom dotakne nabijenim staklenim štapom?



Sl. 1.4. a) Elektroskop; b) elektrometar.

---



---

## 1.5. Električno polje

---



---

### 1.5.1. Definicija električnog polja

Zamislimo da se u središte kugle polumjera  $r$  stavi naboj  $Q$ , a neki pokusni naboj  $Q_0$  premješta se po površini kugle. Tada se iznos sile ne mijenja i iznosi

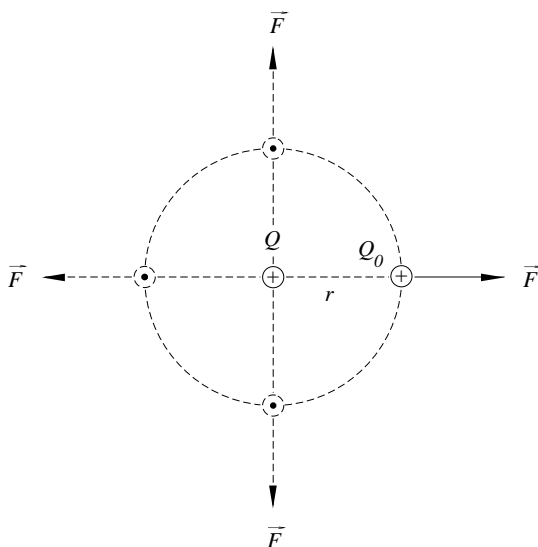
$$F = \frac{Q Q_0}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2}, \quad \text{N.} \quad (1.9)$$

Smjer te sile ovisi o položaju naboja  $Q_0$  na kugli (sl. 1.5) i uvijek je usmjeren u smjeru polumjera  $r$ .

Ako je iznos naboja  $Q$  konstantan, a naboj  $Q_0$  poveća se dva puta, povećat će se i sila  $F$  dva puta. To znači da omjer sile  $F$  i naboja  $Q_0$  ne ovisi o naboju  $Q_0$ . Taj omjer  $\frac{F}{Q_0} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0r^2}$  ovisi samo o naboju  $Q$ , udaljenosti  $r$  i permitivnosti  $\epsilon_r$  dielektrika koji ga okružuje. Ta činjenica ukazuje da oko naboja  $Q$  u mirovanju vlada posebno stanje koje se pripisuje postojanju nove fizikalne veličine koja se zove **elektrostatsko polje** ili jednostavno **električno polje**.

Dakle, električno polje vlada oko svakog naboja, a njegova se prisutnost manifestira kad se u to polje unese pokusni naboj iznosa  $Q_0$ . Prema tome, **jakost (intenzitet) električnog polja** definira se kao omjer sile na pokusni naboj i pokusnog naboja, tj.

$$\boxed{E = \frac{F}{Q_0}}, \quad \frac{\text{V}}{\text{m}}. \quad (1.10)$$



Sl. 1.5. Sila naboja  $Q$  na naboj  $Q_0$  čiji se položaj mijenja na kugli.

Električno polje je vektorska veličina i ima smjer električne sile na pozitivni pokusni naboj. Jedinica za jakost električnog polja slijedi iz formule (1.10) i jednaka je **njutn po kulonu** ( $\text{N/C}$ ). Međutim, ako se uzme da je  $1 \text{ N} = \text{VAsm}^{-1}$ , slijedi da je jedinica za električno polje **volt po metru** ( $\text{V/m}$ ).

Uvođenjem električnog polja pojednostavnjuje se računanje sile na naboj  $Q_0$ . Ako je poznata jakost električnog polja  $E$  u nekoj točki, onda se dobije da je **sila** na naboj  $Q_0$

$$\boxed{F = Q_0E}, \quad \text{N}. \quad (1.11)$$

Predznak naboja  $Q_0$  određuje smjer sile. Ako je predznak naboja (+), tad je sila u smjeru polja, a ako  $Q_0$  ima predznak (-), tad je sila suprotna od smjera polja.

