

# Elektromagnetska analiza nadzemnog elektroenergetskog voda simulacijskim alatima

---

Filipović, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:496744>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**ELEKTROMAGNETSKA ANALIZA NADZEMNOG  
ELEKTROENERGETSKOG VODA SIMULACIJSKIM  
ALATIMA**

**Diplomski rad**

**Marko Filipović**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Marko Filipović
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1398, 07.10.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165068960
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Marinko Barukčić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Marinko Barukčić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	dr. sc. Tin Benšić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Elektromagnetska analiza nadzemnog elektroenergetskog voda simulacijskim alatima
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Prikazati postupak upotrebe simulacijskog alata za izračun parametara voda i vrijednosti veličina elektromagnetskog polja u okolišu nadzemnog voda.
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	10.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Dobar (3)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	26.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Dobar (3)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Dobar (3)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	18.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 18.10.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Marko Filipović
<b>Studij:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1398, 07.10.2021.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Elektromagnetska analiza nadzemnog elektroenergetskog voda simulacijskim alatima**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Marinko Barukčić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....	1
<b>2. DEFINIRANJE SVOJSTAVA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA</b> .....	2
<b>2.1. Elementarna svojstva električnog polja</b> .....	2
<b>2.2. Elementarna svojstva magnetskog polja</b> .....	7
<b>2.3. Induciranje magnetskog polja vodiča kojim teče struja</b> .....	12
<b>3. NADZEMNI VODOVI</b> .....	17
<b>3.1. Stupovi i temelji</b> .....	19
<b>3.2. Izolatori</b> .....	23
<b>3.3. Vodiči</b> .....	24
<b>4. PROGRAMSKI PAKET FINITE ELEMENTS METHOD MAGNETICS</b> .....	27
<b>4.1. Funkcionalnosti korisničkog sučelja</b> .....	30
<b>4.2. Dodatne mogućnosti</b> .....	32
<b>5. SIMULACIJA I ANALIZA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA NADZEMNIH VODOVA U PROGRAMSKOM PAKETU FEMM</b> .....	33
<b>5.1. Crtanje geometrije nadzemnog voda i definiranje parametara simulacije</b> .....	37
<b>5.2. Simulacija električnog polja 110kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela</b> .....	45
<b>5.3. Simulacija električnog polja 35kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama</b> .....	53
<b>5.4. Simulacija električnog polja 20kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta</b> .....	57
<b>5.5. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela</b> .....	62

5.6. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama.....	69
5.7. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta.....	74
5.8. Usporedba rezultata simulacija s propisanim graničnim vrijednostima .....	82
6. JEDINIČNI PARAMETRI 110kV NADZEMNIH VODOVA RASPOREĐENIH PO OBLIKU GLAVE STUPA JELA .....	84
6.1. Metoda srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU metoda).....	86
6.2. Ispis jediničnih parametara voda u programskom paketu FEMM .....	91
6.3. Usporedba rezultata SGU metode i programskog paketa FEMM .....	94
7. ZAKLJUČAK.....	96
8. LITERATURA .....	97

## 1. UVOD

Zakoni elektricneta i magnetizma danas imaju ključnu ulogu u radu elektroničkih uređaja i elektroenergetske mreže. Dokumenti iz Kine ukazuju na to da je magnetizam bio opažen već oko 2000. godine prije Krista. Stari Grci su promatrali električne i magnetske fenomene možda već oko 700. godine prije Krista. Znali su za magnetske sile iz promatranja prirodnog kamena magnetita koji privlači željezo. Riječ "električni" dolazi od grčke riječi "elektron", što znači jantar, dok riječ "magnetski" dolazi od Magnezije, područja u Grčkoj gdje je prvi put pronađen magnetit. Tek početkom 19. stoljeća znanstvenici su utvrdili da su elektricitet i magnetizam povezani fenomeni. Godine 1819. Hans Oersted otkrio je da se igla kompasa okreće kada se nalazi blizu strujnog kruga. Godine 1831. Michael Faraday i, gotovo istovremeno, Joseph Henry pokazali su da se pomicanjem žice blizu magneta (ili obrnuto, pomicanjem magneta blizu žice) u žici stvara električna struja. Godine 1873. James Clerk Maxwell iskoristio je ova i druga eksperimentalna opažanja kao osnovu za formuliranje zakona elektromagnetizma kakve danas poznajemo. Elektromagnetizam je naziv za kombinirano proučavanje elektricneta i magnetizma. Maxwellov doprinos polju elektromagnetizma bio je izuzetno značajan jer su zakoni koje je formulirao temelj za sve oblike elektromagnetskih pojava. [7] Ovaj diplomski rad bavi se prikazom simulacija električnih i magnetskih polja nadzemnih vodova pomoću simulacijskih alata.

### 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je prikazati postupak upotrebe simulacijskog alata FEMM (*engl. Finite Element Method Magnetics*) za izračun vrijednosti električnih i magnetskih polja u prostoru nadzemnih vodova različitih oblika glave stupa. Također je potrebno usporediti izračun simulacija elektromagnetskog polja s analitičkim izračunom vrijednosti jediničnih parametara nadzemnih vodova.

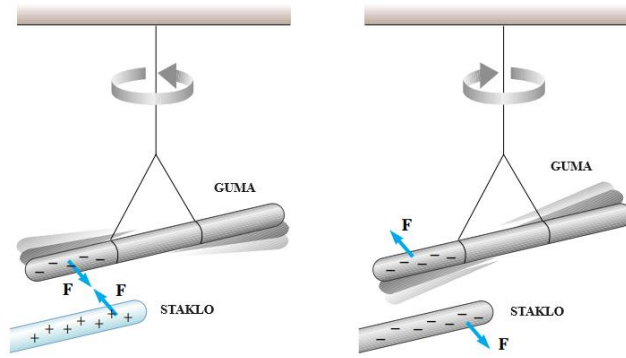
## 2. DEFINIRANJE SVOJSTAVA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA

Radi boljeg razumijevanja narednog teksta riječ „*polje*“ definiramo kao skup vrijednosti pridruženih svakoj točki u danom području koje određuju ponašanje neke veličine u njemu. Elektromagnetsko polje opisuje vremenske i prostorne promjene te veličine definirane fizikalnim zakonima, a elektromagnetska sila između nabijenih čestica jedna je od temeljnih sila prirode.[1] U ovom poglavlju definirana su svojstva električnog i magnetskog polja te njihove interakcije u okolišu vodiča. U poglavlju 2.1. opisano je djelovanje električne sile, koncept električnog polja i njegov utjecaj na druge nabijene čestice, dok poglavlje 2.2. opisuje pojave u magnetizmu i sile koje djeluju na naboje i na vodiče koje provode struju u prisutnosti magnetskog polja. U poglavlju 2.3. prikazan je princip indukcije elektromagnetskog polja vodiča kojim teče struja.

### 2.1. Elementarna svojstva električnog polja

Niz jednostavnih eksperimenata pokazuje postojanje električnih sila i naboja. Primjerice, kada češalj prođe kroz suhu kosu i položi se u blizinu izrezanih komadića papira, češalj će privlačiti te komadiće papira. U nizu takvih jednostavnih eksperimenata otkriveno je da postoje dvije vrste električnih naboja, koje je Benjamin Franklin nazvao pozitivnim i negativnim.[7] Negativni naboj identificiramo kao onaj koji posjeduju elektroni, a pozitivni kao onaj koji posjeduju protoni.[2] Kao primjer koji dokazuje postojanje dviju vrsta naboja odabrana je tvrda gumena šipka koja je trljana krznom i ovješena o konac, kao što je prikazano na slici 2.1.. Kada se staklena šipka prethodno trljana svilom približi gumenoj šipci, dolazi do privlačenja. S druge strane, ako se dvije nabijene gumene šipke (ili dvije nabijene staklene šipke) približe jedna drugoj, kao što je prikazano na slici 2.2., one se odbijaju. Ovo opažanje pokazuje da guma i staklo imaju dvije različite vrste naboja. Na temelju ovih opažanja zaključujemo da se naboji istog znaka odbijaju, a naboji suprotnih znakova privlače.[7]





Slika 2.1. Primjer dokazivanja privlačnih, odnosno odbojnih sila između dvije vrste naboja.[7]

Koristeći imenovanje oznaka koje je predložio Franklin, električni naboj na staklenoj šipci naziva se pozitivnim, a na gumenom šipci negativnim. Stoga, svaki nabijeni objekt koji je privučen nabijenom gumenom šipkom (ili odbijen nabijenom staklenom šipkom) mora imati pozitivan naboj (+), i svaki nabijeni objekt koji je odbijen nabijenom gumenom šipkom (ili privučen nabijenom staklenom šipkom) mora imati negativan naboj (-). Električni naboj je uvijek očuvan u izoliranom sustavu. To znači da, kada se jedan objekt trlja o drugi, naboj se ne stvara u tom procesu. Naelektrizirano stanje nastaje zbog prijenosa naboja s jednog objekta na drugi. Jedan objekt prima određenu količinu negativnog naboja, dok drugi prima jednaku količinu pozitivnog naboja. Godine 1909., Robert Millikan otkrio je da se električni naboj uvijek javlja kao cjelobrojni višekratnik temeljnog iznosa naboja  $e$ . U suvremenim terminima, kaže se da je električni naboj  $q$  kvantiziran, pri čemu je  $q$  standardni simbol za naboj kao varijablu. To znači da se vrijednost električnog naboja može računati formulom:

$$q = Ne [C] \quad (2-1)$$

Gdje  $N$  predstavlja broj nositelja naboje  $e$ . Drugi eksperimenti iz istog razdoblja pokazali su da elektron ima naboj  $-e$ , dok proton ima naboj jednake veličine, ali suprotnog predznaka  $+e$ . Neke čestice, poput neutrona, nemaju naboj. Vrijednosti naboja i masa elementarnih čestica prikazani su tablicom 2.1. [7]

Tablica 2.1. Vrijednosti naboja i masa elementarnih čestica.[7]

ELEMENTARNA ČESTICA	NABOJ [C]	MASA [kg]
Elektron $e$	$-1.6021917 \cdot 10^{-19}$	$9.1095 \cdot 10^{-31}$
Proton $p$	$+1.6021917 \cdot 10^{-19}$	$1,67261 \cdot 10^{-27}$
Neutron $n$	0	$1,67492 \cdot 10^{-27}$

Charles Coulomb mjerio je veličine električnih sila između nabijenih objekata koristeći njegov vlastiti izum, torzijsku vagu. Iz Coulombovih eksperimenata možemo izvesti sljedeća svojstva električne sile između dvije stacionarne nabijene čestice:

- električna sila je obrnuto proporcionalna kvadratu udaljenosti  $r$  između čestica i usmjerena je duž linije koja ih spaja;
- električna sila je proporcionalna je umnošku naboja  $q_1$  i  $q_2$  na dvije čestice;
- električna sila je privlačna je ako su naboji suprotnog znaka, a odbojna ako su naboji istog znaka.

Na temelju eksperimentalnih opažanja o električnoj sili, za nabijenu česticu veličine 0 (točkasti naboj) možemo izraziti Coulombov zakon kao jednadžbu koja izražava veličinu vektora električne sile  $\vec{F}$  (ponekad nazvanu Coulombova sila) između dva točkasta naboja  $q_1$  i  $q_2$  :

$$\vec{F} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \vec{r}_{12} [N] \quad (2-2)$$

Gdje je  $k$  konstanta nazvana Coulombova konstanta, a oznaka  $r$  predstavlja udaljenost između naboja. Vektor  $\vec{r}_{12}$  definiran je kao jedinični vektor udaljenosti između dva naboja. Konstanta  $k$  u zrakopraznom prostoru (vakuumu) ima vrijednost:

$$k = 8.9875 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \quad (2-3)$$

Ukoliko se električna sila pojavljuje u nekom drugom sredstvu (voda, ulje...), tada se konstanta  $k$  računa formulom:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \quad (2-4)$$

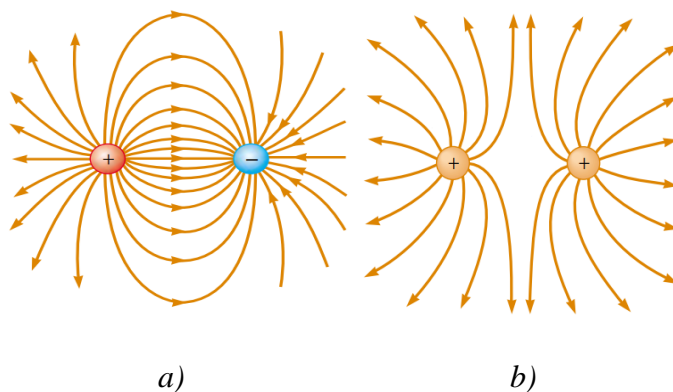
Gdje oznaka  $\epsilon_0$  predstavlja permitivnost vakuuma, odnosno dielektričnu konstantu vakuuma iznosa  $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ , a oznaka  $\epsilon_r$  predstavlja relativnu permitivnost čija vrijednost ovisi o sredstvu u kojem se nalaze naboji. Električni naboj je izvor nastanka pojave koja se naziva električnim poljem, a definira se kao fizikalna veličina koja opisuje temeljno svojstvo subatomske čestice koje međusobno djeluju električnim silama.[2] Električno polje naboja koji miruju u prostoru nazivamo elektrostatičkim poljem. To je vektorsko polje u kojem se očituje djelovanje vektora elektrostatske sile  $\vec{F}$  kojom se točkasti naboji međusobno privlače.[3] Uvrštavanjem vektora sile  $\vec{F}$  u jednadžbu za električno polje:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2-5)$$

gdje oznaka  $\vec{E}$  predstavlja vektor jakosti električnog polja, prikazuje se jednadžba za iznos vektora električnog polja točkastog naboja:

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (2-6)$$

Jedinica jakosti električnog polja  $E$  je *njutn po kulonu (N/C)*, ili *volt po metru (V/m)*. Svakoj točki prostora pridružen je jedan vektor električnog polja, stoga se električno polje može opisati modelom silnica, geometrijskih konstrukcija kojima vizualiziramo djelovanje polja i koje nemaju nekog dubljeg fizikalnog značenja. Slika 2.2. prikazuje model silnica električnog polja dva istoimena naboja i dva različita naboja. [7]



Slika 2.2. Silnice električnog polja pod a) dva različita naboja i pod b) dva pozitivna naboja, [7]

Električni vodič sadrži naboje (elektrone) koji nisu vezani za niti jedan atom i stoga su slobodni kretati se unutar materijala. Kada nema gibanja naboja unutar vodiča, vodič je u elektrostatičkoj ravnoteži. Električno polje vodiča u elektrostatičkoj ravnoteži ima vrijednost 0 unutar vodiča, a ako izolirani vodič nosi naboj, taj naboj se nalazi na njegovoj površini. Električno polje na površini nabijenog vodiča u vakuumu se računa po formuli:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2-7)$$

gdje oznaka  $\sigma$  predstavlja površinsku gustoću naboja. Na nepravilno oblikovanom vodiču, površinska gustoća naboja najveća je na mjestima gdje je polumjer zakrivljenosti površine najmanji. Prema Gaussovom zakonu, električni tok kroz površinu (Slika 2.3.) koja je okomita na vodič kojim teče struja (Gaussova površina), iznosi:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2-8)$$

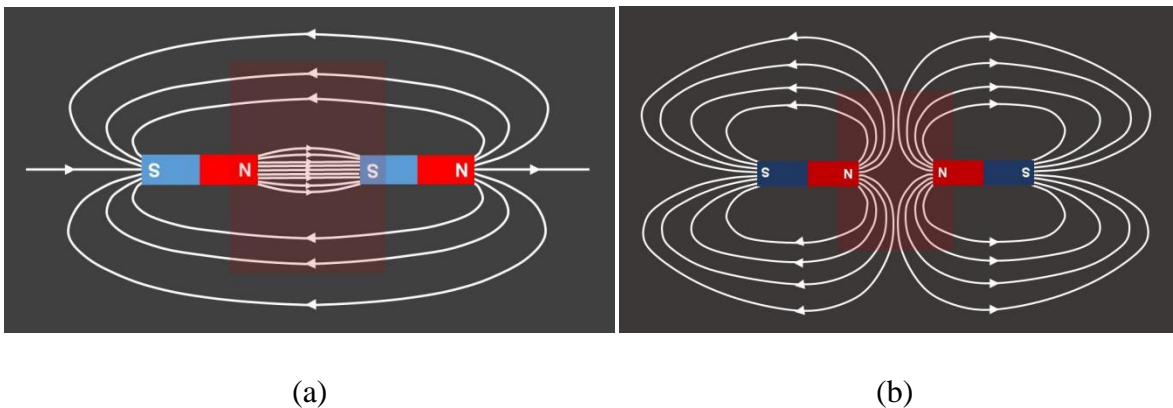
Gdje oznaka  $\vec{E}$  predstavlja vektor električnog polja,  $\vec{A}$  predstavlja vektor Gaussove površine, a  $Q$  naboj unutar zatvorene površine. SI mjerna jedinica električnog toka je *voltmetar* ( $Vm$ ), ili, ekvivalentno, *njutnmetar na kvadrat po kulonu* ( $Nm^2/C$ ). U konačnici, tablica 2.2. prikazuje neke tipične vrijednosti električnih polja.

Tablica 2.2. Tipične vrijednosti električnog polja [7]

IZVOR ELEKTRIČNOG POLJA	JAKOST ELEKTRIČNOG POLJA POLJA [ $V/m$ ]
Fluorescentna svjetiljka	10
Atmosfera (normalni vremenski uvjeti)	100
Balon trljan o kosu	1000
Atmosfera (ispod grmljavinskog oblaka)	10 000
Fotokopirni uređaj	100 000
Iskra u zraku	3 000 000
Blizina elektrona u atomu vodika	$5 \times 10^{17}$

## 2.2. Elementarna svojstva magnetskog polja

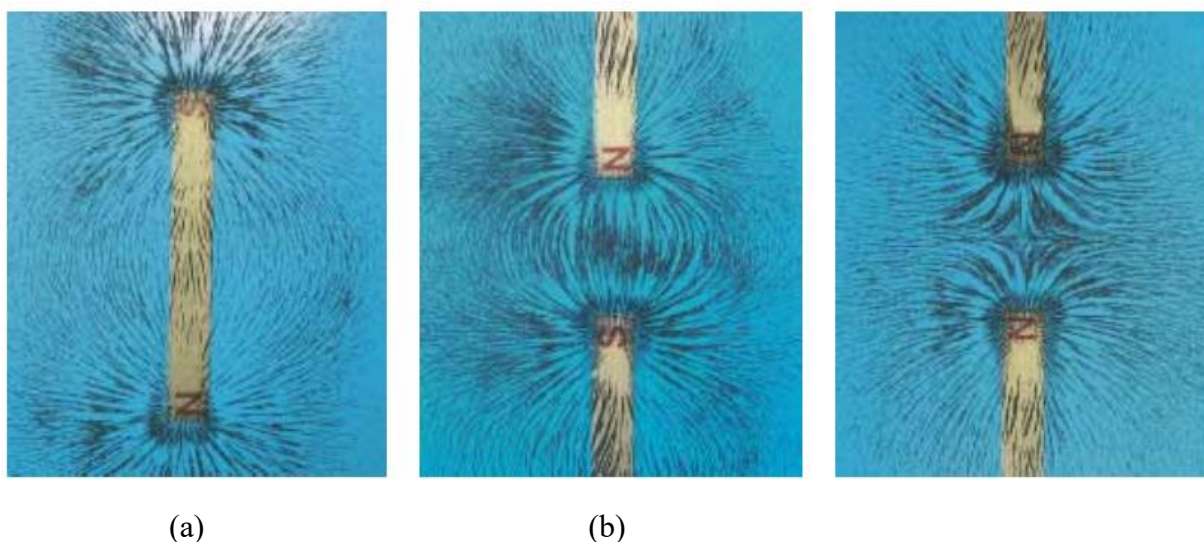
Magnetske pojave poznate su iz starog vijeka (800 godina pr. Kr.) kada je uočeno da željezna ruda magnetit ima sposobnost privlačenja željeza. [7] Tvari koje imaju svojstvo privlačenja predmeta od željeza, nikla, kobalta i njihovih legura nazivamo magneti.[8]Tvari iz prirode (poput magnetita) koje sadrže navedena svojstva nazivaju se prirodni magneti. S druge strane, postoje i umjetni magneti koji stječu magnetska svojstva samo prilikom vanjskog utjecaja. Primjerice, kada se komad željeza nalazi u dodiru s magnetom (ili u njegovoj neposrednoj blizini) tada stječe magnetska svojstva. Umjetne magnetite dijelimo na permanentne magnetite (prilikom magnetiziranja trajno zadržavaju magnetska svojstva) i elektromagnetite (pokazuju magnetska svojstva samo pod električnim podražajem).[12]Naknadni pokusi znanstvenika pokazali su da svaki magnet, bez obzira na njegov oblik, ima dva pola koji se nazivaju sjeverni ( $N$ ) i južni ( $S$ ) i koji djeluju silama na druge magnetske polove slično načinu na koji međusobno djeluju električni naboji (*Slika 2.3.*). To jest, slični polovi ( $N-N$  ili  $S-S$ ) se odbijaju, a suprotni polovi ( $N-S$ ) privlače jedni druge. Prostor oko magnetita u kojem djeluju magnetske sile zove se magnetsko polje. [8.]