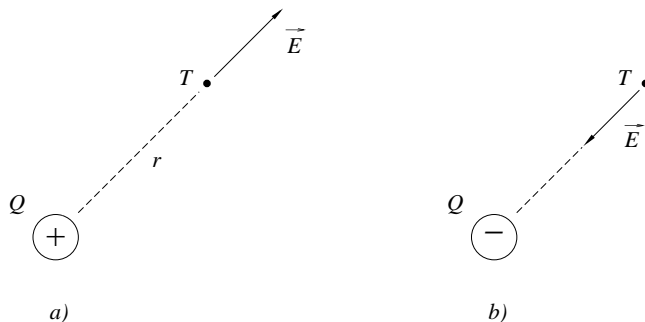
### 1.5.2. Električno polje točkastog naboja

Da bi izračunali **jakost električnog polja točkastog naboja** u točki na udaljenosti  $r$  (sl. 1.6), potrebno je dovesti pokusni naboj  $Q_0$  u tu točku. Sila na naboj  $Q_0$  dana je relacijom (1.11), pa primjenom relacije (1.10) slijedi da je jakost električnog polja  $E$  na udaljenosti  $r$  od naboja  $Q$  jednaka

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} = k \frac{Q}{\epsilon_r r^2} \quad \frac{\text{V}}{\text{m}}, \quad (1.12)$$

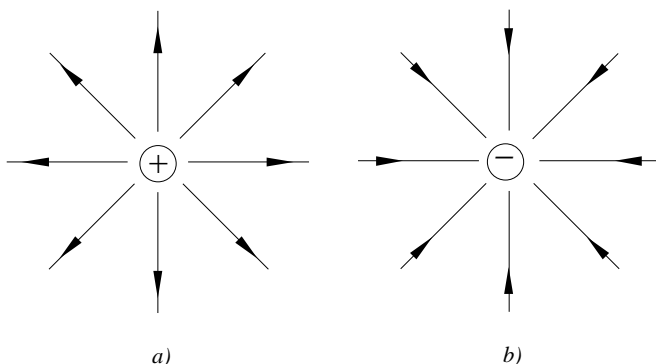
gdje je  $k = 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ .

Jakost polja na kugli polumjera  $r$  u čijem je središtu naboj  $Q$  svuda je istog iznosa. Ako je naboj  $Q$  pozitivan, smjer polja je u smjeru radijusa, od izvora prema točki  $T$  (sl. 1.6a). Ako je naboj  $Q$  negativan, smjer električnog polja je suprotan, tj. radijalno prema izvoru (sl. 1.6b).



Sl. 1.6. Električno polje točkastog naboja u točki  $T$ : a)  $Q$  pozitivan; b)  $Q$  negativan.

Za zorno predstavljanje električnog polja upotrebljavaju se zamišljene krivulje. One se zovu **silnice**. Silnica zorno pokazuje put po kojem bi se gibao elementarni pozitivni naboj. Tako na primjer silnice točkastog naboja su radijalni pravci (sl. 1.7).



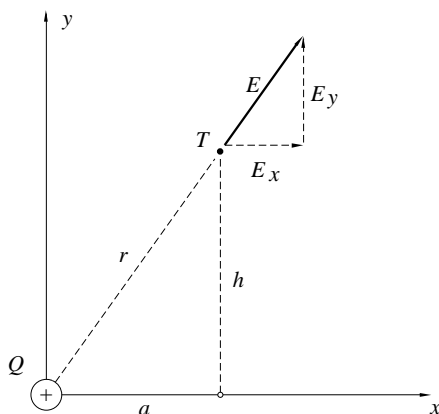
Sl. 1.7. Silnice električnog polja: a) pozitivnog naboja, b) negativnog naboja.

Jakost električnog polja proporcionalna je s gustoćom silnica. Električno polje je jače gdje su silnice gušće. Silnice električnog polja izlaze iz pozitivnog naboja (sl. 1.7a) a ulaze u negativni naboj (sl. 1.7b). Zbog toga se kaže da je elektrostatsko polje izvorno polje, čiji su izvori pozitivni naboji, a ponori negativni naboji.

### 1.5.3. Računanje električnog polja \*

Ako postoje dva i više naboja, električno polje u nekoj točki može se odrediti po principu superpozicije. Taj princip sastoji se u tome da se zbroje vektori električnog polja svakog naboja. Vektorsko zbrajanje zove se još i geometrijsko zbrajanje. Da bi se to uspješno obavilo, potrebno je vektor električnog polja rastaviti na komponente. Tako npr. vektor jakosti električnog polja točkastog naboja u točki  $T$  u ravnini (sl. 1.8) ima dvije komponente,  $E_x$  i  $E_y$ . Trokut sa stranicama  $a$ ,  $b$ ,  $r$  i trokut polja sa stranicama  $E$ ,  $E_x$ ,  $E_y$  su slični, pa slijedi da je

$$E_x : E = a : r.$$



Sl. 1.8. Komponente električnog polja.

Iz te relacije i jednadžbe polja točkastog naboja (1.12) dobije se da je

$$E_x = E \frac{a}{r} = \frac{Qa}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^3}. \quad (1.13)$$

Na isti se način dobije da je

$$E_y = E \frac{b}{r} = \frac{Qb}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^3}. \quad (1.14)$$

**Primjer 1.3.** Treba odrediti jakost električnog polja u točki  $T$  dvaju točkastih naboja  $Q_1 = \frac{50}{9} \cdot 10^{-10} \text{ C}$  i  $Q_2 = \frac{10}{9} \cdot 10^{-10} \text{ C}$  koji se nalaze u zraku (sl. 1.9a). Zadano je  $a = 4 \text{ cm}$ ,  $b = 1 \text{ cm}$ ,  $h = 3 \text{ cm}$ .

\* Za one koji žele znati više

*Rješenje.* Prvo treba izraziti  $r_1$  i  $r_2$  u metrima. Primjenom Pitagorina poučka dobije se da je

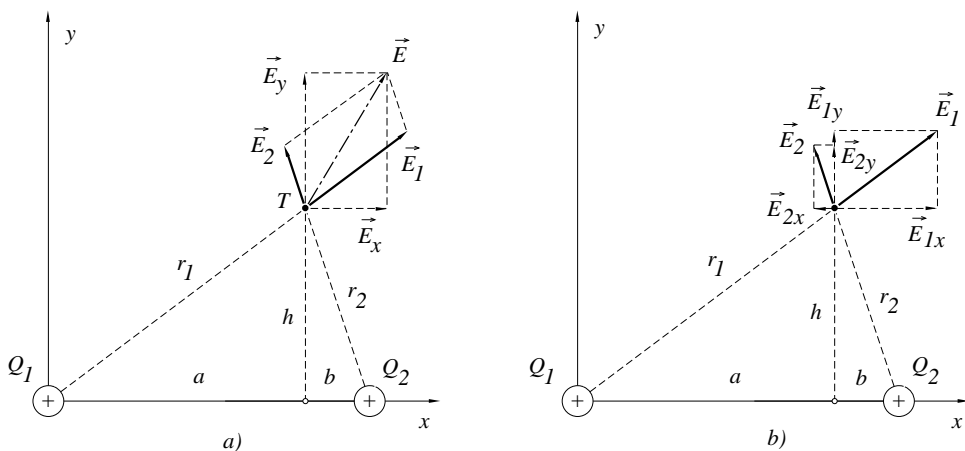
$$r_1 = \sqrt{a^2 + h^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m},$$

$$r_2 = \sqrt{b^2 + h^2} = \sqrt{1^2 + 3^2} = \sqrt{10} \text{ cm} = \sqrt{10} \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

Permitivnost zraka je  $\epsilon_r \approx 1$ . Jakost električnog polja što ga daje svaki naboj u točki  $T$  je

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-10}}{25 \cdot 10^{-4}} = 2000 \text{ V/m},$$

$$E_2 = k \frac{Q_2}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-10}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1000 \text{ V/m}.$$



Sl. 1.9. Polje dvaju točkastih naboja u točki  $T$ .

Sada ćemo u mjerilu u kome 1000 V/m odgovara 1 cm, nacrtati jakosti polja  $E_1$  i  $E_2$  kako je prikazano na sl. 1.9a. Zatim treba napraviti paralelogram tako da se kroz vrh vektora  $\vec{E}_1$  povuče paralela s  $\vec{E}_2$ , a kroz vrh vektora  $\vec{E}_2$  paralela s vektorom  $\vec{E}_1$ . Na taj način dobili smo paralelogram, a dijagonala paralelograma čini rezultirajuće polje  $E$ . Dužina te dijagonale je oko 2.6 cm, tako da je jakost polja

$$E = 2.6 \cdot 1000 = 2600 \text{ V/m}.$$

Točnije vrijednosti dobit ćemo numeričkim putem. Za to treba izračunati  $x$  i  $y$  komponente