*Slika 2.3. Prikaz djelovanja magnetskog polja između suprotnih polova (a) i istih polova (b) magnetita pomoću silnica.[8]*

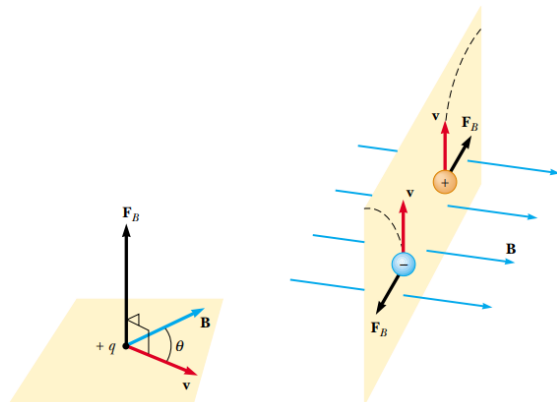
Polovi su dobili svoja imena zbog načina na koji se magnet ponaša u prisutnosti Zemljinog magnetskog polja. Ako je šipkasti magnet obješen na središtu i može se slobodno ljuljati u vodoravnoj

ravnini, okretat će se sve dok njegov sjeverni pol ne pokazuje na geografski sjeverni pol Zemlje, a južni pol pokazuje na Zemljin geografski južni pol. Vjerodostojni vizualni prikaz ovakvog magnetskog djelovanja Zemlje je kompas, uređaj za navigaciju koji radi upravo na prethodno opisanom principu. Djelovanje magnetskog polja magneta praktično opisuje pokus sa željeznom piljevinom prikazan na slici 2.4. Ukoliko na magnet postavimo staklenu podlogu sa željeznom piljevinom, ta piljevina će se privlačnom silom magneta u njegovom magnetskom polju postaviti u položaj djelovanja silnica magnetskog polja.



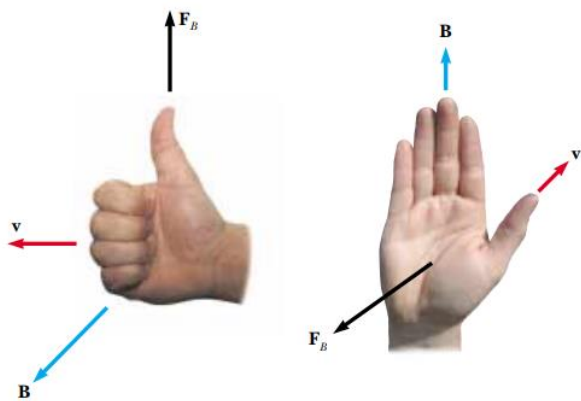
Slika 2.4. Pokus sa željeznom piljevinom.[7]

Magnetsko polje u nekoj točki prostora vektorski je prikazano na slici 2.5. i definirano je na slijedeći način: Veličina magnetske sile  $\vec{F}$  koja djeluje na česticu proporcionalna je naboju čestice  $q$  i brzini čestice  $v$ , a veličina i smjer vektora magnetske sile  $\vec{F}$  ovise o brzini čestice  $v$  i o veličini i smjeru gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$ . [3] Kada se nabijena čestica giba paralelno s vektorom gustoće magnetskog toka, magnetska sila koja djeluje na česticu iznosi 0 N. Ako vektor brzine čestice  $v$  s vektorom gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$  zatvara bilo koji kut različit od nule ( $\theta \neq 0$ ), magnetska sila djeluje u smjeru okomitom na brzinu čestice  $v$  i smjeru okomitom vektorom gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$ ; odnosno okomita je na ravninu koju tvore  $v$  i  $\vec{B}$ . Magnetska sila koja djeluje na pozitivan naboj je u smjeru suprotnom od smjera magnetske sile koja djeluje na negativni naboj koji se kreće u istom smjeru.



Slika 2.5. Vektorski prikaz djelovanja magnetskog polja na nabijenu česticu u prostoru.[7]

Alternativni vektorski način određivanja magnetske sile opisuju dva pravila desne ruke prikazana na slici 2.6. Ruka s podignutim palcem prikazuje vektore na način da su četiri prsta usmjerena duž smjera vektora brzine  $\vec{v}$ , dlan je okrenut prema smjeru magnetskog polja, dok ispruženi palac prikazuje vektor magnetske sile  $\vec{F}_B$  kao umnožak vektora  $\vec{v}$  i  $\vec{B}$ . Pošto vrijedi izraz:  $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ , vektor magnetske sile  $\vec{F}_B$  je u smjeru ispruženog palca ako je naboj  $q$  pozitivan, ukoliko je negativan tada  $\vec{F}_B$  ima smjer suprotan smjeru palca. Ruka s otvorenim dlanom drži palac u smjeru vektora brzine  $\vec{v}$  i četiri ispružena prsta u smjeru vektora gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$ , dok vektor magnetske sile  $\vec{F}_B$  pri pozitivnom naboju izlazi iz dlana, a pri negativnom naboju ulazi u dlan.[7]



Slika 2.6. Dva pravila desne ruke za određivanje smjera vektora magnetske sile  $\vec{F}_B$  [7]

Navedene tvrdnje sumarizirane su matematičkom formulom:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2-9)$$

gdje je:

$\vec{F}_B$  – vektor magnetske sile

$q$  – naboj čestice

$\vec{v}$  – vektor brzine čestice

$\vec{B}$  – vektor gustoće magnetskog toka,

Ova formula prikazuje vektor magnetske sile kao vektorski umnožak brzine čestice i jakosti magnetskog polja te iz ovog izraza proizlazi formula za izračun iznosa magnetske sile na nabijenu česticu:

$$F_B = |q|\vec{v}\vec{B} \sin \theta \quad (2-10)$$

gdje je  $\theta$  manji kut između vektora brzine čestice i vektora magnetskog polja. Iz navedenog izraza može se zaključiti da je iznos magnetske sile jednak nuli kada je vektor brzine paralelan ili antiparalelan s vektorom magnetskog polja, odnosno kada je kut između ta dva vektora  $\theta = 0^\circ$  ili  $\theta = 180^\circ$ . Kinetička energija nabijene čestice koja se kreće kroz magnetsko polje ne može biti promijenjena samo magnetskim poljem. Polje može promijeniti smjer vektora brzine, ali ne može promijeniti brzinu, odnosno kinetičku energiju čestice. Električna i magnetska sila imaju nekoliko važnih razlika:

- Vektor električne sile usmjeren je duž smjera električnog polja, dok je vektor magnetske sile okomito na vektor gustoće magnetskog polja.
- Električna sila djeluje na nabijenu česticu bez obzira na to kreće li se čestica, dok magnetska sila djeluje na nabijenu česticu samo kada se čestica kreće.
- Električna sila obavlja rad u pomicanju nabijene čestice, dok magnetska sila povezana sa stalnim magnetskim poljem ne obavlja rad kada se čestica pomiče jer je sila okomita na pomak.[7]



Jedinica gustoće magnetskog toka je „Newton po kulon-metru po sekundi“, a prema međunarodnom sustavu jedinica (SI sustav) nazvana je „Tesla“ (T):

$$1 T = 1 \frac{N}{C \cdot m/s} \quad (2-11)$$

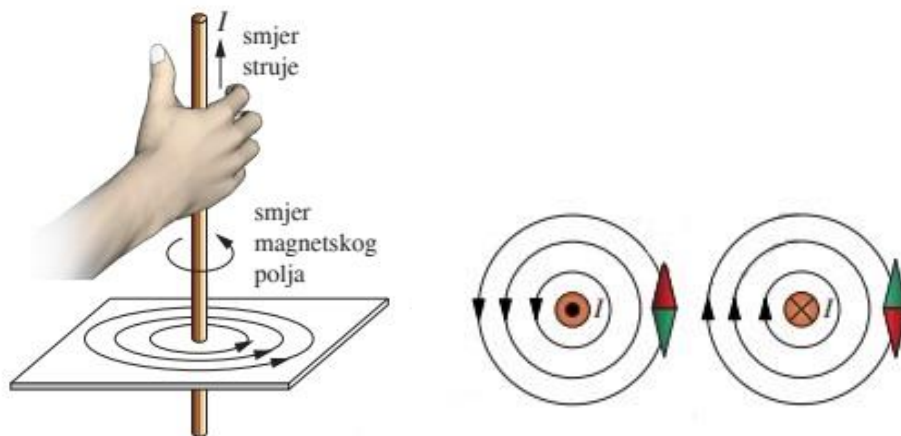
Mjerna jedinica gustoće magnetskog toka koja nije dio SI sustava zove se Gauss (G), a povezana je s Teslom (T) putem konverzije  $1 T = 10^4 G$ . Tablica 2.3. prikazuje neke tipične vrijednosti magnetskog polja.

Tablica 2.3. Tipične vrijednosti magnetskog polja [7]

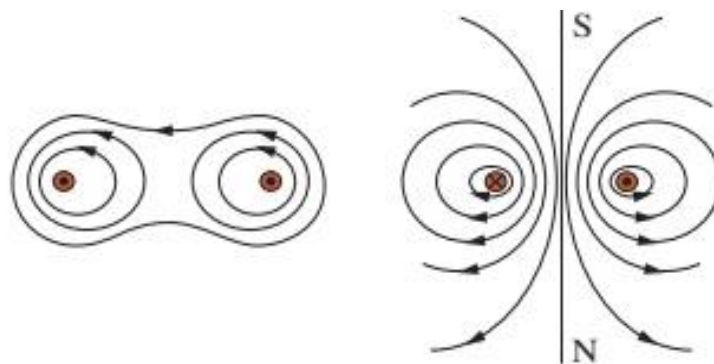
<b>IZVOR MAGNETSKOG POLJA</b>	<b>GUSTOĆA MAGNETSKOG TOKA [T]</b>
Snažan superprovodljivi laboratorijski magnet	30
Konvencionalni laboratorijski magnet	2
Bolnička soba za magnetsku rezonancu	1,5
Magnetska potkova	$1 \cdot 10^{-2}$
Površina Sunca	$1 \cdot 10^{-2}$
Površina Zemlje	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Unutrašnjost ljudskog mozga	$1 \cdot 10^{-13}$

### 2.3. Induciranje magnetskog polja vodiča kojim teče struja

Veza između magnetizma i elektriciteta je slučajno otkrivena 1820. godine od strane Hansa Christiana Oersteda, danskog fizičara i kemičara koji je na Sveučilištu u Kopenhagenu predavao o elektricitetu, magnetizmu i galvanizmu. Tada su se u elektricitetu proučavale isključivo pojave u elektrostatici, u galvanizmu djelovanja tek nedavno otkrivene struje, a magnetizam se poručavao pokusima koji su uključivali samo prirodne magnete. Oersted je primijetio da se magnetna igla pomiče u blizini vodiča kojim prolazi istosmjerna struja i tako otkrio magnetski učinak električne struje. Zaključeno je da se magnetna igla zakreće okomito na smjer vodiča, odnosno da se magnetsko polje stvara uzduž cijele dužine vodiča protjecanog istosmjernom strujom. Pravilo desne ruke za magnetsko polje vodiča nalaže da palac pokazuje smjer električne struje, a savijeni prsti desne ruke pokazuju smjer silnica magnetskog polja. Ukoliko se struji promjeni smjer, promijenit će se i smjer magnetne igle, odnosno silnica magnetskog polja. Navedene tvrdnje vizualno su prikazane slikom 2.7. Magnetsko polje između dvaju ravnih vodiča kojima teče struja nastaje superpozicijom polja pojedinih vodiča, a oblik magnetskog polja ovisi o smjeru struja u vodičima. Slika 2.8. prikazuje magnetsko polje kada struje teku u istom i suprotnom smjeru.[12]

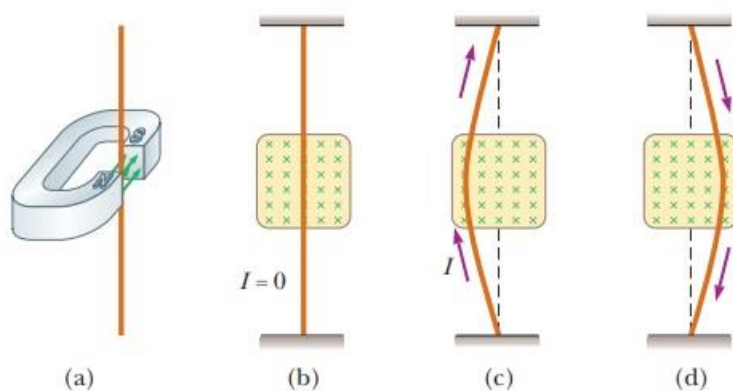


Slika 2.7. Pravilo desne ruke na vodič i silnice magnetskog polja vodiča [12]



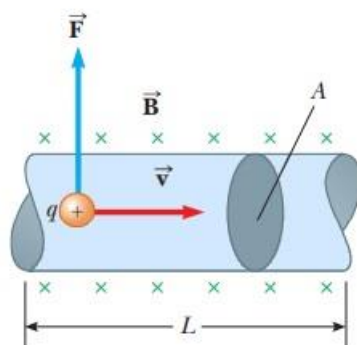
Slika 2.8. Silnice magnetskog polja prilikom istog smjera struje (lijevo) i različitog smjera struje (desno) [12]

Ako na pojedino nabijenu česticu djeluje magnetska sila kada se čestica kreće kroz magnetsko polje, smisljeno je da i vodič kroz koji teče struja doživljava silu kada se postavi u magnetsko polje. Struja je skup mnogih nabijenih čestica u pokretu, stoga je rezultatna sila kojom polje djeluje na vodič vektorski zbroj pojedinačnih sila koje djeluju na sve nabijene čestice koje čine struju. Sila koja djeluje na čestice prenosi se na vodič kada čestice udare u atome koji čine vodič.

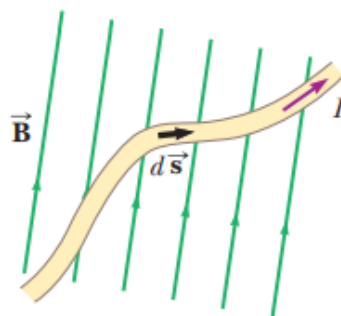


Slika 2.8. Vizualni prikaz djelovanja magnetske sile na vodič. [7]

Magnetnu silu koja djeluje na vodič kroz koji prolazi struja možemo demonstrirati postavljanjem žice između polova magneta, kako je prikazano na slici 2.8. Radi lakše predodžbe, dio magneta pod oznakom (a) je uklonjen kako bi se prikazala donja površina južnog pola u dijelovima (b), (c) i (d). Magnetsko polje usmjereno je prema unutrašnjosti stranice magneta i pokriva područje unutar sjenčanih kvadrata. Kada je struja u žici nula, žica ostaje vertikalna, kao što je prikazano pod oznakom (b). Međutim, kada žica nosi struju usmjerenu prema gore žica se savija ulijevo, što prikazuje oznaka (c). Pod oznakom (d) prikazano je savijanje žice udesno ukoliko promijenimo smjer struje prema dolje. Ova rasprava je proširena razmatranjem ravne dionice žice duljine  $L$  i poprečnog presjeka  $A$  koja nosi struju  $I$  u homogenom magnetskom polju, a prikazana je slikom 2.9.



Slika 2.9. magnetsko polje ravnog vodiča [7]



Slika 2.10. magnetsko polje neravnog vodiča [7]

Magnetska sila  $\vec{F}_B$  koja djeluje na naboj  $q$  koji se kreće vodičem brzinom  $\vec{v}$  je  $q\vec{v} \times \vec{B}$ . Kako bismo odredili ukupnu magnetsku silu koja djeluje na žicu, pomnožit ćemo silu  $q\vec{v} \times \vec{B}$  koja djeluje na jedan naboj sa ukupnim brojem naboja u segmentu žice. Pošto je volumen segmenta jednak umnošku površine presjeka vodiča  $A$  i duljine segmenta vodiča  $L$ , tada je broj naboja u segmentu jednak  $nAL$ , gdje  $n$  predstavlja broj naboja po jediničnom volumenu. Sukladno tome, ukupna magnetska sila koja djeluje na vodič duljine  $L$  računa se izrazom:

$$\vec{F}_B = (q\vec{v} \times \vec{B}) nAL \quad (2-12)$$

Uzeći u obzir da je ukupna struja vodiča  $I = AvqN$ , vrijedi izraz:

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (2-13)$$

Gdje je  $\vec{L}$  vektor istog smjera struje  $I$  i iznosa je duljine segmenta vodiča  $L$ . Ovaj izraz vrijedi samo za ravnu dionicu žice u homogenom magnetskom polju. Sada razmotrimo proizvoljno oblikovanu dionicu žice jednoličnog poprečnog presjeka u magnetskom polju, kako je prikazano na slici 2.10. Iz jednadžbe (2-5) proizlazi da je iznos magnetske sile koja djeluje na mali segment vektorske duljine  $d\vec{s}$  u prisutnosti magnetskog polja  $B$  jednak izrazu:

$$d\vec{F}_B = I d\vec{s} \times \vec{B} \quad (2-14)$$

Za izračun ukupne sile  $\vec{F}_B$  po cijeloj duljini proizvoljno oblikovanog vodiča prethodni izračun poprima integralni oblik:

$$\vec{F}_B = I \int_b^a d\vec{s} \times \vec{B} \quad (2-15)$$

gdje su  $a$  i  $b$  oznake za početak i kraj vodiča.

Biot-Savartov zakon opisuje magnetsko polje koje stvara stalna električna struja te nalaže da je magnetsko polje  $B$  (u nekoj točki prostora pored vodiča kojim teče struja) izravno proporcionalno struji  $I$  i duljini vodiča  $s$ , a obrnuto proporcionalno kvadratu udaljenosti  $r$  od vodiča do točke prostora. Sukladno navedenom prikazana je formula za izračun jakosti magnetskog polja:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2-16)$$

Mjerna jedinica jakosti magnetskog polja je amper po metru ( $A/m$ ). U konačnici je potrebno (prema Gaussovom zakonu) definirati magnetski tok, skup magnetskih silnica koje prolaze površinom čija se vrijednost računa izrazom:

$$\vec{\Phi}_B = \int \vec{B} \times d\vec{A} \quad (2-17)$$

gdje je  $d\vec{A}$  vektor površine okomit na površinu  $A$  i ima veličinu jednaku površini  $A$ . Mjerna jedinica magnetskog toka je Weber ( $Wb$ ). [7]

### 3. NADZEMNI VODOVI

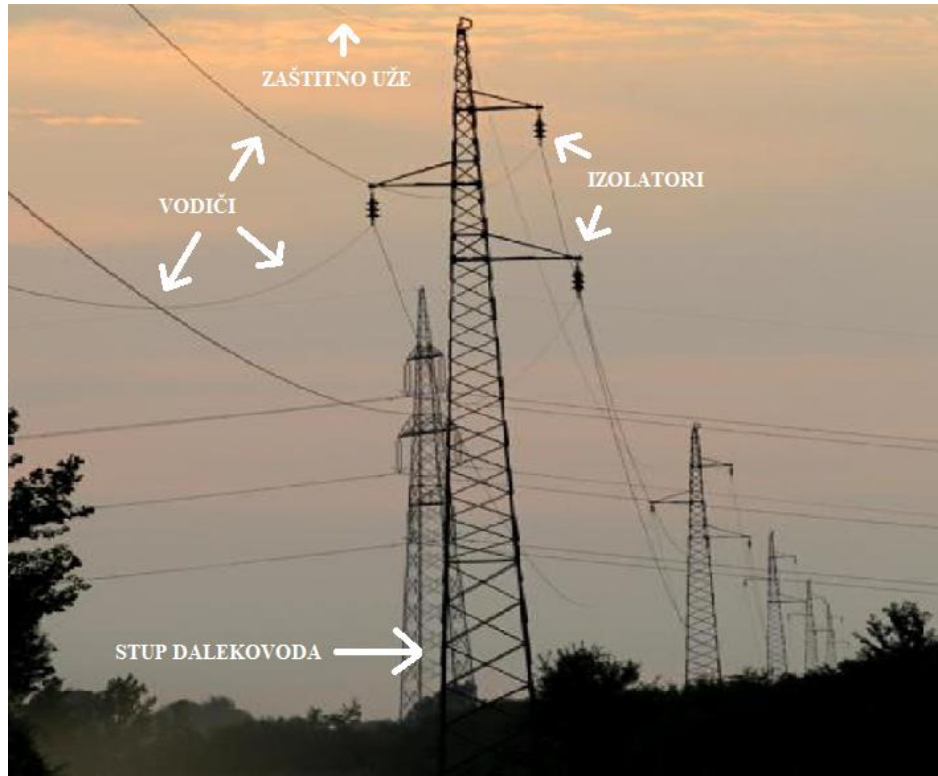
U procesu prijenosa električne energije dominantno se koristi izmjenična trofazna električna mreža, koja obuhvaća visokonaponske vodove, kabele, transformatore i drugu opremu. Prijenos se provodi na visokim naponskim razinama s ciljem smanjenja gubitaka. Visina naponske razine određuje se prema potrebnoj snazi prijenosa i udaljenosti prijenosa. U Republici Hrvatskoj koriste se naponske razine od 110, 220 i 400 kV za prijenos električne energije. Svjetski rekordi za najviše prijenosne naponske razine su 1150 kV u postojećim sustavima i 1500 kV u fazama razvoja. Prijenosne mreže u modernim elektroenergetskim sustavima međusobno su povezane i zatvorene kako bi se povećala pouzdanost opskrbe potrošača, što karakterizira izraz "pogonski zatvorene prijenosne mreže". Na taj način nastaju veliki elektroenergetski sustavi koji povezuju različite zemlje. [6] Da bismo precizirali razlike između električnih vodova i kabela, citiram idući navod:

*“Električni vod je skup jednog ili više električnih vodiča, izolacije i druge električne opreme koji zajedno služe za prijenos električne energije. Najuobičajenija je podjela na zračne (nadzemne) i kabela vodove. Prema mjestu postavljanja možemo ih podijeliti na nadzemne, podzemne, podvodne, itd. Kabel (množina kabele!) je, dakle, izoliran (obložen) električni vod s jednim ili više vodiča unutar jednog zajedničkog plašta (omotača).“ [6]*

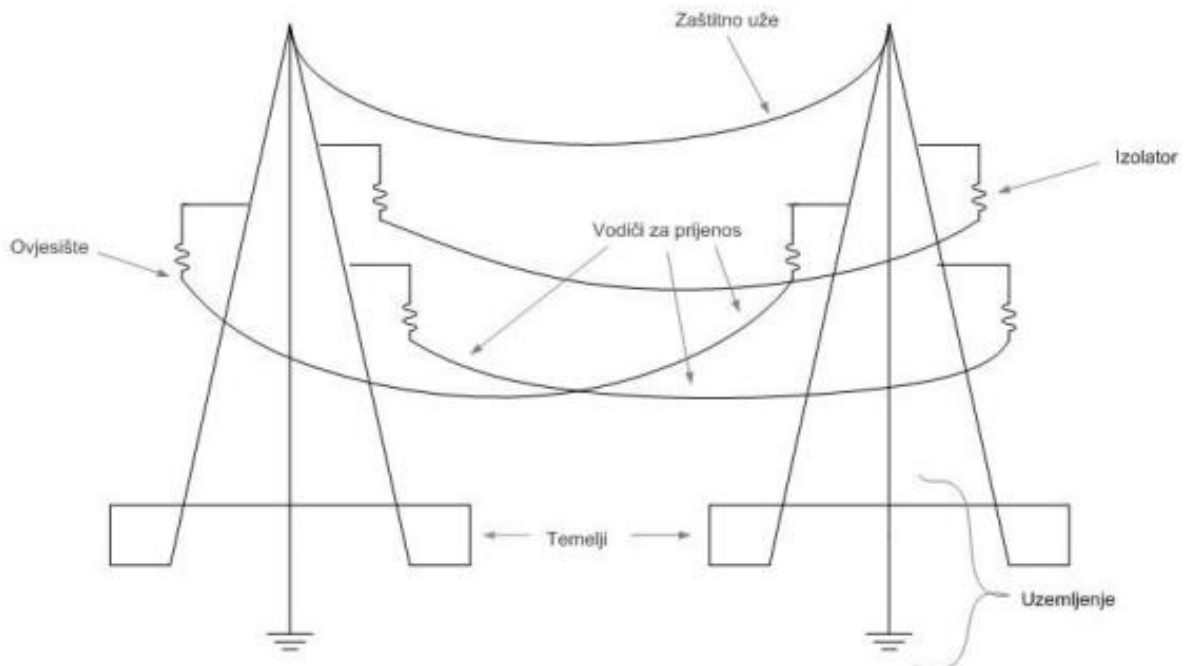
Nadzemni vod je električni energetska vod, sastavni dio električnih energetska mreža koji služi za prijenos električne energije izveden nad zemljom, a visokonaponske izvedbe ovakvih tipova vodova zovu se dalekovodi [4]. Osnovni dijelovi nadzemnih vodova su:

- stupovi
- temelji
- izolatori
- vodiči
- spojni, ovjesni i zaštitni pribor
- zaštitno užje i uzemljenje [6]

Navedeni dijelovi vizualno su prikazani slikom 3.3., dok slika 3.2. prikazuje vidljive dijelove nadzemnog voda. Detaljniji opis elemenata sadržan je u nastavku teksta.



Slika 3.1. Prikaz nadzemnog voda i vidljivih sastavnih dijelova.

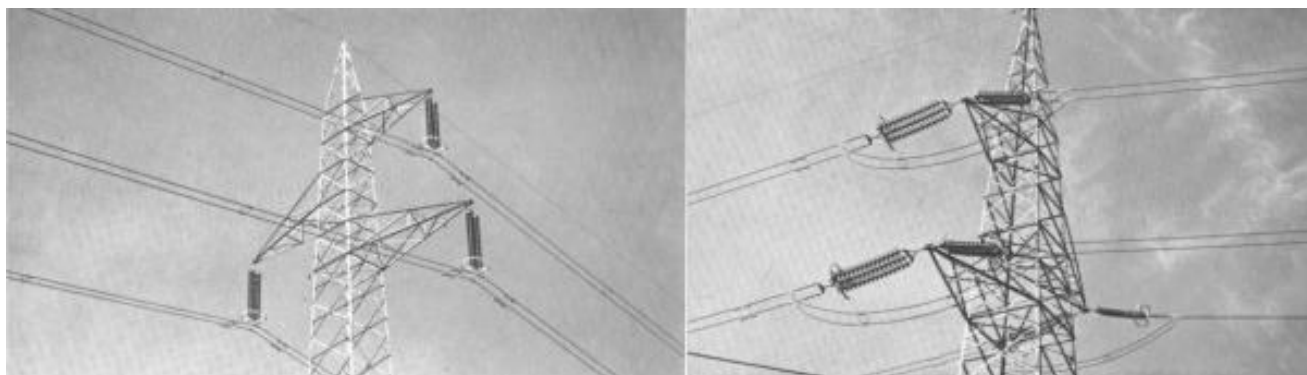


Slika 3.2. Prikaz nadzemnog voda i svih sastavnih dijelova. [6]



### 3.1. Stupovi i temelji

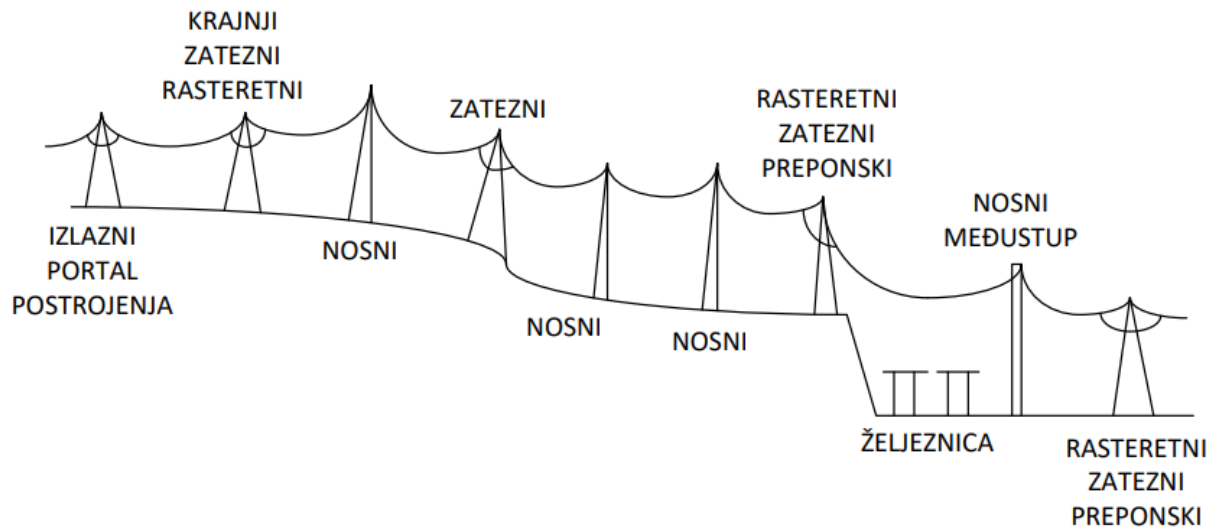
Stupovi nadzemnog voda odgovorni su za nosače vodiča i pripadajuću opremu. Njihova ključna funkcija je osigurati adekvatnu visinu vodiča iznad tla, te prenijeti sve mehaničke sile koje djeluju na vodiče: vertikalne (uzrokovane težinom vodiča i dodatnog tereta), horizontalne duž trase voda (vučna naprežanja vodiča) te horizontalne okomite na trasu voda (djelovanje vjetra). Prilikom dimenzioniranja stupova, važno je uzeti u obzir utjecaj vjetra i samu težinu stupova. Stupovi se klasificiraju prema funkciji, uključujući nosive, zatezne, rasteretne, krajnje, preponske, međustupove, križišne i prepletene stupove. Nosivi stupovi, poznati i kao nosni ili noseći stupovi, imaju ulogu podržavanja vodiča i osiguravanja određene visine iznad tla. Zatezni stupovi, kako im samo ime sugerira, zatežu vodiče i osiguravaju potrebnu napetost u njima. Zbog toga su zatezni stupovi čvršći, robusniji i niži od nosivih stupova jer moraju izdržati veća mehanička opterećenja. U pravilu, u ravnoj trasi dalekovoda, svaka tri do četiri nosiva stupa slijedi jedan zatezni stup, definirajući otponsko polje između dva zatezna stupa.



*Slika 3.3. Glava nosivog stupa (lijevo) i zateznog stupa (desno).[6]*

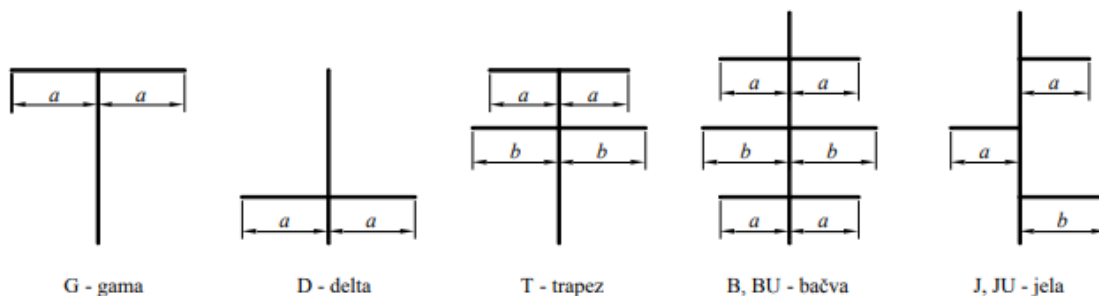
Rasteretni stup je konstrukcija koja je dizajnirana da podnese prekid svih vodiča s jedne strane. Krajnji stup smješten je na kraju voda i obično ima funkciju rasteretnog stupa. Preponski stup nije jednako napregnut s obje strane zbog promjene presjeka ili promjene maksimalno dozvoljenog naprežanja, primjerice, kod prijelaza preko željezničkih pruga, plovnih rijeka, autocesta i slično. Preponski stupovi obično također imaju funkciju rasteretnih stupova.

Međustup je nosivi stup koji se postavlja u preponsko otponsko polje kako bi vodiči dobili potrebnu visinu. Križišni stupovi koriste se na mjestima gdje se dva voda križaju, dok se na prepletnim stupovima faze prepliću radi postizanja simetrije. Primjer nadzemnog voda koji zahtjeva više vrsta stupova prikazan je slikom 3.4. Stupove prema njihovom položaju dijelimo na linijske stupove (nalaze se u ravnom dijelu vertikalne projekcije trase i kutni stupove) i kutne stupove (nalaze se na mjestu loma vertikalne projekcije trase). Kutni stupovi su obično zatezni ili rasteretni.



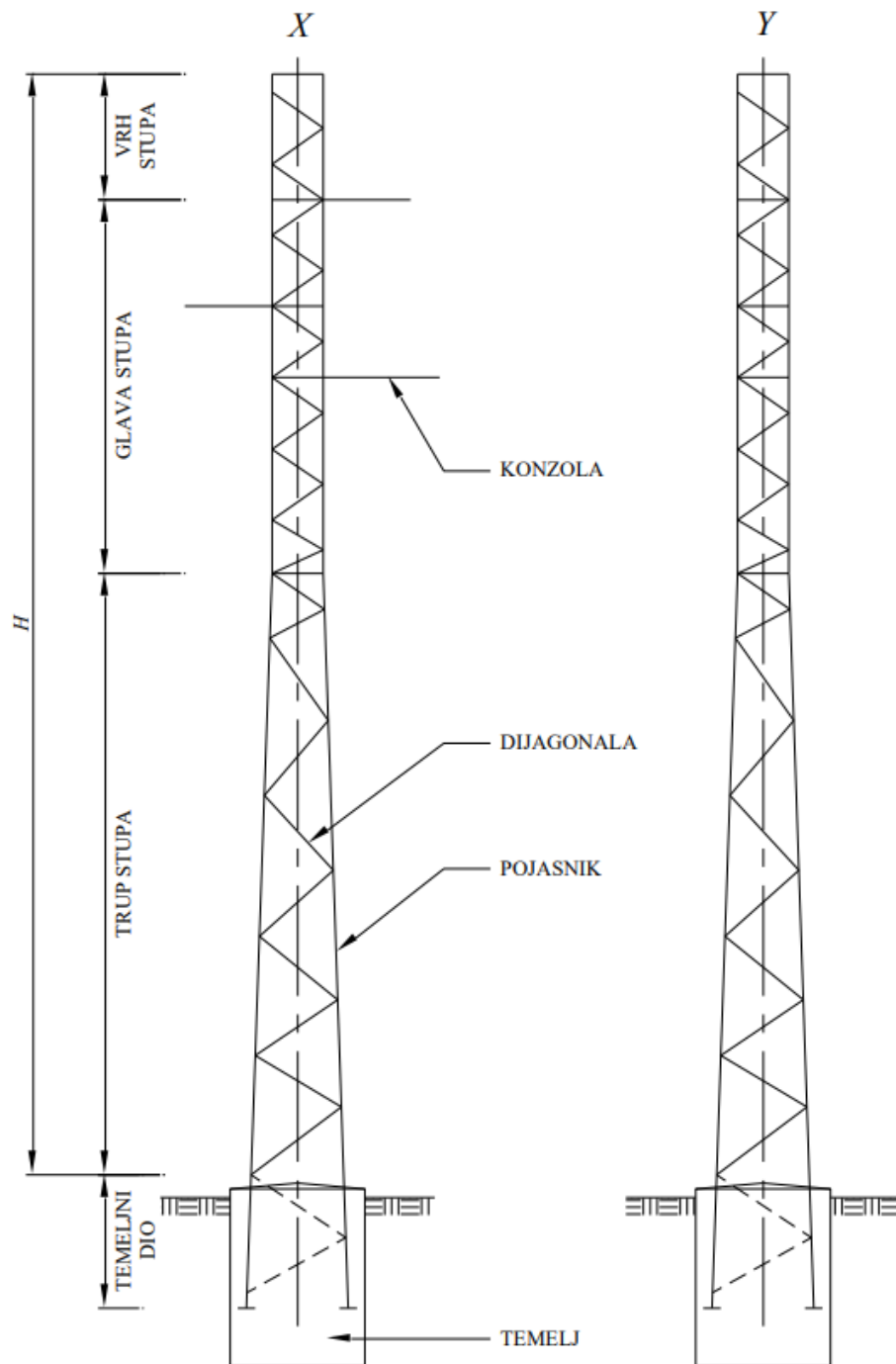
Slika 3.4. Nadzemni vod s različitim vrstama stupova[6].

Gornji dio stupova naziva se glava stupa, a na njoj su pričvršćeni poprečni elementi poput konzola, na koje su zatim pričvršćeni izolatori i vodiči. Izgled glave stupa ovisi o broju vodiča, o zaštitnoj užadi, o vrsti stupa itd. Glave stupa mogu biti izvedene kao simetrične (dvostrane konzole) i nesimetrične (jednostrane konzole). Tipični primjeri glava (Sl. 3.5.) s dvostrukim konzolama su oblik gama, delta, trapez i bačva, dok je jela tipičan primjer glave stupa s jednostrukim konzolama.



*Slika 3.5. Tipični oblici glava stupa [13]*

Materijali koji se koriste za izradu stupova uključuju drvo, čelik i beton. Drvo se često koristi za izradu stupova na nižim naponima. Njegove prednosti uključuju malu težinu, nisku cijenu i brzu ugradnju, ali mana mu je relativno mala trajnost. Čelik se primjenjuje u konstrukciji čelično-rešetkastih stupova, koji obično imaju 4 (ponekad 3) kutna štapa (pojasnika) koji preuzimaju veći dio tereta. Ti stupovi dodatno su ojačani dijagonalnim rešetkama koje ih povezuju. Čelično-rešetkasti stupovi koriste se na višim naponima zbog potrebne mehaničke čvrstoće, posebno kada stupovi moraju biti viši. Mana čelika je smanjena trajnost zbog izloženosti koroziji. Na Slici 3.6 prikazan je primjer konstrukcije čelično-rešetkastih nosivih jednostrukih stupova s elementima od kutnog profilnog čelika. Treći čest materijal za izradu stupova je beton, koji se primjenjuje manje od čelika, uglavnom na nižim i srednjim naponima. Njegova ključna prednost je visoka trajnost. Drveni i betonski stupovi mogu se direktno postaviti u zemlju bez potrebe za izgradnjom temelja. Kako bi se spriječilo propadanje drvenih stupova u zemlji, često se koriste betonski nogari za njihovo postavljanje. Čelično-rešetkasti stupovi obično imaju armirano betonski temelj, koji može biti kompaktan ili podijeljen na 4 ili 3 dijela, ovisno o broju nosivih štapova. Izgradnja temelja također je snažno uvjetovana vrstom tla. Na primjer, u kamenoj podlozi može se jednostavno izbušiti rupa u kojoj se čelični štapovi zaliju betonom. S druge strane, u močvarnim područjima betonski temelji mogu biti duboki i prelaziti 10 metara. [6]



Slika 3.6. Konstrukcija čelično-rešetkastog stupa nadzemnog voda [13].

## 3.2. Izolatori

Izolacija nadzemnih vodova u načelu je zrak, a na mjestima vezanja vodiča sa stupovima potrebna je upotreba izolatora. Izolatori drže vodiče u adekvatnom položaju, prenoseći težinu i mehanička naprezanja na stupove nadzemnog voda. Dakle, izolatori su opterećeni električki i mehanički, a prilikom pojave električnog luka opterećeni su termički. Konvencionalni materijal za izradu izolatora je porculan (mješavina glinenca, kvarca i kaolina), a još se koristi steatit, staklo i umjetne mase. Prednost stakla s obzirom na na porculan je vidljivost oštećenja te se prilikom proboja staklo raspada.

Zahtjevi koji se postavljaju na izolatore su sljedeći:

- električna čvrstoća na preskok
- električna čvrstoća na proboj
- mehanička čvrstoća
- otpornost na atmosferske utjecaje
- otpornost na promjenu temperature
- trajnost
- ekonomičnost i lako održavanje

Prema načinu kako izolatori nose vodič, dijele se na potporne i ovjesne. Ovjesni izolatori mogu biti lančani (od više članaka, kapasti ili masivni) ili štapni (sastoje se od jednog dijela). [6]

### 3.3. Vodiči

Električni vodič je električki vodljiva tvar, tj. tvar kroz koju električna struja može kontinuirano teći i kojoj je električna provodnost veća od približno  $10^7 S/m$ . Električna provodnost vodiča temelji se na građi njihovih atoma. Građa atoma utječe na pokretljivost elektrona kroz vodič, koji se pod djelovanjem neke sile mogu osloboditi iz vanjske elektronske ljuske matičnoga atoma i usmjereno gibati kroz tvar. [6]

Materijal za vodiče nadzemnih vodova mora ispuniti slijedeće zahtjeve:

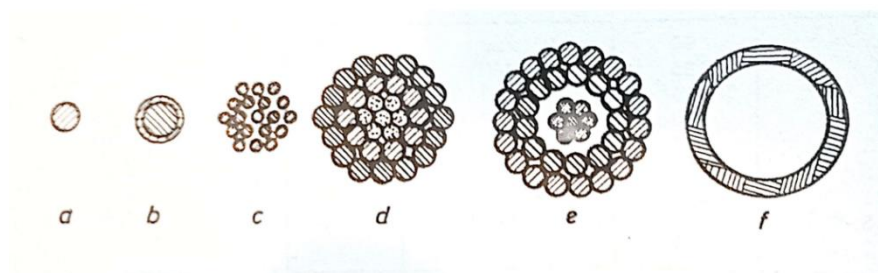
- dobra električna vodljivost (specifična električna vodljivost)
- dobra mehanička čvrstoća (prekidna čvrstoća)
- optimalna težina
- optimalni promjer vodiča-
- otpornost prema kemijskom djelovanju okoline
- otpornost na atmosferske utjecaje-
- otpornost na oštećenja kod montaže, starenja i korozije
- visoka dopuštena temperatura ugrijavanja
- prihvatljiva cijena [14]

Kao materijal za vodiče se zbog prethodno navedenih optimalnih svojstava najprije koristio bakar. Radi uštede bakra danas se upotrebljava aluminij, materijal manje specifične težine (30,4 % specifične težine bakra) te sukladno tome ima polovinu težine bakrenog vodiča s istom vodljivošću. Međutim, zbog relativno male mehaničke čvrstoće, čisti aluminij ne dolazi u obzir za veće raspone između stupova nadzemnih vodova, dakle uglavnom niti za visokonaponske dalekovode. Zbog poboljšanja mehaničkih svojstava vodiča zato se koriste legure metala kao što je npr. bronca (legura bakra i kositra s dodatkom aluminijske i silicijne) koja se često upotrebljava za raspone voda koji zahtijevaju veću mehaničku čvrstoću (veliki rasponi kod prijelaza prijeko rijeka i dolina, područja s velikim teretom leda i sl.). Kako bi se sjedinila optimalna električna svojstva bakra i aluminijske s mehaničkim svojstvima čelika, izrađuju se kombinirani vodiči od dva različita materijala. Najčešće se upotrebljava uže kombinirano od aluminijske i čelika (*Sl. 3.7.*), tzv. alučel,

gdje mehanički teret u najvećem djelu preuzima jezgra od čelika čvrstoće  $120 \text{ daN/mm}^2$ , a za vođenje struje u obzir se uzima samo aluminijski plašt. Ova se užeta najčešće koriste od srednjih do najviših napona.[14]



*Slika 3.7. Kombinirano uže aluminija i čelika (alučel).[6]*



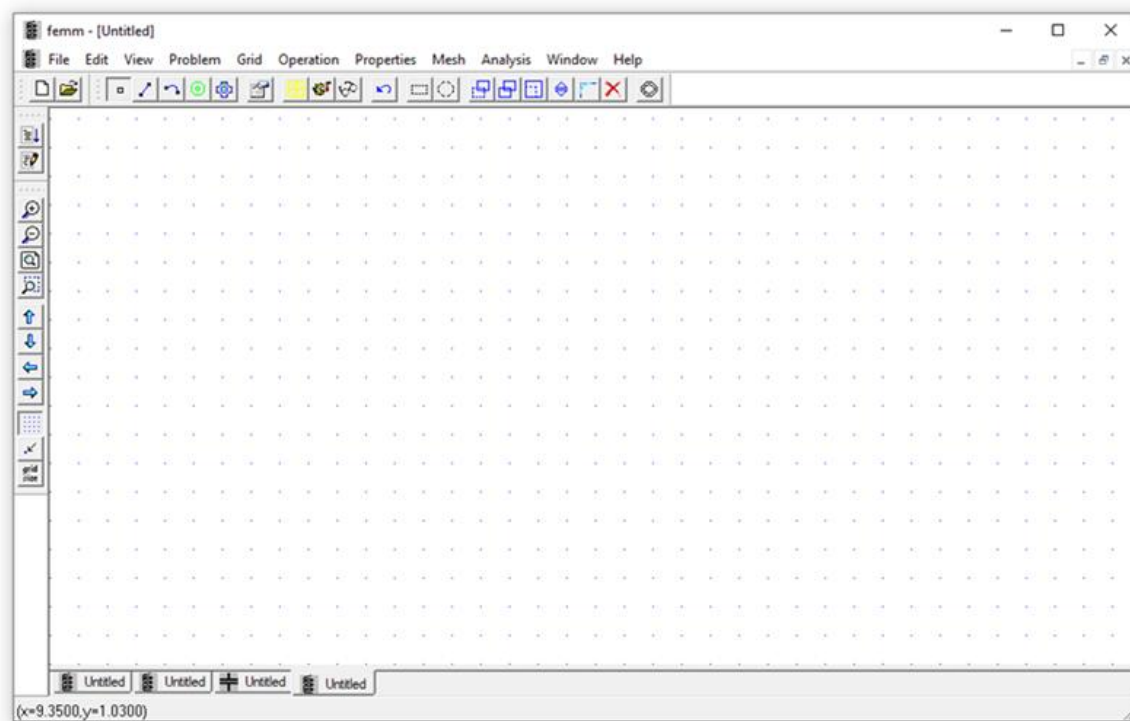
*Slika 3.8. Izvedbe vodiča.[14]*

Izvedbe vodiča ovise o njegovoj primjeni te su prikazani na slici 3.8. Vodič u obliku žice (*a*) i obložena žica (*b*) se zbog svoje krutosti ne upotrebljavaju kod većih presjeka vodiča, odnosno dalekovoda. Kako bi vodič imao veću gibljivost, vodiči se izrađuju kao užeta (*c*) pletena od većeg broja žica. Kombinirana užeta (*d*) prvenstveno se izrađuju od čelika i aluminija, kao što je prethodno opisano. Pri tome je uobičajeni omjer aluminija i čelika u vodiču 6:1, a za veće mehaničke čvrstoće koriste se i omjeri 3:1 i 4:1. Antivibracijska užeta (*e*) izrađuju se kako bi se utjecalo na vibraciju užeta zbog vjetra. Takva užeta imaju šupljinu između aluminijskom plašta i čelične jezgre, pomoću koje dolazi do prigušenja vibracije. Šuplji vodiči (*f*) se izrađuju samo od bakra i imaju različite konstrukcije kojima je svrha da vodič bude gibljiv i da sačuva svoj oblik. Zbog upotrebe alučela i primjene snopova vodiča na jednu fazu, šuplji vodiči gube na značaju.[14]



## 4. PROGRAMSKI PAKET FINITE ELEMENTS METHOD MAGNETICS

FEMM (*engl. Finite Elements Method Magnetics*) je simulacijski programski paket za rješavanje niskofrekventnih elektromagnetskih problema u području magnetostatike i elektrostatike te preko svoga sučelja prikazanog na slici 4.1. dvodimenzionalno (u koordinatnom sustavu) prikazuje rezultate i elektromagnetske pojave. [9]

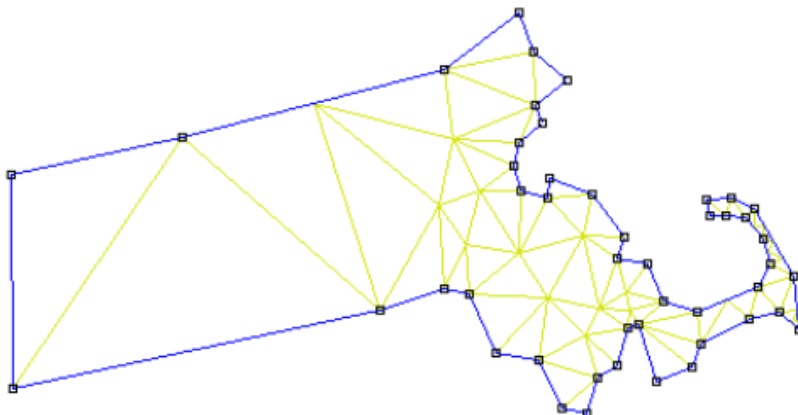


Slika 4.1. Korisničko sučelje programskog paketa FEMM.

Za proračun koristi metodu konačnih elemenata, koja je definirana u daljnjem tekstu:

*„Skup metoda numeričkoga rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi sa zadanim rubnim uvjetima u kojima se područje definicije diskretizira podjelom na mala poligonalna ili poliedarska potpodručja u čijim se vrhovima iterativno računa rješenje i njegove derivacije.“ [10]*

Ideja metode konačnih elemenata je podijeliti problem na veliki broj malih područja, svako s jednostavnom geometrijom (npr. trokute). Primjerice, Slika 4.2. prikazuje kartu Massachusettsa podijeljenu na trokute.



Slika 4.2. Podjela područja države Massachusetts jednostavnom geometrijom.[9]

Takva podjela područja problema zove se proces diskretizacije. Iako se diferencijalne jednačbe od interesa čine relativno pogodnima za izračun, obično je vrlo teško dobiti točna analitička rješenja osim za najjednostavnije geometrije. Kroz proces diskretizacije unutar programa FEMM formira se linearni algebarski problem s možda desecima tisuća nepoznanica. Međutim, postoje algoritmi koji omogućuju simultano rješavanje linearnih algebarskih problema, obično u kratkom vremenu.[9] U programski paket je implementiran programski jezik „*The Lua*“ pomoću kojeg gradi i analizira geometriju te utvrđuje rješenja problema.. Korišten je kako bi se dodale mogućnosti skriptiranja, odnosno uvoza specifično namijenjenih *Lua* skripti napisanih za automatizaciju ili olakšavanje rješavanja određenog zadatka u programu FEMM. Korisničko sučelje može pokretati *Lua* skripte kroz odabir "*Open Lua Script*" opcije u "*Files*" izborniku, ili *Lua* naredbe mogu biti unesene izravno u *Lua* konzolni prozor. *Lua* je potpuni, otvoreni skriptni jezik. Budući da su skriptne datoteke tekstualne, mogu se uređivati bilo kojim tekstualnim uređivačem (npr. *Notepad*). Prema trenutačnom izdanju, najnovija verzija *Lua* je verzija 5.0. Međutim, verzija *Lua* koja je ugrađena u FEMM je *Lua* 4.0. Osim standardnog skupa *Lua* naredbi, dodan je niz specifičnih funkcija za manipulaciju datotekama i u predprocesoru i u postprocesoru.[9]

Programski paket ovog simulacijskog alata sadrži više programa za precizan izračun podijeljenih u tri glavna dijela:

- 1.) Korisničko sučelje (*engl. Interactive shell*) *femm.exe* – pretprocesor korisničkog sučelja i postprocesor problema koji je riješio FEMM (*Slika 4.1.*)
- 2.) *triangle.exe* – program koji rastavlja područje rješenja u veliki broj trokuta (mesh) u svrhu sprovođenja metode konačnih elemenata
- 3.) Različiti programi (*engl. Solvers*) koji pomoću podatkovnih datoteka opisuju problem i rješavaju relevantne parcijalne diferencijalne jednačbe (*fkern.exe, belasolv.exe, hsolv.exe, csolv.exe*) [11]

FEMM u svojem korisničkom sučelju, preko izbornika prikazanog na slici 4.2 svoje proračune obavlja isključivo za probleme u idućim područjima:

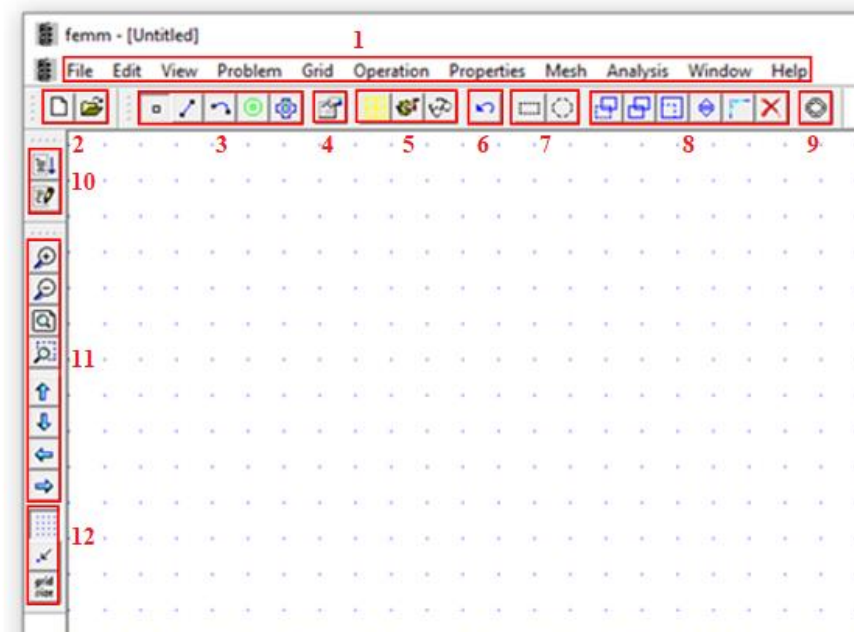
- Elektrostatska polja
- Magnetostatska polja
- Raspodjela gustoće električne struje po površini poprečnog presjeka vodiča
- Raspodjela temperature u stacionarnom stanju. [9]

Kako bi programski paket FEMM uspješno obavio simulaciju, potrebno je proći kroz sljedeće osnovne korake:

- 1. Odabir tipa problema:** Prvi korak je odabrati vrstu problema koji je potrebno simulirati.
- 2. Crtanje geometrije problema:** Nakon što je odabrana vrsta problema slijedi crtanje geometrije problema. Moguće je koristiti različite geometrijske oblike kao što su točke, crte i lukovi.
- 3. Unos numeričkih podataka za svojstva i granice materijala:** Potrebno je unijeti numeričke podatke koji se odnose na svojstva materijala i granica. To uključuje definiranje materijala, svojstava granica te svojstava točkastih izvora.
- 4. Spremanje problema:** Nakon definiranja geometrije zajedno sa njezinim svojstvima, važno je spremiti svoj rad kako biste kasnije mogli ponovno otvoriti projekt.
- 5. Pokretanje simulacije:** Kada je geometrija uspješno spremljena moguće je pokrenuti simulaciju

**6. Prikaz rezultata simulacije:** Rezultate simulacije moguće je prikazati u različitim načinima kao što su prikaz silnica polja, grafički prikaz iznosa modula polja i prikaz vektora polja. [9]

#### 4.1. Funkcionalnosti korisničkog sučelja



Slika 4.3. Funkcionalnosti korisničkog sučelja s brojevnim oznakama

Svaka od navedenih brojevnih oznaka koju prikazuje slika 4.3. predstavlja određenu funkcionalnost ili naredbu koju programski alat FEMM nudi za rješavanje i analizu problema. Istim redoslijedom su detaljnije opisane u daljnjem tekstu:

**Oznaka 1:** Sve mogućnosti koje FEMM nudi, što uključuje različite alate i funkcije za rješavanje problema u elektromagnetskom polju. [9]

**Oznaka 2:** Prečaci za stvaranje novih dokumenata ili otvaranje postojećih. Također omogućuje odabir načina crtanja te dodjeljivanje vrste materijala i izvora polja.

**Oznaka 3:** Alati za grupiranje odabranih područja u geometriji problema, što je korisno za zajedničko upravljanje s tim područjima.

**Oznaka 4:** Izbornik za promjenu svojstava označenih dijelova geometrije, što omogućuje precizno podešavanje svojstava materijala i granica.

**Oznaka 5:** Prečaci za stvaranje mreže u prostoru problema, analizu modela i pregled rezultata simulacije. To je važan korak za analiziranje i interpretaciju rezultata.

**Oznaka 6:** Naredba za poništavanje posljednje izvršene naredbe, što je korisno ukoliko je potrebno ispraviti pogrešku ili promijeniti prethodnu radnju.

**Oznaka 7:** Označavanje dijelova geometrije kružnim ili pravokutnim oblikom. Korisno je za grupiranje ili manipulaciju s više elemenata istovremeno.

**Oznaka 8:** Prečaci koji ubrzavaju proces crtanja i manipulacije geometrije, kao što su rotiranje, translacija, kopiranje, pomicanje, skaliranje, zrcaljenje, crtanje radijusa i brisanje označenih dijelova.

**Oznaka 9:** Definiranje rubnih područja, što je bitno za postavljanje granica i uvjeta za simulaciju

.

**Oznaka 10:** Prečaci za otvaranje postojećih Lua skripti i otvaranje prozora za pisanje skripti.

**Oznaka 11:** Prečaci za manipulaciju prikazom rezultata simulacije, uključujući prikaz silnica polja, grafički prikaz iznosa modula polja i prikaz vektora polja.

**Oznaka 12:** Prečaci za manipulaciju koordinatnom mrežom i njenim prikazom, što je korisno za precizno pozicioniranje elemenata u geometriji problema. [9]

## 4.2. Dodatne mogućnosti

**Lua skripte:** FEMM omogućuje korištenje Lua programskog jezika za izradu skripti. Ovo je izuzetno moćan alat za automatizaciju i prilagodbu simulacija. Moguće je napisati Lua skripte za izvođenje različitih zadataka, kao što su postavljanje modela, analiza rezultata i generiranje izvještaja.

**Python integracija:** Postoje i biblioteke i alati koji omogućuju integraciju FEMM-a s Pythonom. To omogućuje programerima da koriste Python za upravljanje FEMM-om i analizu rezultata simulacije.

**MATLAB integracija:** mogućnost korištenja programskog paketa *MATLAB* za analizu i obradu rezultata iz FEMM-a. Postoje različiti alati i skripte koji olakšavaju ovu integraciju.

**CAD alati:** FEMM podržava uvoz geometrije iz različitih CAD programa. Možete koristiti CAD alate za izradu složenih geometrija koje će FEMM koristiti za simulaciju.

**Vizualizacijski alati:** Za analizu rezultata, možete koristiti različite vizualizacijske alate i proširenja koji vam pomažu bolje razumjeti rezultate simulacije. To može uključivati alate za grafički prikaz, grafove, i sl.

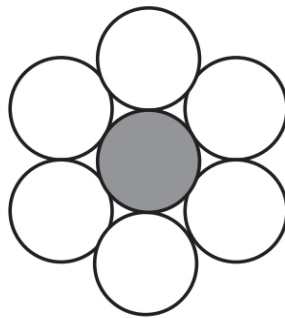
**Paralelno računanje:** FEMM ima mogućnost iskorištavanja paralelnog računanja za ubrzanje simulacija na višejezgrenim računalima ili računalnim klasterima.

**Export/import formata:** FEMM podržava različite formate za uvoz i izvoz podataka. Moguće je koristiti ove formate za integraciju s drugim programima i alatima za analizu i vizualizaciju.

**Proširenja zajednice:** Postoje proširenja razvijena od strane zajednice korisnika koja dodaju dodatne funkcionalnosti i alate FEMM-u. Ova proširenja mogu biti dostupna kao dodatni moduli ili skripte koje korisnici dijele.[9]

## 5. SIMULACIJA I ANALIZA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA NADZEMNIH VODOVA U PROGRAMSKOM PAKETU FEMM

Ovo poglavlje bavi se detaljnim prikazom korištenja programskog paketa FEMM u svrhu vizualizacije i određivanja vrijednosti električnog i magnetskog polja u prostoru oko nadzemnih vodova. Obavljene su simulacije i analize na različitim oblicima glave stupa kako bi se dokazao utjecaj rasporeda vodiča na oblike i vrijednosti električnih i magnetskih polja. Za analizu su odabrana tri neizolirana vodiča, točnije kombinirana užad Al/Če nazivnog presjeka  $50/8 \text{ mm}^2$  kojem je omjer aluminijskih i čeličnih žica 6: 1. Skica geometrije poprečnog presjeka ovakvog nadzemnog voda prikazana je slikom 5.1. U nastavku poglavlja detaljnije je objašnjeno formiranje glave stupa te crtanje takve geometrije u programu FEMM.



*Slika 5.1. Skica geometrije presjeka Al/Če vodiča.[6]*

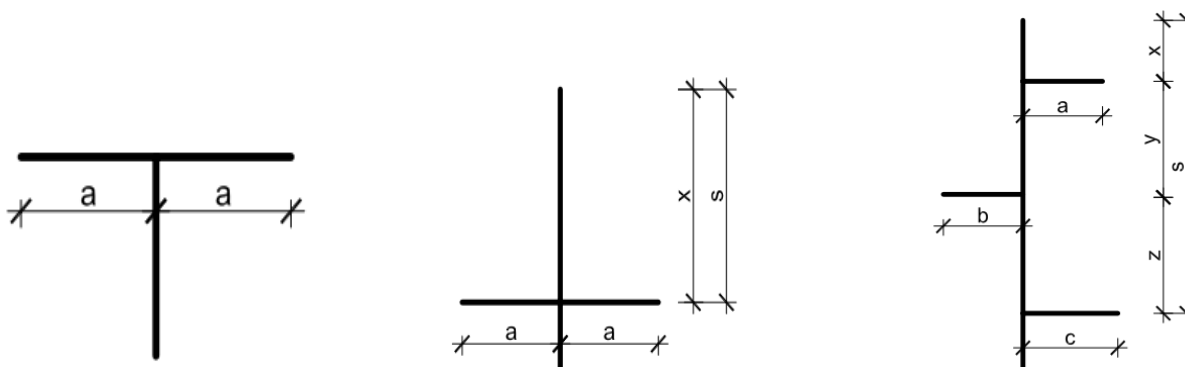
Navedeni vodič je u programskim simulacijama prikazan na tri različita oblika glave stupa:

- Gama
- Delta
- Jela

Kako bi smo primjereno formirali navedene glave stupa za ovaj problemski zadatak, korištene su upute za formiranje glave stupa od strane tvrtke Dalekovod prikazane Tablicom 5.1. Primjeri glava stupa s oznakama za definiranje geometrije prikazan je slikom 5.2.