polja:

$$\begin{aligned}
 E_{1x} &= E_1 \cdot \frac{a}{r_1} = 2000 \cdot \frac{0.04}{0.05} = 1600 \text{ V/m}, \\
 E_{1y} &= E_1 \cdot \frac{h}{r_1} = 2000 \cdot \frac{0.03}{0.05} = 1200 \text{ V/m}, \\
 E_{2x} &= E_2 \cdot \frac{b}{r_2} = 1000 \cdot \frac{0.01}{0.0316} = 316 \text{ V/m}, \\
 E_{2y} &= E_2 \cdot \frac{h}{r_2} = 1000 \cdot \frac{0.03}{0.0316} = 949 \text{ V/m}.
 \end{aligned}$$

Treba paziti na smjerove tih komponenti (sl. 1.9b).  $x$  komponenta vektora  $\vec{E}_2$  je negativna, pa je rezultirajuća  $x$  komponenta

$$E_x = E_{1x} - E_{2x} = 1600 - 316 = 1284 \text{ V/m}$$

a  $y$  komponenta

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 1200 + 949 = 2149 \text{ V/m}$$

Sada se primjenom Pitagorina poučka (sl. 1.8 i sl. 1.9a) dobije da je

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{1284^2 + 2149^2} = 2503 \text{ V/m}.$$

Grafički je postupak manje točan, ali je pregledan.

Da je naboj  $Q_2$  bio negativan, smjer polja  $E_2$  bio bi suprotan, tj. prema naboju pa bi se zbrajale  $x$  komponente, a odbijale  $y$  komponente.

Ako se u točku  $T$  stavi naboj  $Q_0$ , na njega djeluje sila  $F = Q_0 E$ .

U slučaju da je bilo više naboja, numerički bi postupak bio isti. Prvo bi trebalo odrediti obe komponente svakog vektora, a zatim zbrojiti posebno  $x$  a posebno  $y$  komponente, pri čemu treba voditi računa o predznaku svake komponente

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{1x} + E_{2x} + E_{3x} + E_{4x} + \dots \\
 E_y &= E_{1y} + E_{2y} + E_{3y} + E_{4y} + \dots
 \end{aligned} \tag{1.15}$$

**Rezultirajuće polje** se dobije primjenom Pitagorina poučka:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}. \tag{1.16}$$

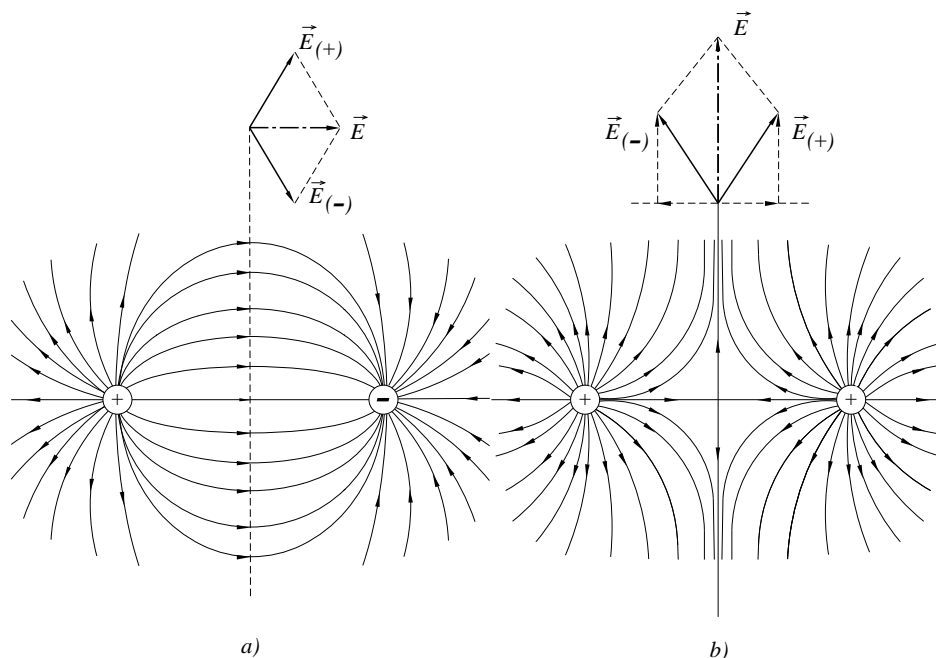
Smjer polja se određuje pomoću komponenti, pri čemu treba voditi računa o predznaku komponenti  $E_x$  i  $E_y$ .