Tablica 5.1.. Upute za formiranje glave stupa

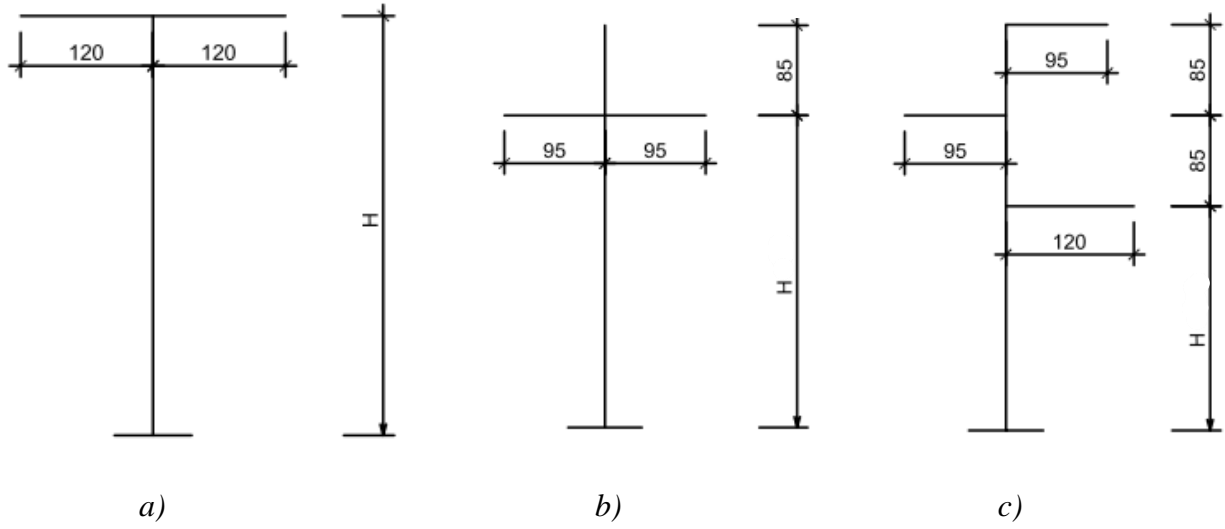
DULJINA KONZOLE	$a, b, c = 0.95, 1.20, 1.45, 1.60, 1.80 \text{ m}$
RAZMACI KONZOLA	$x, y, z = n \times 0.85 \text{ m}$
VISINA GLAVE	$S = x + y + z$
KORISNA VISINA STUPA	$h = H - S$
BEZ ZAŠTITNOG UŽETA	$x = 0$
SA ZAŠTITNIM UŽETOM	$x = n \times 0.85 \text{ m}$



Slika 5.2. Primjer geometrije glava stupa s navedenim oznakama.

Iz tablice je još potrebno definirati oznaku  $n$ , koja predstavlja ukupni broj konzola na glavi stupa, kao i oznaku  $H$  koja predstavlja ukupnu visinu stupa. Ukupna visina stupa  $H$  nije definirana u uputama za formiranje glave stupa. Za primjer ovog diplomskog rada, sve simulacije su izvedene za provjes najnižeg vodiča na visini  $h = 7\text{m}$ . Korištenjem prethodno navedenih uputa, za ovaj diplomski rad formirane su glave stupa čija je geometrija u centimetrima prikazana slikom 5.3.





Slika 5.3. Skica geometrije a) „Gama“, b) „Delta“ i c) „Jela“ oblika glave stupa.

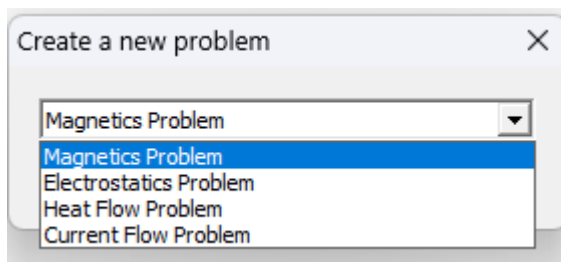
Potrebno je napomenuti kako geometriju stupa i konzoli nije potrebno crtati u programu FEMM, ona je potrebna samo kako bi se odredili razmaci između vodiča, stoga je u programu nacrtana samo geometrija nadzemnih vodova koja odgovara rasporedu konzola prethodno navedenih glava stupa. Prema pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja, definirane su granične vrijednosti za profesionalnu izloženost električnim i magnetskim poljima, a prikazuje ih tablica 5.2. Rezultati narednih simulacija su uspoređeni s graničnim vrijednostima u poglavlju 5.8.

Tablica 5.2. Granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage ekvivalentnog ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju za područja profesionalne izloženosti[14]

Frekvencija $f$	Jakost električnog polja $E$ (V/m)	Jakost magnetskog polja $H$ (A/m)	Gustoća magnetskog toka $B$ ( $\mu$ T)	Gustoća snage (ekvivalentnog ravnog vala) $S_{\text{ekv}}$ (W/m <sup>2</sup> )	Vrijeme uprosječne-nja $t$ (minute)
< 1 Hz	14 000	32 000	40 000		*
1–8 Hz	10 000	$32\,000/f^2$	$40\,000/f^2$		*
8–25 Hz	10 000	$4000/f$	$5000/f$		*
0,025–0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$		*
0,8–3 kHz	$250/f$	5	6,25		*
3–100 kHz	87	5	6,25		*
100–150 kHz	87	5	6,25		6
0,15–1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$		6
1–10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$		6
10–400 MHz	28	0,073	0,092	2	6
400–2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$	6
2–10 GHz	61	0,16	0,20	10	6
10–300 GHz	61	0,16	0,20	10	$68/f^{1.05}$

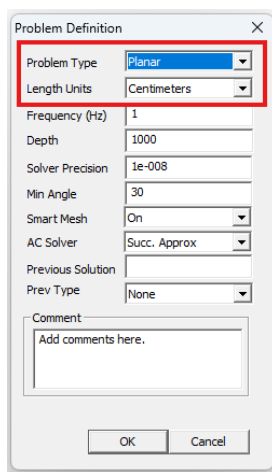
## 5.1. Crtanje geometrije nadzemnog voda i definiranje parametara simulacije

Klikom na naredbu „File“, zatim „New“, program otvara prozor pod imenom „Create new problem“ koji prikazuje izbornik mogućnosti rješavanja problema prikazan slikom 5.4.



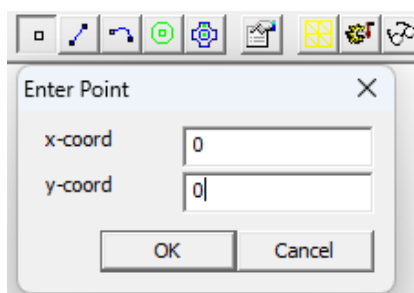
Slika 5.4. Izbornik načina rješavanja problema u programu FEMM

Za crtanje geometrije trenutno nije potrebno definirati način rješavanja problema jer klikom na bilo koju opciju u izborniku prikazuje se koordinatna mreža za crtanje geometrije. Idući korak je definirati problem. Klikom na naredbu „Problem“ otvara se izbornik prikazan na slici 5.5. u kojem se definiraju parametri za crtanje i simulaciju (frekvencija, mjerna jedinica, dubina...)



Slika 5.5. Izbornik naredbe „Problem“ za definiranje osnovnih parametara crtanja problema

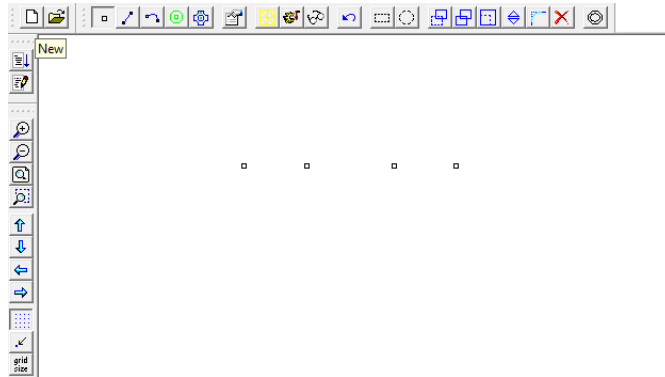
Za potrebe crtanja relevantne su dvije opcije crveno uokvirene na slici 5.5. Odabran je planarni tip problema, a za mjernu jedinicu odabrani su metri. Idući korak potreban za crtanje geometrije je definirati koordinate čvorova geometrije. Oni predstavljaju mjesta spajanja crta i lukova, a definiraju se tako da klikom na ikonu čvora pod imenom „Operate on nodes“ (prelaskom miša preko ikone u donjem desnom kutu korisničkog sučelja prikazuju se imena, odnosno funkcije ikona), zatim pritiskom tipke „Tab“, program otvara prozor za definiranje koordinata čvorova za spajanje. Slika 5.6. prikazuje odabir čvora s koordinatama (0,0) koji je predstavljen kao referentni čvor jer simulacija će biti crtana osnosimetrično s obzirom na y-os, dok će x-os predstavljati razinu tla radi lakšeg unosa podataka i analize rezultata.



Slika 5.6. Prozor za unos koordinata čvorova geometrije

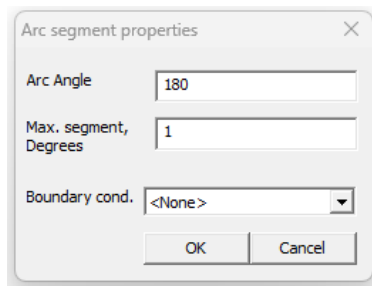
Za nastavak je potrebno odrediti raspored vodiča kako bi se ucrtali ostali čvorovi. Kao najkompleksniji od primjera predstavljenih slikom 5.3., odabran je prikaz crtanja nadzemnih vodova s obzirom na oblik glave stupa Jela. Crtanje ostala dva rasporeda vodiča u ovom poglavlju nije opisano, ali je obavljeno po istom uzoru. Geometrija prethodno odabranog vodiča je prilikom crtanja predstavljena kao dvije koncentrične kružnice presjeka  $8\text{ mm}^2$  i  $50\text{ mm}^2$  od kojih manja kružnica predstavlja čelični dio, a veća kružnica aluminijski dio nadzemnog voda. Međutim, crtanje krugova u FEMM-u ne polazi od središta kružnice, nego od definiranja promjera kruga i crtanja lukova iznad, odnosno ispod promjera kruga. Dakle, potrebno je odrediti koordinate početne i krajnje točke promjera svake od kružnica. Prema slici 5.3. potrebno je uočiti da vodič najbliži tlu, s obzirom na zadane duljine, ima koordinate središta (120,730). Korištenjem elementarne matematike (oduzimanjem, odnosno zbrajanjem polumjera kružnice i x-koordinate središta kružnice), dobivene su koordinate početne i krajnje točke promjera kružnica koje za kružnicu presjeka  $8\text{ mm}^2$  imaju vrijednosti (119.84,730) i

(120.16, 730), dok za kružnicu presjeka  $50 \text{ mm}^2$  poprimaju vrijednosti (119.61, 730) i (120.39, 730). Slika 5.7. prikazuje ucrtane čvorove za povezivanje geometrije vodiča.

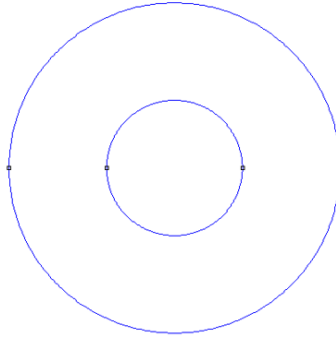


*Slika 5.7. Čvorovi geometrije nadzemnog voda*

Čvorove manje kružnice povezujemo lukovima klikom na ikonu pod imenom „*Operate on arc segments*“, zatim klikom na dva čvora koja je potrebno povezati. Ako su klikovi obavljani redosljedom lijevi čvor-desni čvor, program će otvoriti prozor na slici 5.8. u koji je potrebno napisati mjeru kuta kružnog luka. Nakon definiranog kuta od  $180^\circ$ , program ucrtava luk ispod promjera kružnice. Kada je redosljed obrnut (desni čvor-lijevi čvor) program ucrtava luk iznad promjera kružnice. Istim postupkom povezuju se i čvorovi veće kružnice te nastaje geometrija nadzemnog voda prikazana slikom 5.9.

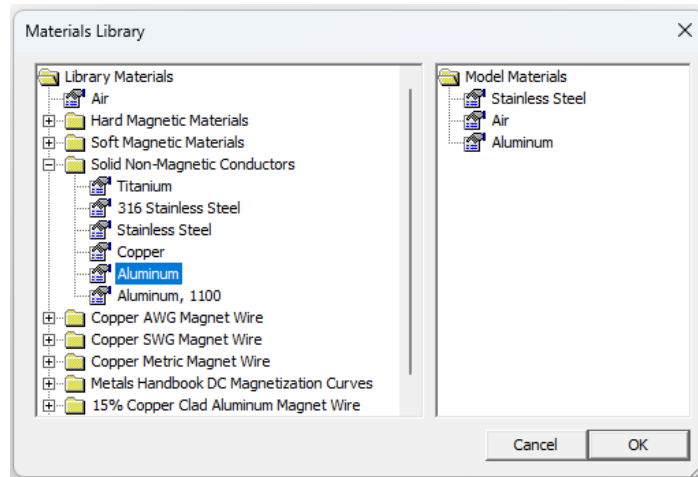


*Slika 5.8. Prozor za unos parametara luka*



*Slika 5.9. Prikaz geometrije nadzemnog voda.*

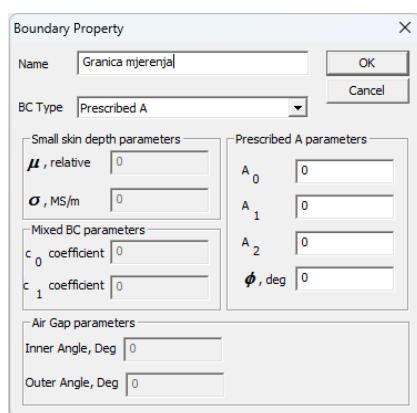
Koordinate promjera kružnica ostalih nadzemnih vodova računaju se i ucrtavaju po istom uzoru. Kada su ucrtane geometrije svih nadzemnih vodova, potrebno je definirati materijale od kojih se nadzemni vodovi sastoje. Klikom na naredbu „*Properties*“ otvara se izbornik u kojem odabiremo opciju „*Materials library*“ koja otvara novi prozor za odabir materijala prikazan na (Sl. 5.10.)



*Slika 5.10. Prozor za odabir materijala*

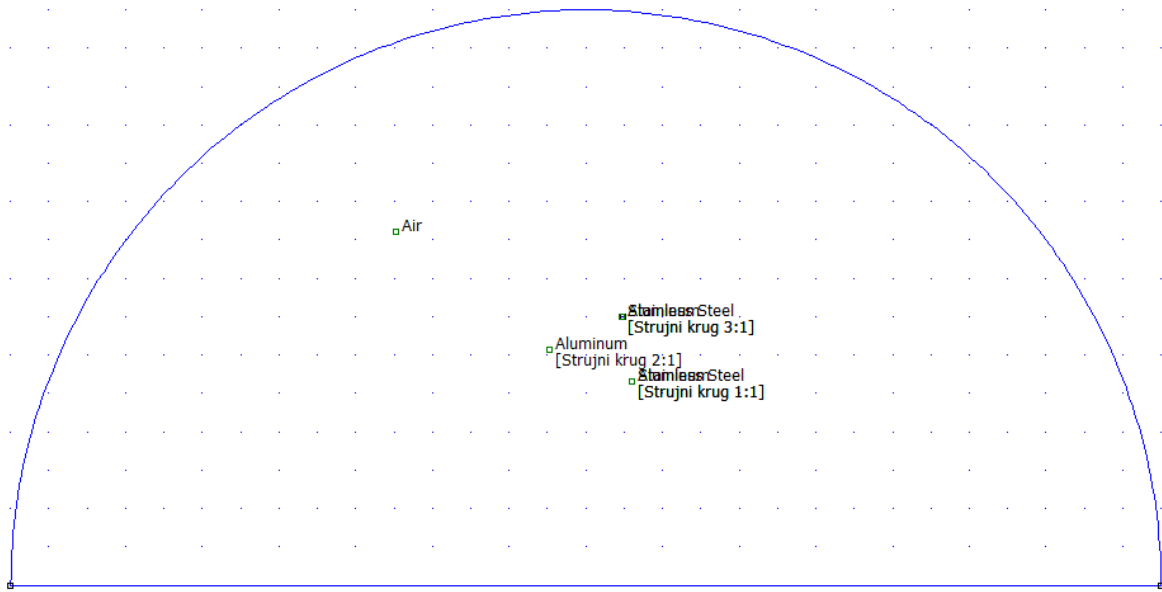
Materijali potrebni za simulaciju odabiru se iz FEMM-ovih zadanih datoteka na način da ih klikom i povlačenjem miša premjestimo iz mape „*Library Materials*“ u mapu „*Model Materials*“. Ukoliko potreban element nije naveden u zadanim datotekama, može se dodati u bilo koju mapu desnim klikom

na mapu, zatim klikom na opciju „Add new material“ koja otvara novi prozor u kojem je potrebno definirati ime i relativnu permeabilnost materijala. Materijali potrebni za simulacije u ovom diplomskom radu su aluminij, čelik i zrak te su dodani u mapu „Model Materials“. Nakon definiranja materijala potrebno je definirati i granice mjerenja simulacije. Granice se dodjeljuju klikom na naredbu „Properties“, zatim klikom na opciju „Boundary“. Otvara se prozor pod imenom „Property Definition“ u kojem je potrebno kliknuti na naredbu „Add property“. Navedena naredba otvara novi prozor (Sl. 5.11.) za definiranje granica u kojem je promijenjeno ime granice u „Granica mjerenja“, ostale postavke potrebno je ostaviti kako su početno zadane za ispravan rad.



Slika 5.11. Prozor za definiranje granice mjerenja

Granice crtamo istim postupkom kao i kružnice koje predstavljaju presjek nadzemnog voda, na način da se mjerenje obavlja u polumjeru iznosa 15m s obzirom na referentnu točku. Kada je nacrtan luk koji predstavlja granicu, potrebno mu je dodijeliti svojstva granice klikom na luk, zatim pritiskom tipke „Space“ koja otvara prozor u kojem je potrebno kliknuti na izbornik „Boundari cond.“ i odabrati opciju „Granica mjerenja“. Isti postupak potrebno je ponoviti i za razinu tla koje je predstavljena kao promjer polukruga. U konačnici, predstavljen je kompletan model geometrije nadzemnih vodova raspoređenih prema prethodno zadanom obliku glave stupa „Jela“ (Sl.5.12). Prije pokretanja simulacije, potrebno je još samo spremiti nacrtanu geometriju i upisane parametre. Klikom na naredbu „File“, zatim na opciju „Save as“ problem je spremljen pod imenom „geometrijajela.fem“. Kako bi naredne simulacije prikazale što realističniji rezultat, zadane su prethodno izračunate trenutačne vrijednosti struja i napona u trenutku  $t = 3s$ , a prikazane su tablicom 5.3.



*Slika 5.12. Geometrija nadzemnih vodova glave stupa „Jela“ sa prikazanim granicama rješavanja problema*



Tablica 5.3. Maksimalne, efektivne i trenutačne vrijednosti struja i napona vodiča po fazama.

OBLIK GLAVE STUPA DALEKOVODA	MAKSIMALNA I EFEKTIVNA VRIJEDNOST STRUJE	MAKSIMALNA I EFEKTIVNA VRIJEDNOST NAPONA	STRUJE PO FAZAMA U TRENUTKU $t$	NAPONI PO FAZAMA U TRENUTKU $t$
Gama	$I_m = 100A$ $I = 70.71 A$	$U_m = 28,28 kV$ $U = 20kV$	$i_1 = -66.91 A$ $i_2 = -30.9 A$ $i_3 = 97,81 A$	$u_1 = -18,92 kV$ $u_2 = -8,74 kV$ $u_3 = 27,66 kV$
Delta		$U_m = 49,50 kV$ $U = 35kV$		$u_1 = -33,12 kV$ $u_2 = -15,30 kV$ $u_3 = 48,41 kV$
Jela		$U_m = 155,56 kV$ $U = 110kV$		$u_1 = -104,09 kV$ $u_2 = -48,07 kV$ $u_3 = 152,16 kV$

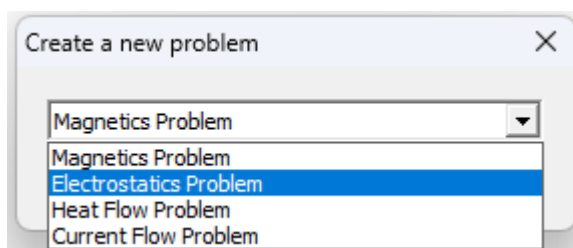
Za provjeru fizikalnosti rezultata dobivenih u simulacijama u nastavku, obavljen je analitički izračun jakosti električnog polja, gustoće električnog toka, gustoće magnetskog toka i jakosti magnetskog polja na površini vodiča za iznose napona (za električno polje) i struja (za magnetsko polje) na površini vodiča (Tablica 5.4).

Tablica 5.4. Izračun jakosti električnog polja, gustoće električnog toka, jakosti magnetskog polja i gustoće magnetskog toka na površini vodiča

OBLIK GLAVE STUPA	FAZE	ELEKTRIČNO POLJE				MAGNETSKO POLJE		
		Naboj $Q$ [C]	Duljina vodiča $l$ [m]	Jakost el. polja $E$ [V/m]	Gustoća el. toka $D$ (C/m <sup>2</sup> )	Struja $i$ [A]	Jakost mag. polja H [A/m]	Gustoća mag. toka B [T]
Jela	$F_1$	$9,96 \cdot 10^{-4}$	1000	$8,14 \cdot 10^6$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	66,91	$4,84 \cdot 10^3$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
	$F_2$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	1000	$3,68 \cdot 10^6$	$3,26 \cdot 10^{-5}$	30,9	$2,24 \cdot 10^3$	$2,81 \cdot 10^{-3}$
	$F_3$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	1000	$1,14 \cdot 10^7$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	97,81	$7,08 \cdot 10^3$	$8,89 \cdot 10^{-3}$
Gama	$F_1$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	1000	$1,32 \cdot 10^6$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	66,91	$4,84 \cdot 10^3$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
	$F_2$	$8,99 \cdot 10^{-5}$	1000	$7,35 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	30,9	$2,24 \cdot 10^3$	$2,81 \cdot 10^{-3}$
	$F_3$	$2,57 \cdot 10^{-4}$	1000	$2,1 \cdot 10^6$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	97,81	$7,08 \cdot 10^3$	$8,89 \cdot 10^{-3}$
Delta	$F_1$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	1000	$1,5 \cdot 10^7$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	66,91	$4,84 \cdot 10^3$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
	$F_2$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	1000	$1,52 \cdot 10^6$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	30,9	$2,24 \cdot 10^3$	$2,81 \cdot 10^{-3}$
	$F_3$	$4,42 \cdot 10^{-4}$	1000	$3,61 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	97,81	$7,08 \cdot 10^3$	$8,89 \cdot 10^{-3}$

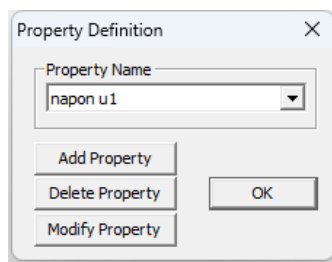
## 5.2. Simulacija električnog polja 110kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

Klikom na ikonu „*Create new document*“, ili klikom na naredbu „*File*“, zatim „*New*“, korisničko sučelje otvara prozor pod imenom „*Create a new problem*“ (Sl. 5.13.) u kojem su prikazane sve njegove mogućnosti rješavanja problema. S obzirom da se ovo poglavlje bavi elektrostatskom analizom nadzemnog dalekovoda, odabrana je opcija „*Electrostatics*“ koja otvara novu datoteku s prostorom za crtanje geometrije.



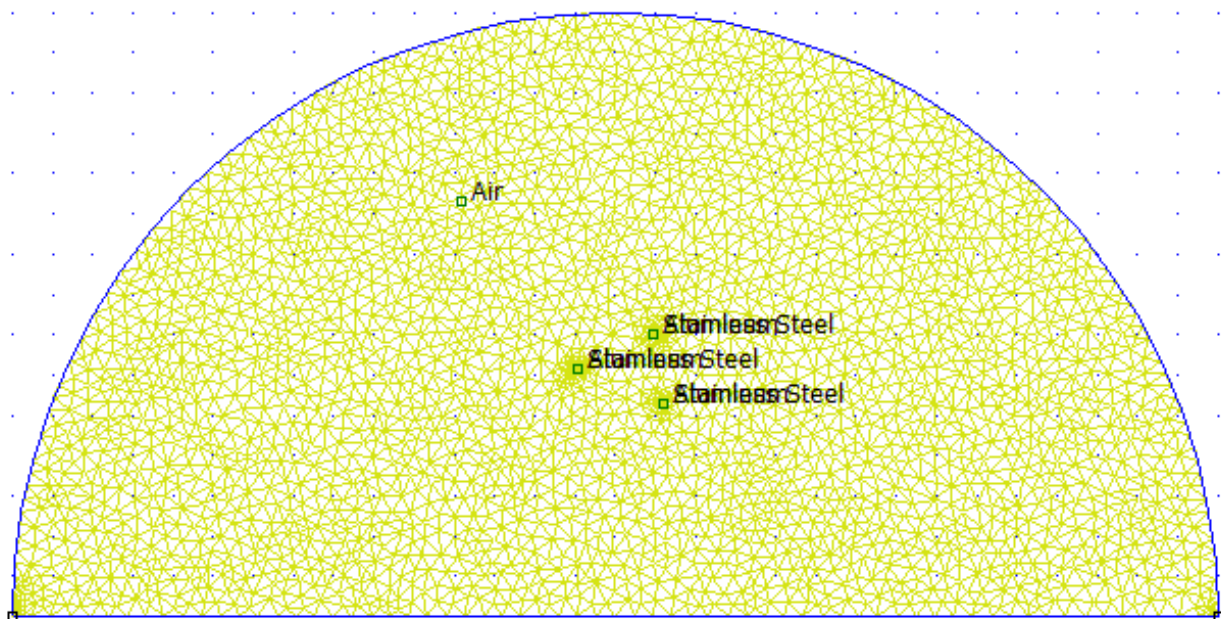
Slika 5.13. Izbornik s mogućnostima rješavanja problema i odabranom opcijom „*Electrostatics*“

Pošto je geometrija već prethodno nacrtana, potrebno ju je implementirati u program na način da kliknemo na ikonu pod imenom „*Open an existing document*“ koja otvara prozor za odabir datoteka. Za ovu simulaciju, odabiremo prethodno modeliranu datoteku spremljenu pod imenom „*geometriyajela.fee*“. Nakon implementiranja geometrije problema, potrebno je obrisati upisane struje iz geometrije i upisati vrijednosti napona u trenutku  $t$  za svaki vodič. Vrijednosti napona se upisuju klikom na naredbu „*Properties*“, zatim klikom na opciju „*Conductors*“ program otvara prozor (Sl. 5.14.) unutar kojeg se definiraju vrijednosti napona po vodičima. Klikom na naredbu „*Add Property*“ upisane su vrijednosti napona prethodno definirane tablicom 5.3. Naponi su dodani geometriji vodiča desnim klikom na vanjski luk vodiča, zatim tipkom „*Space*“ koja otvara prozor u kojem je potrebno odabrati napon u opciji „*In Conductor*“.

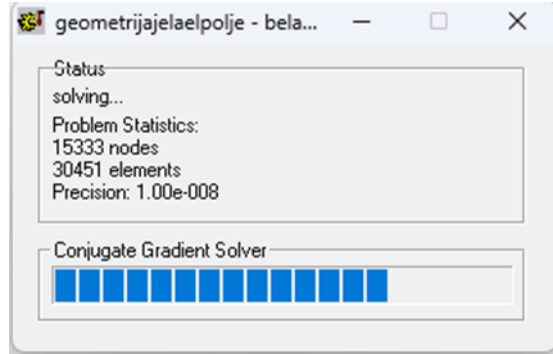


*Slika 5.14. Prozor za definiranje vrijednosti napona vodiča*

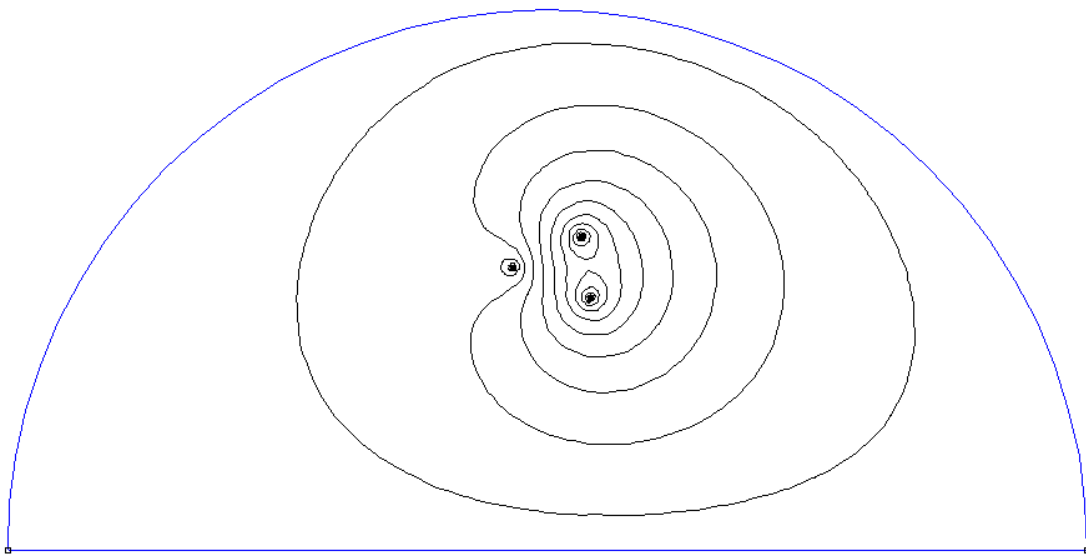
Elektrostatsku analizu vršimo na način na prvo kliknemo na ikonu „*Run mesh generator*“ koja vrši podjelu područja mjerenja na manje jednostavne geometrijske oblike u svrhu primjene metode konačnih elemenata za izračun vrijednosti električnog polja. (Sl. 5.15.) Zatim klikom na ikonu „*Run analysis*“ program pokreće proračun (Sl. 5.16.). Nakon što se učitaju svi podaci, klikom na ikonu „*View results*“ program pokreće simulaciju i prvo prikazuje ekvipotencijalne plohe superponirane na sliku električnog polja u prostoru oko nadzemnih vodova (Sl. 5.17.)



*Slika 5.15. Prikaz geometrije problema i podjele područja mjerenja jednostavnom geometrijom (proces diskretizacije)*

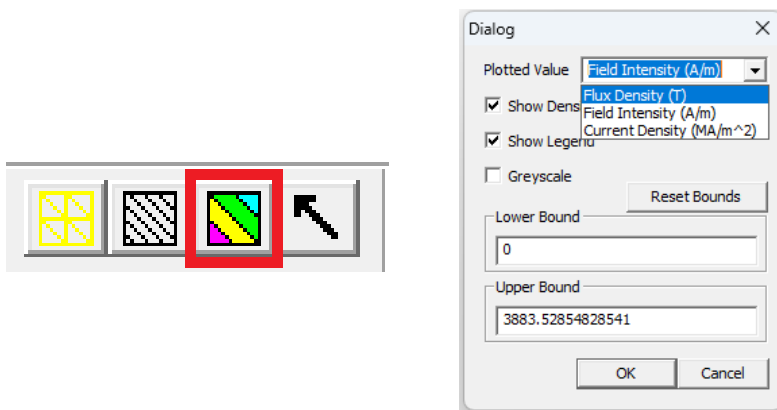


*Slika 5.16. Prozor koji prikazuje pokretanje proračuna programa za pokretanje simulacije*



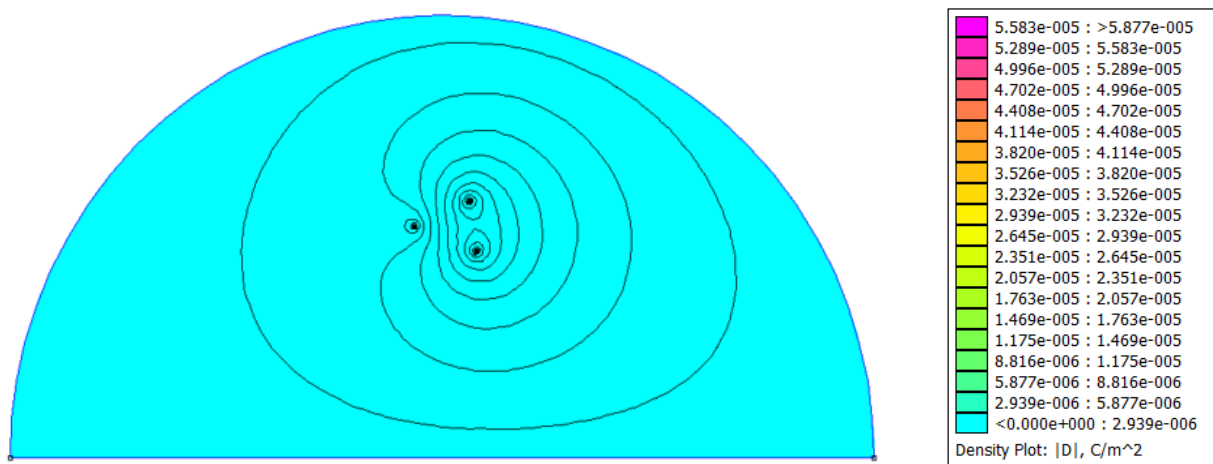
*Slika 5.17. Ekvipotencijalne linije nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela*

Unutar simulacije, klikom na crveno uokvirenu ikonu program otvara prozor koji prikazuje mogućnosti prikazivanja rezultata. (Sl. 5.18.)

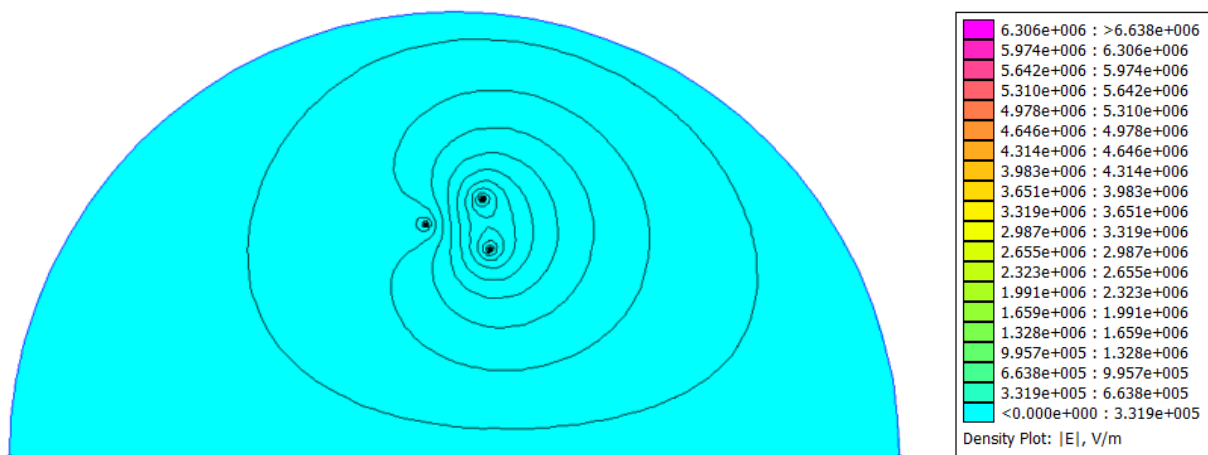


Slika 5.18. Prozor s mogućnostima prikaza rezultata simulacije

Odabrane su opcije „*Flux Density (D)*“ za prikaz gustoće električnog toka (Sl. 5.19) i „*Field Intensity (E)*“ za prikaz jakosti električnog polja (Sl. 5.20.).

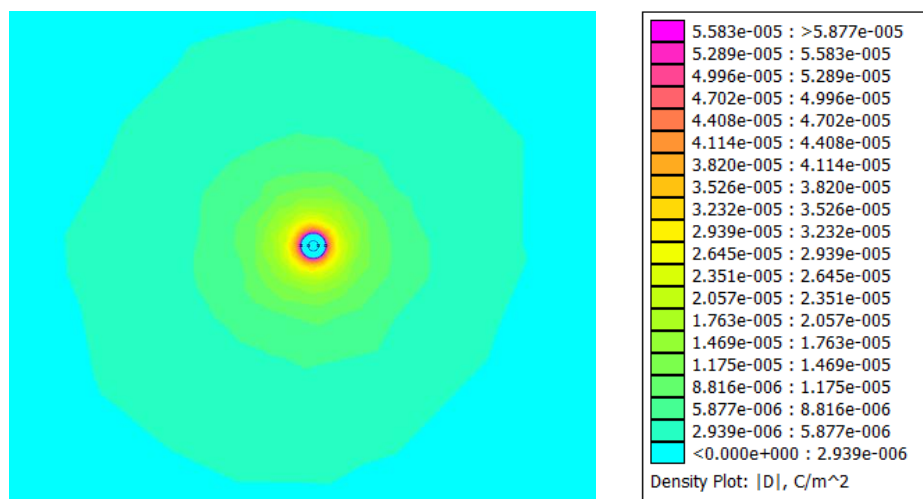


Slika 5.19. Prikaz gustoće električnog toka i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

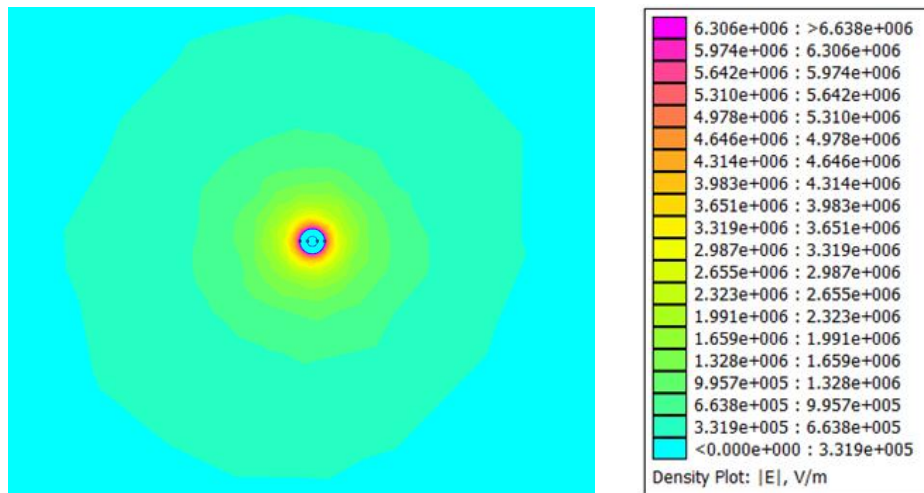


Slika 5.20. Prikaz jakosti električnog polja i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću električnog toka (Sl. 5.21.) i jakost električnog polja (Sl. 5.22.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 152,16$  kV.



Slika 5.21. Prikaz gustoće električnog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Jela u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 152,16$  kV



Slika 5.22. Prikaz jakosti električnog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Jela u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 152,16 \text{ kV}$

U nastavku je prikazan analitički izračun navedenih veličina na udaljenosti  $r$  koja predstavlja polumjer vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3$ . Jakost električnog polja na površini vodiča računa se izrazom:

$$E = 2k \frac{\lambda}{r} \quad (5-1)$$

gdje je:

$k$  – konstanta proporcionalnosti približnog iznosa  $9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$

$r$  – polumjer vodiča iznosa  $3,9894 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$\lambda$  – linijska gustoća naboja [ $\text{C}/\text{m}$ ]

Linijska gustoća naboja računa se izrazom:

$$\lambda = \frac{Q}{l} \quad (5-2)$$

gdje je:

$Q$  – naboj [ $\text{C}$ ]

$l$  – duljina vodiča [ $\text{m}$ ]



Gustoća električnog toka računa se izrazom:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (5-3)$$

gdje je:

$\varepsilon$  – dielektrična permitivnost [ $F/m$ ]

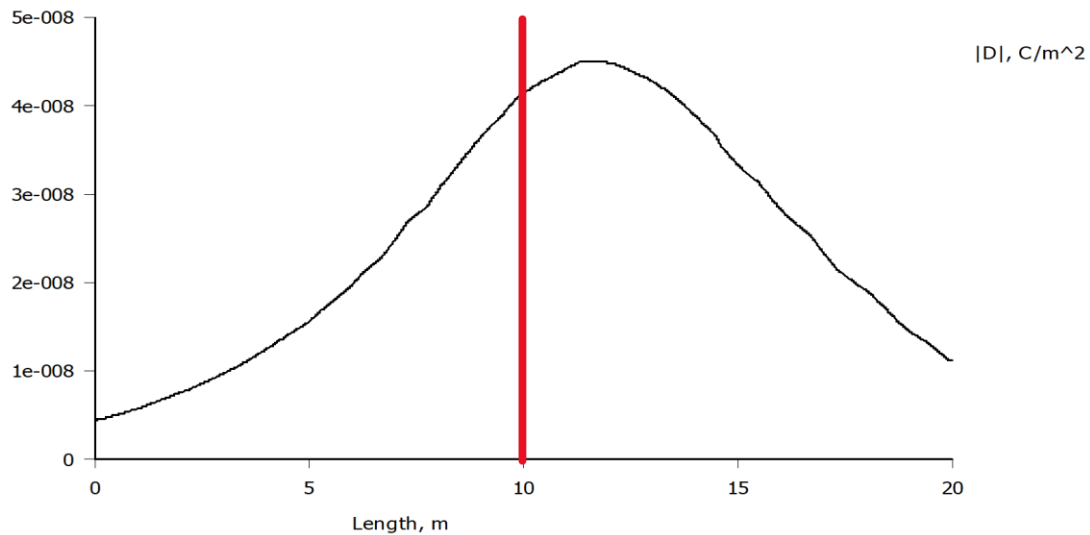
$E$  – jakost električnog polja [ $V/m$ ]

Po uzoru na opisane formule izračunate su sljedeće vrijednosti na površini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3$ :

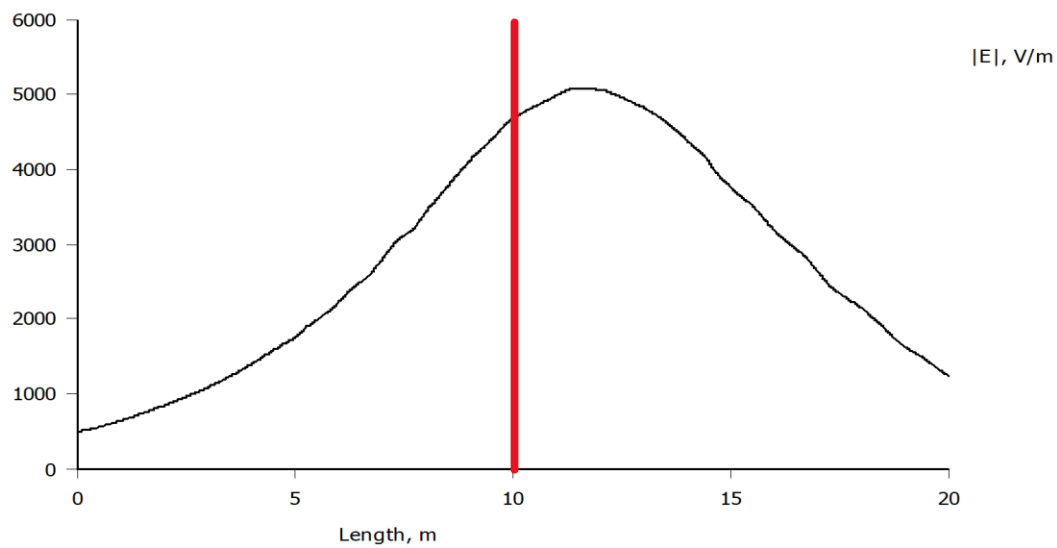
$$D = 5,723 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$$

$$E = 6,466 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

Za posljednji rezultat ove simulacije potrebno je odrediti jakost i gustoću električnog polja na visini 1,5 metara, u rasponu udaljenosti 10m od stupa nadzemnog voda. Unutar simulacije, klikom na ikonu na kojoj su nacrtana dva čvora povezana crvenom linijom, potrebno je nacrtati liniju s početnom točkom  $(-10, 1.5)$  i krajnjom točkom  $(10, 1.5)$  te kliknuti na ikonu grafa. U nastavku su redom prikazani grafovi gustoće električnog toka (Sl. 5.23.) i jakosti električnog polja (Sl. 5.24.)