Iz tog postupka može se zaključiti da se električno polje više naboja dobije vektorskim zbrajanjem polja svakog naboja. Budući da je rezultirajuće električno polje jednoznačno, slijedi da kroz svaku točku prolazi samo jedna silnica. To znači da se silnice pojedinačnih naboja stapaju u jedinstvene silnice, tj. silnice se ne mogu sjeći. Tako silnice dvaju naboja jednakih iznosa a suprotnih predznaka izgledaju kao na slici 1.10a.

Sve silnice koje izviru iz pozitivnog naboja, poniru u negativni naboj. **Za takva dva naboja kažemo da čine električni dipol, a silnice na sl. 1.10a prikazuju električno polje električnog dipola.** Uočite da su silnice simetrične s obzirom na simetralu koja ide po raspolovnici razmaka između dva naboja. Slika izgleda kao da se na simetrali nalazi zrcalo, a slika u zrcalu je tzv. negativ. Treba još uočiti da silnice na simetralni pravac upadaju okomito (sl. 1.10a). Zbog simetrije se na simetralnom pravcu  $y$ -komponente električnog polja poništavaju, a rezultirajuće polje ima samo  $x$ -komponentu.

U slučaju kada su naboji istoimeni (sl. 1.10b) slika je silnica opet simetrična s obzirom na simetralu, samo sada silnice ne probadaju simetralu, već jedna silnica ide simetralom. Smjer rezultirajućeg polja na simetrali je u smjeru okomitom na spojnicu naboja, zbog toga što se sada  $x$ -komponente poništavaju, a  $y$ -komponente zbrajaju.

Za električno polje koje vlada oko jednog naboja (sl. 1.7) kao i oko dva naboja (sl. 1.10) kažemo da je **nehomogeno**, jer se jakost električnog polja mijenja s položajem točke, i po iznosu i po smjeru.



Sl. 1.10. Silnice dvaju jednakih točkastih naboja: a) raznoimenih; b) istoimenih.

#### 1.5.4. Električno polje raspodijeljenog naboja\*

Naboj na tijelima raspoređen je kontinuirano. Ta raspodjela može biti jednolika i nejednolika. U općem slučaju je računanje električnog polja za bilo kakvo tijelo vrlo složeno, pa ćemo stoga razmotriti samo neke karakteristične slučajeve jednolike raspodjele naboja.

Promotrit ćemo najprije kako se računa polje u slučaju linearne raspodjele.

**Primjer 1.4.** Treba odrediti jakost električnog polja u točki  $T$  (sl. 1.11) tankog štapa duljine  $l = 6 \text{ cm}$ , jednoliko naelektriziranog nabojem linijske gustoće  $\lambda = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ C/m}$ . Okruženje je zrak, a udaljenost točke  $T$  do središta štapa  $R = 4 \text{ cm}$ .

**Rješenje.** Permitivnost okruženja je  $\epsilon_r = 1$ . Najkraća udaljenost točke do štapa je  $R = 4 \text{ cm} = 0.04 \text{ m}$ , (sl. 1.11). Za računanje jakosti električnog polja u točki  $T$  može se primjeniti dosadašnje znanje o točkastom naboju. Radi toga ćemo štاپ podijeliti npr. na šest jednakih dijelova. Dužina svakog elementa (dijela) štapa je

$$\Delta l = \frac{l}{6} = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m},$$

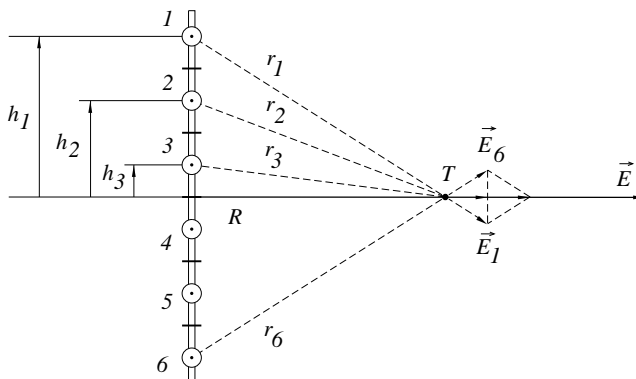
( $\Delta$  je grčko slovo *delta*, koristi se kao oznaka za mali dio neke cjeline). Na svakom elementu nalazi se ista količina naboja

$$\Delta Q = \lambda \Delta l = 1.2 \cdot 10^{-8} \cdot 0.01 \text{ C} = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ C}.$$