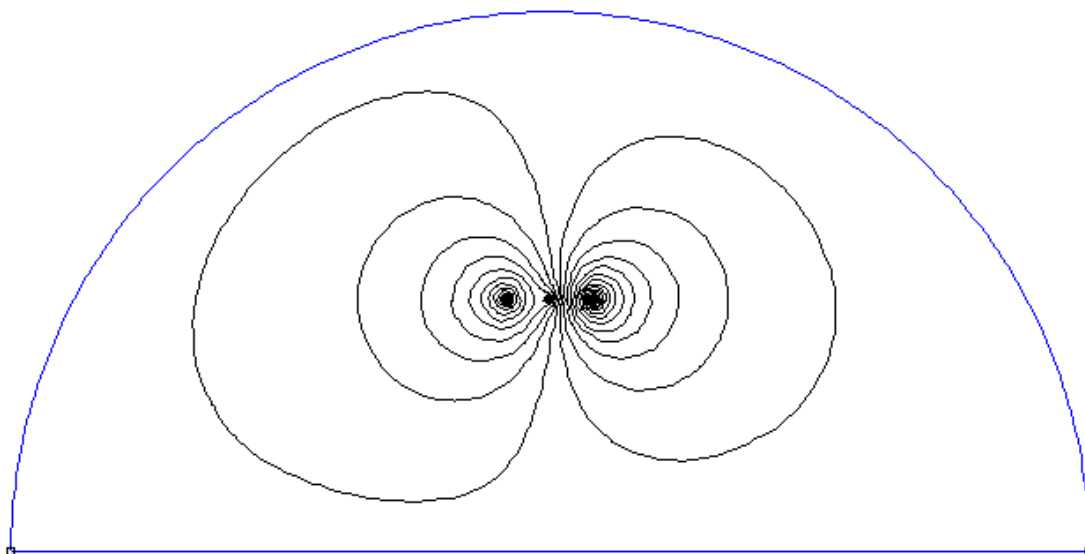
Slika 5.23. Grafički prikaz gustoće električnog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela na visini 1,5m iznad tla



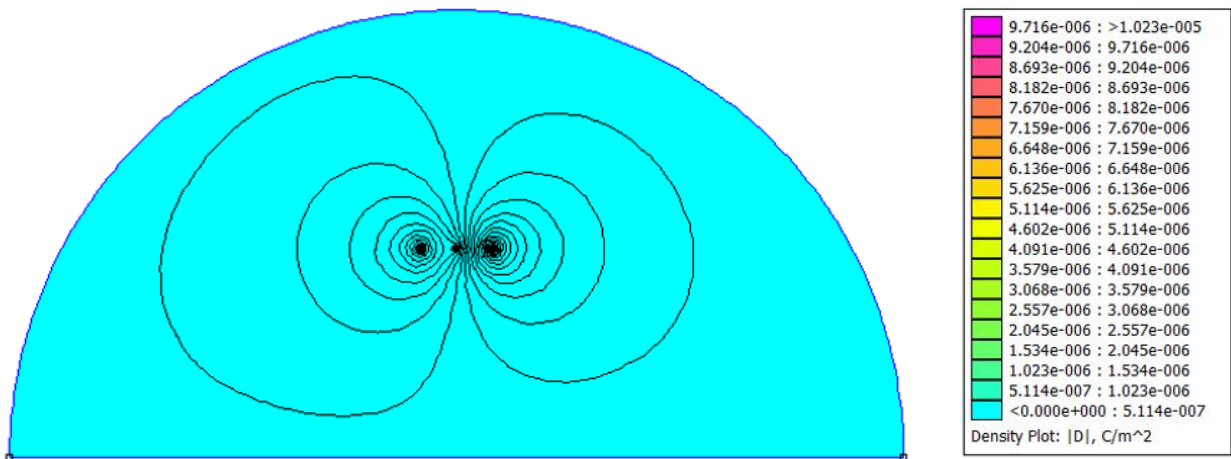
Slika 5.24. Grafički prikaz jakosti električnog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela na visini 1,5m iznad tla

### 5.3. Simulacija električnog polja 35kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama

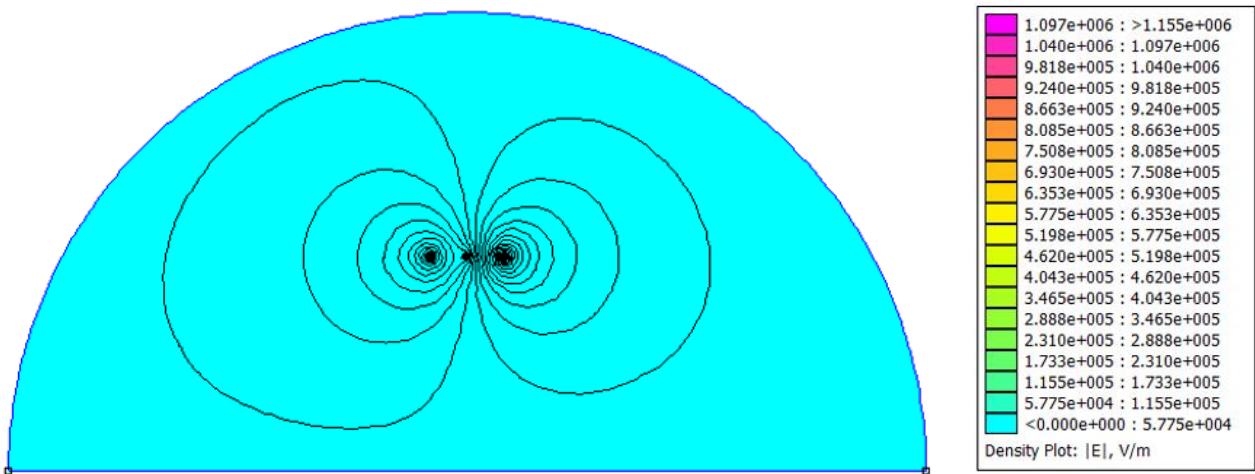
Za navedenu simulaciju potrebno je uvesti odgovarajuću geometriju problema. Odabrana je geometrija nadzemnog voda raspoređenog po obliku glave stupa *Gama* i na njoj je izvršena podjela područja jednostavnom geometrijom. Navedena geometrija nacrtana je postupkom iz poglavlja 5.1., a parametri za simulaciju upisani su iz tablice 5.3. Postupak prikaza rezultata ove simulacije je identičan postupku u poglavlju 5.2. Slika 5.25. prikazuje ekvipotencijalne plohe superponirane na sliku električnog polja ovakve geometrije, Slika 5.26. prikazuje gustoću magnetskog toka, dok slika 5.27. prikazuje jakost električnog polja. Grafički prikaz gustoće električnog polja na visini 1,5 m i rasponu 10m od stupa nadzemnog voda prikazan je slikom 5.30., a grafički prikaz jakosti električnog polja prikazan je slikom 5.31.



*Slika 5.25. Ekvipotencijalne linije nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama*

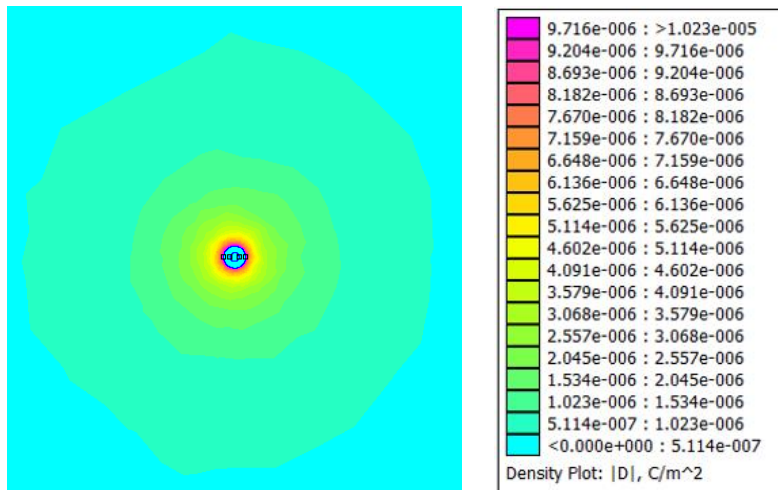


Slika 5.26. Prikaz gustoće električnog toka i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama

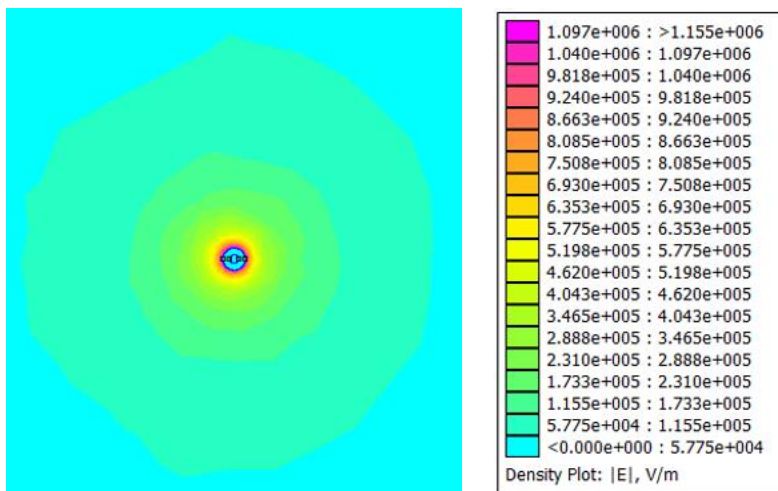


Slika 5.27. Prikaz jakosti električnog polja i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama

Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću električnog toka (Sl. 5.28.) i jakost električnog polja (Sl. 5.29.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 27,66 \text{ kV}$ .



Slika 5.28. Prikaz gustoće električnog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Gama u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 27,66 \text{ kV}$



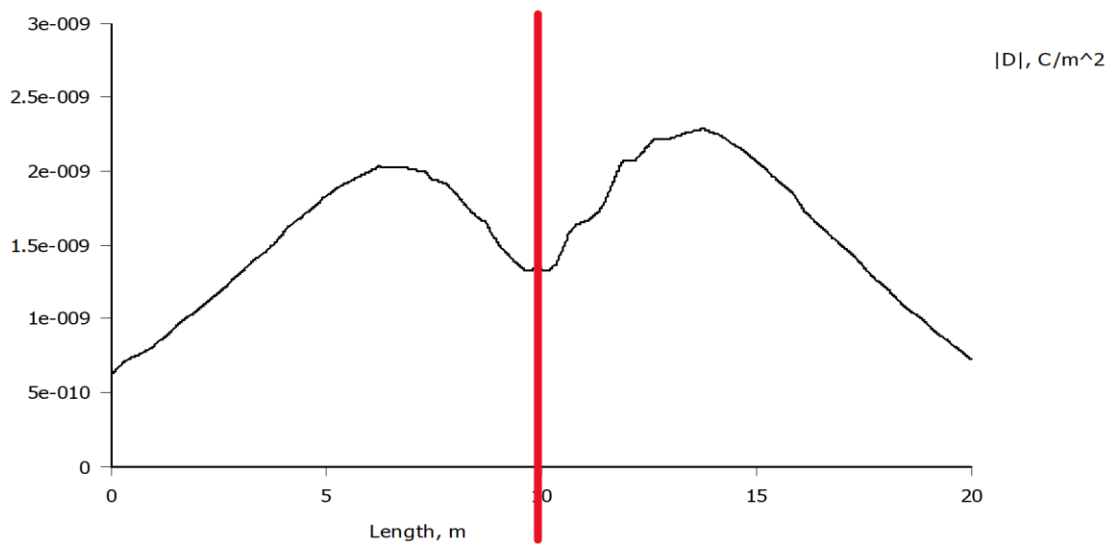
Slika 5.29. Prikaz jakosti električnog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Gama u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 27,66 \text{ kV}$

U nastavku je prikazan analitički izračun navedenih veličina na udaljenosti  $r$ , obavljen po uzoru na izraze (5-1), (5-2) i (5-3):

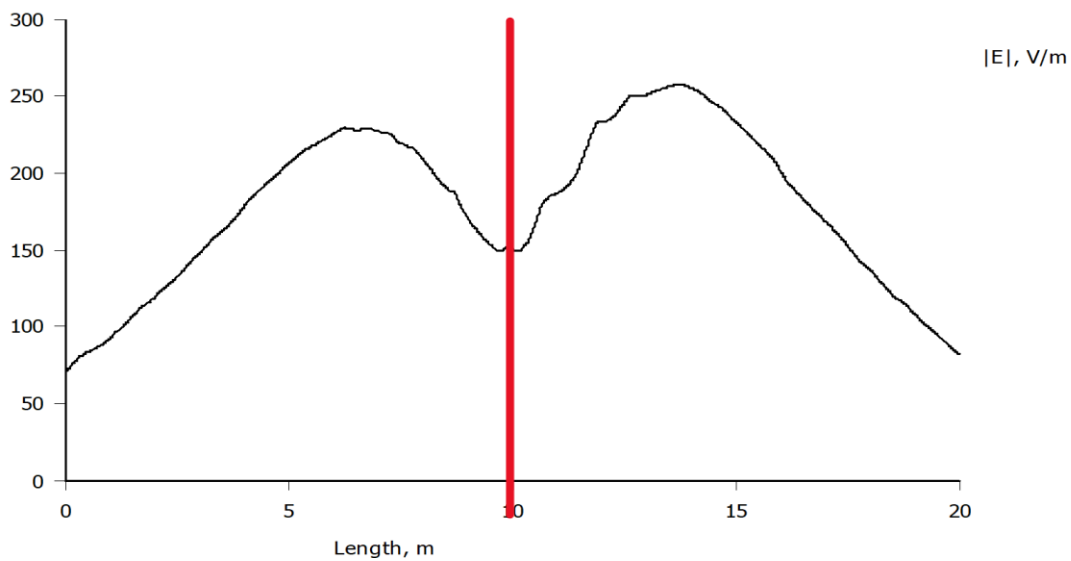
$$D = 1,024 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$$

$$E = 1,157 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

Grafički prikaz gustoće električnog polja na visini 1,5 m i rasponu 10 m od stupa nadzemnog voda prikazan je slikom 5.30., a grafički prikaz jakosti električnog polja prikazan je slikom 5.31.



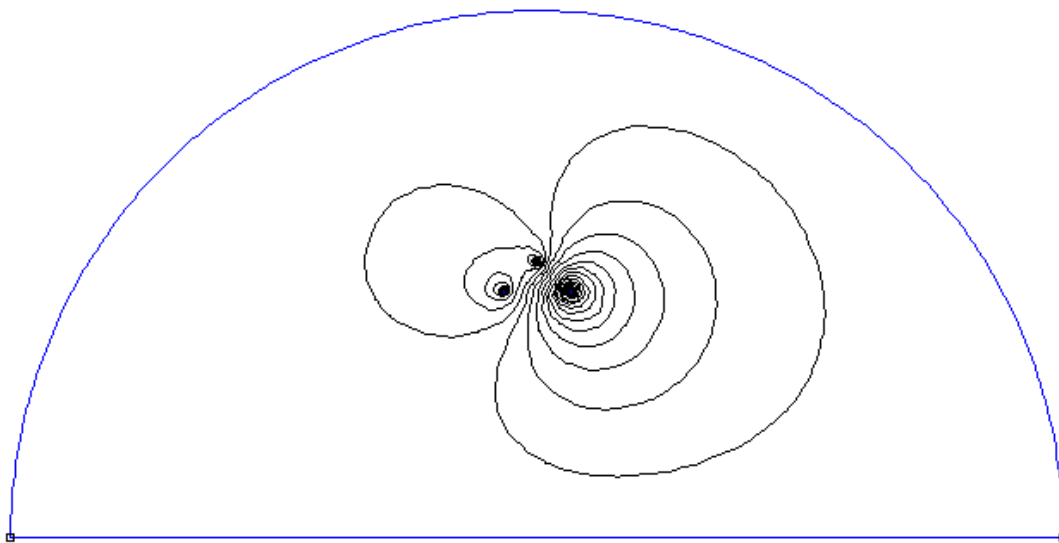
*Slika 5.30. Grafički prikaz gustoće električnog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama na visini 1,5m iznad tla*



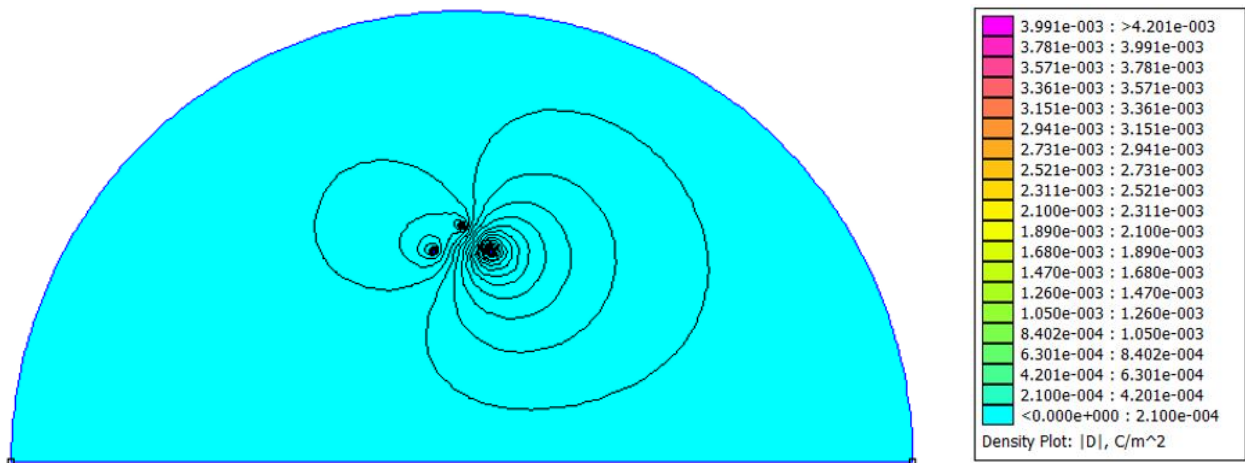
*Slika 5.31. Grafički prikaz jakosti električnog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama na visini 1,5m iznad tla*

#### 5.4. Simulacija električnog polja 20kV nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta

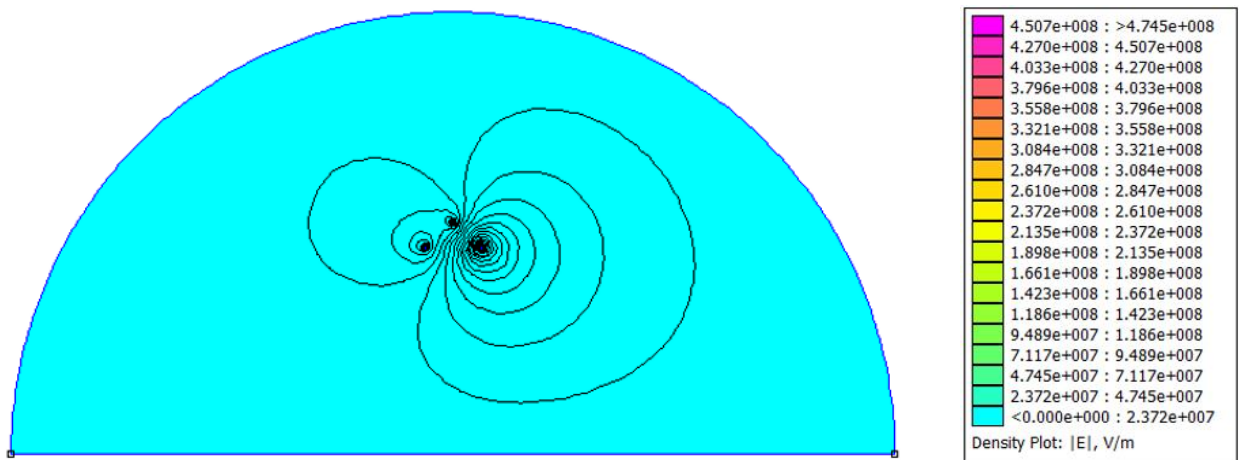
Za navedenu simulaciju ponovno je potrebno uvesti odgovarajuću geometriju problema. Odabrana je geometrija nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa *Delta* i na njoj je izvršena podjela područja jednostavnom geometrijom. Navedena geometrija također je nacrtana postupkom iz poglavlja 5.1., a parametri za simulaciju upisani su iz tablice 5.3. Postupak prikaza rezultata ove simulacije također je identičan postupku u poglavlju 5.2. Slika 5.32. prikazuje ekvipotencijalne plohe superponirane na sliku električnog polja ovakve geometrije, Slika 5.33. prikazuje gustoću magnetskog toka, dok slika 5.34. prikazuje jakost električnog polja.