\* Za one koji žele znati više



Ovaj naboj nije smješten u jednoj točki, već raspodijeljen duž svakog elementa. Da bi se mogla primijeniti formula za točkasti naboj, potrebno je pretpostaviti da je sav naboj koncentriran u sredini svakog elementa (sl. 1.11). To znači da ćemo raditi s približnim srednjim vrijednostima. Točka  $T$  smještena je na simetrali štapa, pa su elementi raspoređeni simetrično, tri s gornje a tri s donje strane.



Sl. 1.11. Polje naelektriziranog tankog štapa.

Za proračun su potrebne sljedeće srednje udaljenosti:

$$h_1 = h_6 = 2.5 \text{ cm} = 0.025 \text{ m},$$

$$h_2 = h_5 = 1.5 \text{ cm} = 0.015 \text{ m},$$

$$h_3 = h_4 = 0.5 \text{ cm} = 0.005 \text{ m},$$

$$r_1 = r_6 = \sqrt{h_1^2 + R^2} = 4.73 \text{ cm} = 0.0473 \text{ m},$$

$$r_2 = r_5 = \sqrt{h_2^2 + R^2} = 4.27 \text{ cm} = 0.0427 \text{ m},$$

$$r_3 = r_4 = \sqrt{h_3^2 + R^2} = 4.03 \text{ cm} = 0.0403 \text{ m}.$$

Sada se mogu izračunati jakosti polja svakog elementa:

$$E_1 = E_6 = k \frac{\Delta Q}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1.2 \cdot 10^{-10}}{0.0473^2} = 482,7 \text{ V/m},$$

$$E_2 = E_5 = k \frac{\Delta Q}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1.2 \cdot 10^{-10}}{0.0427^2} = 592,3 \text{ V/m},$$

$$E_3 = E_4 = k \frac{\Delta Q}{r_3^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1.2 \cdot 10^{-10}}{0.0403^2} = 665,0 \text{ V/m}.$$

Zbog simetričnog razmještaja elemenata  $y$ -komponente električnog polja simetričnih elemenata se poništavaju, pa je rezultantno polje jednako zbroju samo  $x$ -komponenti svih elemenata. Zbog simetrije, dovoljno je zbrojiti samo  $x$ -komponente tri gornja elementa i pomnožiti ih s dva. Dakle, rezultantno polje je

$$E = 2 \left( E_1 \frac{R}{r_1} + E_2 \frac{R}{r_2} + E_3 \frac{R}{r_3} \right) = 3155 \text{ V/m}.$$

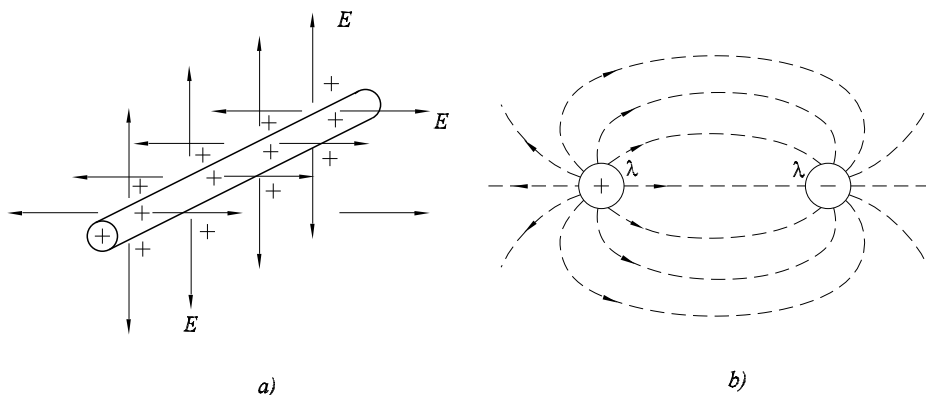
Točnost računa bila bi veća da smo štap podijelili na veći broj elemenata. Za taj postupak treba dosta vremena. Ovaj se problem može riješiti pomoću računala. Mogu se čak zorno prikazati i vektori polja svakog elementa kao i rezultirajuće polje. Pomoću računala može se vrlo brzo izračunati polje u bilo kojoj točki. Bilo bi vrlo korisno učiniti za vježbu takav račun računalom.

### 1.5.5. Električno polje duge naelektrizirane linije

Ako bi dužina štapa  $l$  bila mnogo puta veća od najkraće udaljenosti  $R$  točke  $T$  od štapa (sl. 1.11), tada se dobiva **jakost polja**

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r r}, \quad (1.17)$$

**čiji je smjer okomit na štap.** To znači da silnice polja iz takvog štapa izlaze okomito na štap svuda naokolo njega.



Sl. 1.12. Električno polje naelektrizirane ravne linije  $\lambda = \text{konst.}$ : a) jedna linija sa  $+\lambda$ ; b) dvije paralelne linije  $(-\lambda)$  i  $(+\lambda)$ .

Dvije linije s linijskim nabojima  $+\lambda$  i  $-\lambda$  predstavljaju električni vod, sl. 1.12b.

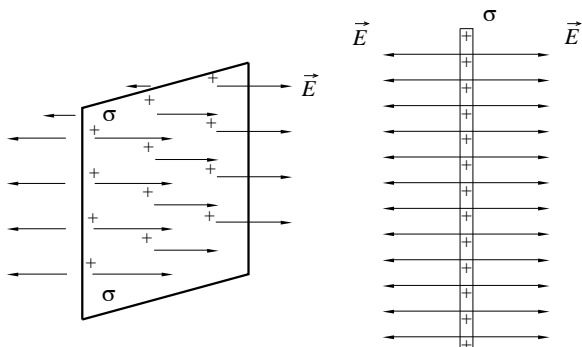
### 1.5.6. Električno polje ravne ravnomjerno naelektrizirane plohe

Sličnim razmatranjima, podjelom na male elemente, može se odrediti polje tanke, ravne, vrlo velike naelektrizirane ploče, s jednolikim nabojem plošne gustoće  $\sigma$  (sl. 1.13).

Silnice električnog polja izlazit će zbog simetrije okomito i podjednako na jednu i drugu stranu ravnine. Budući da pola naboja djeluje na jednu, a pola na drugu stranu, jakost je **električnog polja na jednoj i drugoj strani** ista i iznosi

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon_r}. \quad (1.18)$$

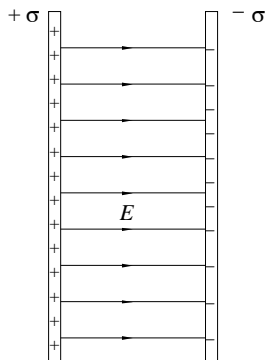
Sve su silnice polja paralelne, a jakost polja u svim točkama je konstantna. Takvo se polje zove **homogeno**. Da je ploča bila naelektrizirana negativnim nabojem, tad bi silnice ulazile u ploču.



Sl. 1.13. Električno polje ravne ploče naelektrizirane jednoliko nabojem gustoće  $\sigma$ : a) prikaz u prostoru; b) prikaz iz profila.

Ako se sad stave paralelno dvije takve ploče (sl. 1.14), od kojih je jedna naelektrizirana jednoliko nabojem plošne gustoće  $+\sigma$ , a druga isto tako jednoliko nabojem plošne gustoće  $-\sigma$ , tada će **između ploča vladati homogeno električno polje iznosa**

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r}. \quad (1.19)$$



Sl. 1.14. Električno polje između dvije ravne ploče naelektrizirane jednoliko nabojem gustoća  $+\sigma$  i  $-\sigma$ .

Do tog se rezultata može doći zbrajanjem polja svake ploče. Dokažite to! Isto tako, treba dokazati da je izvan ploča jakost polja 0.

\* \* \*

### Provjerite svoje znanje

1. Što je Coulombov zakon?
2. Što je permitivnost?
3. Što je apsolutna permitivnost vakuuma?
4. Što je relativna permitivnost?
5. Što su vektorske veličine?
6. Opišite elektrometar i njegov način rada.
7. Što se može mjeriti elektroskopom?
8. Kakve sile djeluju između dva negativna naboja?
9. Za koliko puta se promijeni sila ako se razmak između naboja poveća dva puta?
10. Za koliko se promijeni sila ako se svaki naboj poveća dva puta, a razmak smanji dva puta?
11. Kolike sile djeluju između dva točkasta naboja  $Q_1 = 5 \mu\text{C}$  i  $Q_2 = -2 \mu\text{C}$ , razmaknuta na udaljenosti  $r = 50 \text{ cm}$ ? Kakve su te sile?
12. Što je električno polje i kako se definira?
13. Kolika je jakost električnog polja točkastog naboja?
14. U kojem smjeru djeluje električno polje točkastog naboja?
15. Koja je jedinica za jakost električnog polja?
16. Na udaljenosti  $r = 2 \text{ cm}$  od točkastog naboja  $Q = 5 \mu\text{C}$  odredi jakost polja u vakuumu.
17. Koliki je iznos naboja, ako je na udaljenosti  $r = 2 \text{ cm}$  izmjereno električno polje  $E = 2000 \text{ V/m}$ : a) u vakuumu; b) u dielektriku  $\epsilon_r = 2$ ?
18. Odredite  $\epsilon_r$  ako je naboj  $Q = 1 \text{ nC}$ , a na udaljenosti  $r = 3 \text{ cm}$  izmjerena je jakost polja  $E = 2000 \text{ V/m}$ .
19. Odredite  $\epsilon_r$  ako je između dva naboja  $Q_1 = 1 \text{ nC}$  i  $Q_2 = 1 \mu\text{C}$  na razmaku  $r = 3 \text{ cm}$  izmjerena sila  $F = 2 \text{ mN}$ .
20. Što su silnice električnog polja?
21. Kakvo je elektrostatsko polje?
22. Kakvo je polje u dijelu gdje je gustoća silnica veća?
23. Koliko komponenti ima vektor električnog polja u ravnini?
24. Kako se računaju komponente polja točkastog naboja?
25. Kako se određuje električno polje dvaju naboja?
26. Kolika je jakost polja na sredini razmaka dvaju točkastih naboja,  $Q_1 = -Q_2 = 5 \mu\text{C}$ , ako je razmak  $r = 150 \text{ cm}$ ?
27. Koliko je polje na sredini razmaka između dvaju točkastih naboja  $Q_1 = Q_2 = 8 \mu\text{C}$ , ako je razmak  $r = 90 \text{ cm}$ ?
28. Kakav je smjer električnog polja na simetrali dvaju jednakih naboja istih predznaka?
29. Kakav je smjer električnog polja na simetrali dvaju jednakih naboja različitih predznaka?
30. Ako je u nekoj točki poznata jakost električnog polja, kako se računa sila na naboj  $Q_0$  koji se unese u tu točku?
31. Kolika sila djeluje na naboj  $Q_0 = 5 \mu\text{C}$ , ako se unese u električno polje jakosti  $E = 2000 \text{ V/m}$ ?
32. Kako se određuje polje više naboja?
33. Koje polje nazivamo nehomogenim?
34. U vrhovima pravokutnika dimenzija  $a = 20 \text{ cm}$ ,  $b = 10 \text{ cm}$  nalaze se naboji  $Q_1 = 2 \mu\text{C}$ ,  $Q_2 = 1 \mu\text{C}$ ,  $Q_3 = 6 \mu\text{C}$ ,  $Q_4 = 4 \mu\text{C}$ . Kolika je sila na naboj  $Q_3$ ?
35. U vrhovima kvadrata stranice  $a = 50 \text{ cm}$  nalaze se točkasti naboji  $Q_1 = Q_2 = 5 \text{ nC}$  i  $Q_3 = Q_4 = 25 \text{ nC}$ . Kolika je jakost polja u središtu kvadrata?
36. Kakvo je polje naelektrizirane tanke ploče, velike površine, ako je plošna gustoća naboja  $\sigma = \text{konst}$ .
37. Dvije paralelne ploče razmaknute su  $d = 10 \text{ cm}$ , površina  $S = 2 \text{ m}^2$ , naelektrizirane su suprotnim nabojem iznosa  $Q = 3 \text{ nC}$ . Ako je između ploča zrak, kolika je jakost polja između ploča?