*Slika 5.32. Ekvipotencijalne Ekvipotencijalne linije nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta*



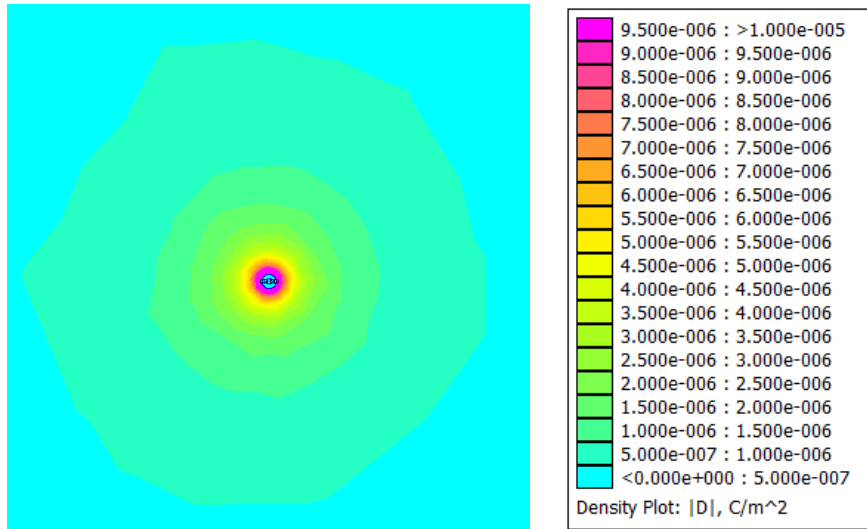
Slika 5.33. Prikaz gustoće električnog toka i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta



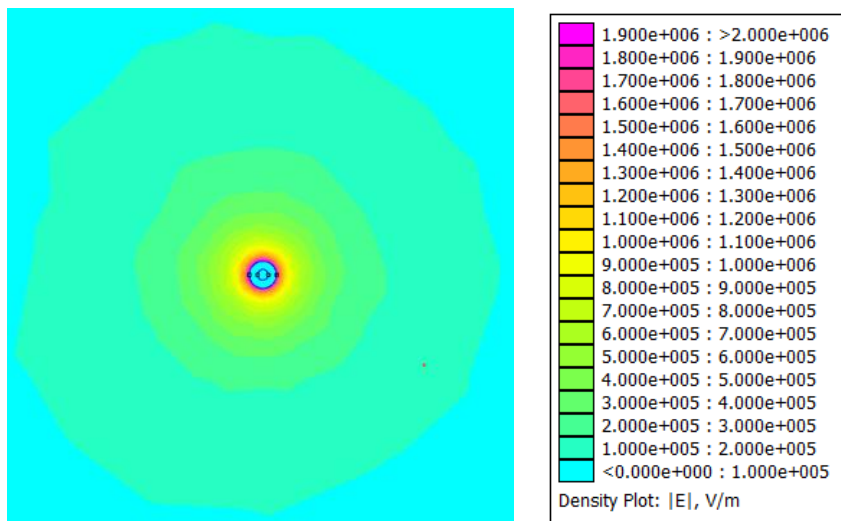
Slika 5.34. Prikaz jakosti električnog polja i ekvipotencijalnih linija u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta



Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću električnog toka (Sl. 5.35.) i jakost električnog polja (Sl. 5.36.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 48,41 \text{ kV}$ .



Slika 5.35. Prikaz gustoće električnog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Delta u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 48,41 \text{ kV}$



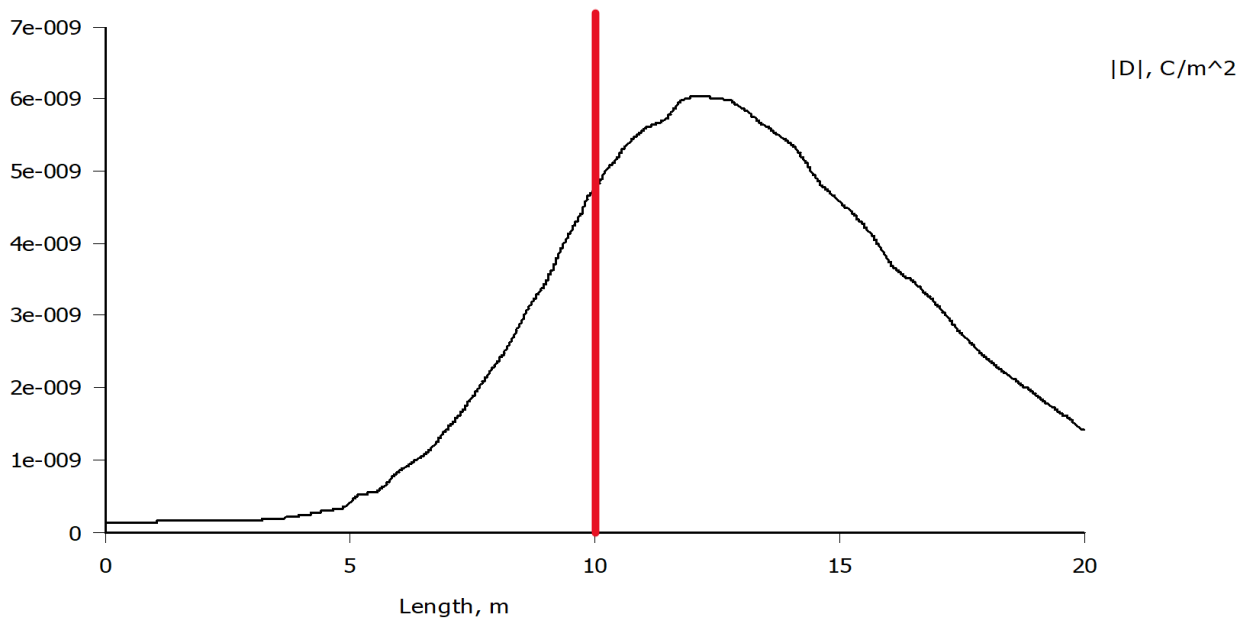
Slika 5.36. Prikaz jakosti električnog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Delta u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti napona  $u_3 = 48,41 \text{ kV}$

U nastavku je prikazan analitički izračun navedenih veličina na udaljenosti  $r$ , obavljen po uzoru na izraze (5-1), (5-2) i (5-3):

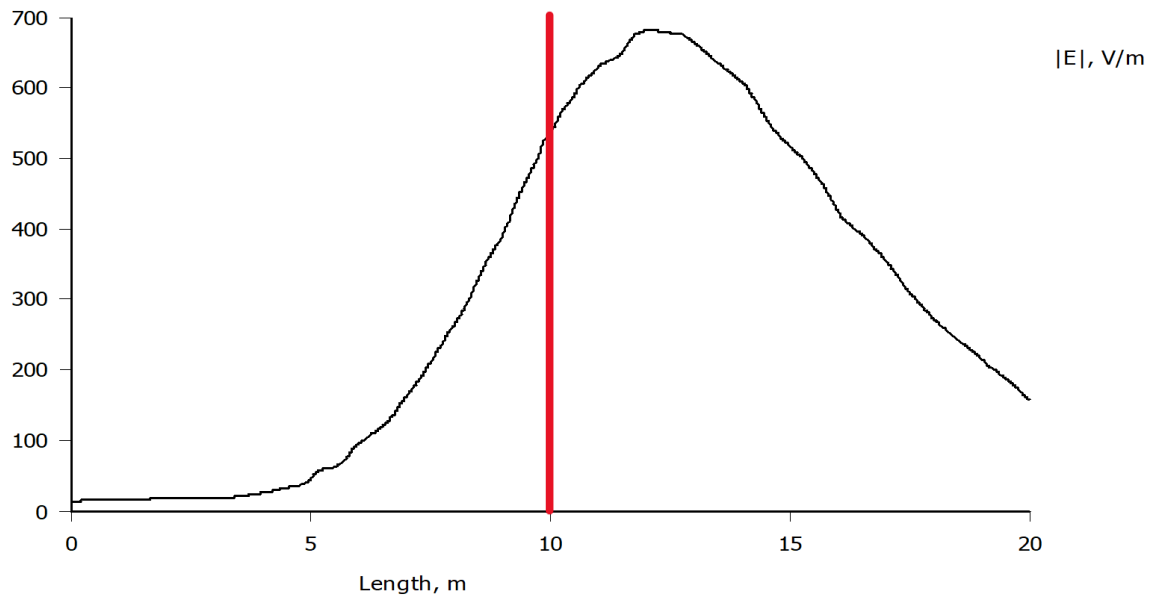
$$D = 1,763 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$$

$$E = 1,992 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

Grafički prikaz gustoće električnog polja na visini 1,5 m i rasponu 10 m od stupa nadzemnog voda prikazan je slikom 5.37., a grafički prikaz jakosti električnog polja prikazan je slikom 5.38.



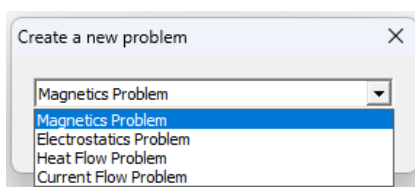
*Slika 5.37. Grafički prikaz gustoće električnog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla*



*Slika 5.38. Grafički prikaz jakosti električnog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla*

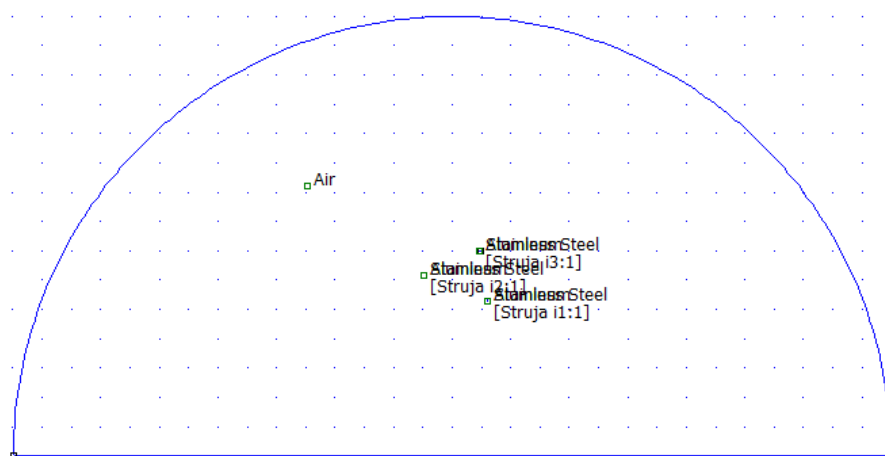
## 5.5. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

Slično kao i u poglavlju 5.2., klikom na naredbu „File“, zatim „New“, korisničko sučelje otvara prozor s implementiranim mogućnostima rješavanja problema (Sl 5.39.). S obzirom da se ovo poglavlje bavi magnetostatikom analizom nadzemnog voda, odabrana je opcija „Magnetostatics“ koja otvara novu datoteku prilagođenu za magnetostatiku analizu.



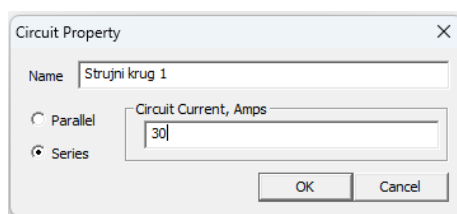
Slika 5.39. Odabir opcije „Magnetics problem“ za prikaz rezultata magnetskog polja

Nakon ove odabrane opcije potrebno je implementirati geometriju klikom na ikonu „Open an existing document“ i odabrati odgovarajuću datoteku. Za ovu simulaciju potrebno je implementirati geometriju i parametre vodiča za oblik glave stupa Jela (Slika 5.40.)



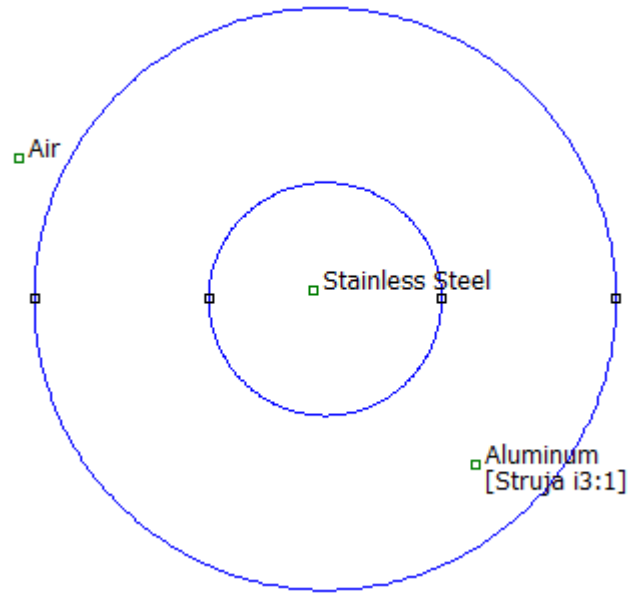
Slika 5.40. Geometrija mjernog područja za oblik glave stupa Jela

Idući korak je definiranje strujnih krugova. Klikom na naredbu „*Properties*“ prikazuje se izbornik gdje se odabire opcija „*Circuits*“ koja otvara prozor za odabir definiranog modela strujnog kruga. Ukoliko u izborniku prozora ne postoji niti jedan definirani model, klikom na naredbu „*Add property*“ otvara se novi prozor za unos parametara strujnog kruga prikazan slikom 5.41. Pošto su u svakoj simulaciji prikazana tri nadzemna voda, definirana su tri strujna kruga pod imenom „*Struja i1*“, „*Struja i2*“ i „*Struja i3*“ te su upisane vrijednosti struja iz tablice 5.3.



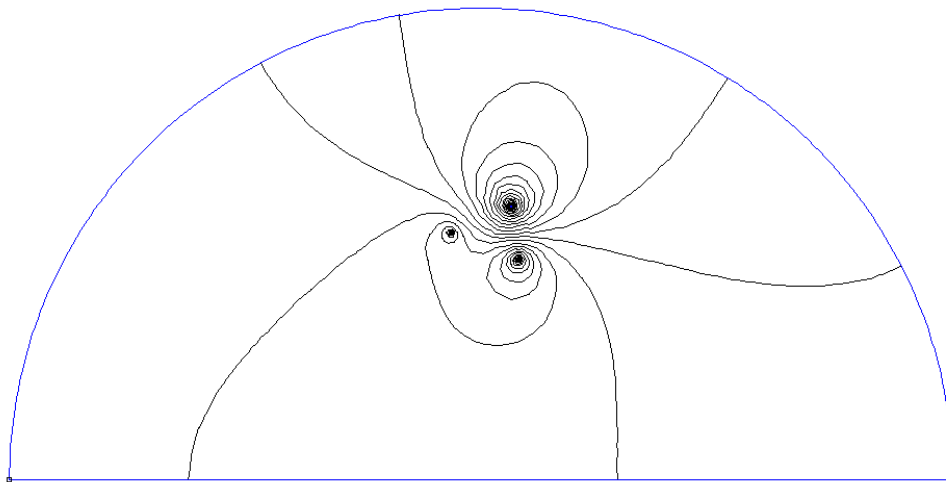
Slika 5. 41. Prozor za unos svojstava strujnog kruga

Nakon što su odabrani materijali i definirani strujni krugovi, potrebno ih je implementirati u prethodno nacrtanu geometriju kako bi se spremio konačan model. Klikom na ikonu „*Operate on block labels*“ dodjeljuju se prethodno odabrani materijali na način da kliknemo na područje geometrije kojem želimo dodijeliti materijal, zatim desnim klikom na dodijeljenu oznaku i pritiskom tipke „*Space*“ program otvara prozor za dodijeljivanje prethodno odabranih materijala i prethodno definiranih strujnih krugova. Unutar prozora, u izborniku „*Block type*“ se dodjeljuju materijali, dok u izborniku „*In Circuit*“ odabiremo strujne krugove. Nakon što su materijali i strujni krugovi dodijeljeni geometriji, dobije se konačni model nadzemnog voda prikazan slikom 5.42.

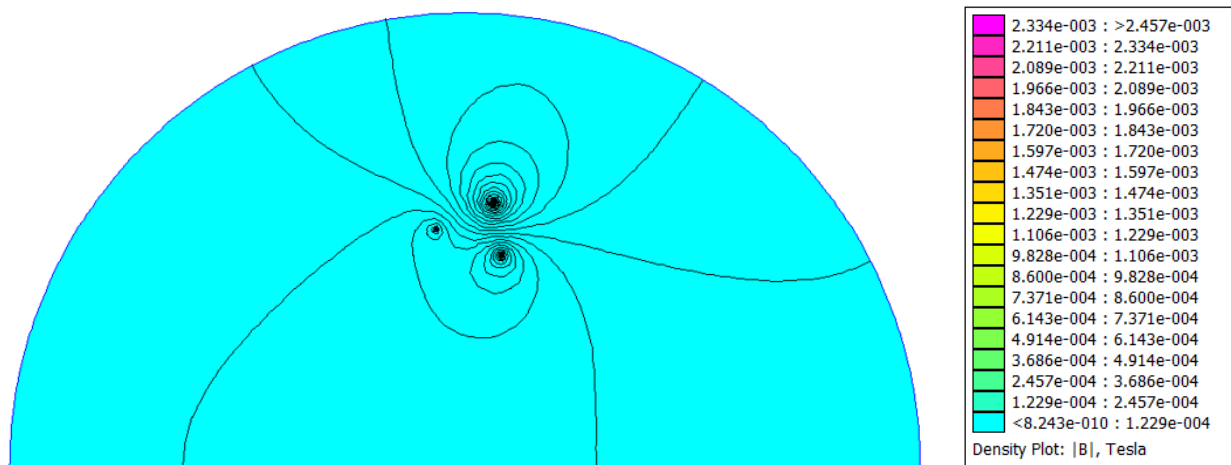


*Slika 5.42. Geometrija nadzemnog voda s dodijeljenim materijalima i strujnim krugovima*

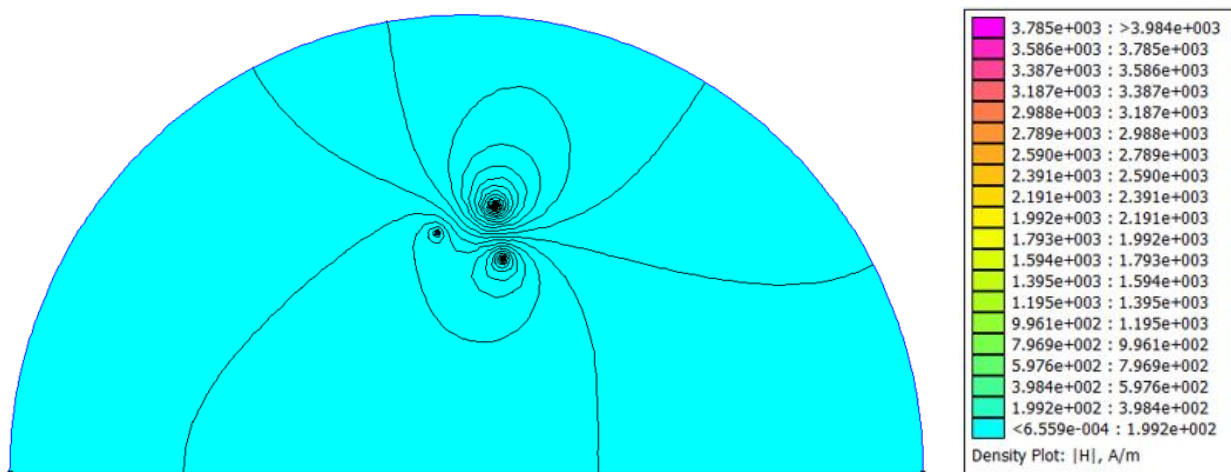
Kako bi pokrenuli simulaciju potrebno je redom kliknuti na ikone istim redoslijedom kao i u pokretanju prethodnih simulacija. Slika 5.43. prikazuje silnice magnetskog polja, slika 5.44. prikazuje gustoću magnetskog toka nadzemnih vodova, a slika 5.45. prikazuje jakost magnetskog polja



*Slika 5.43. Silnice magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela*

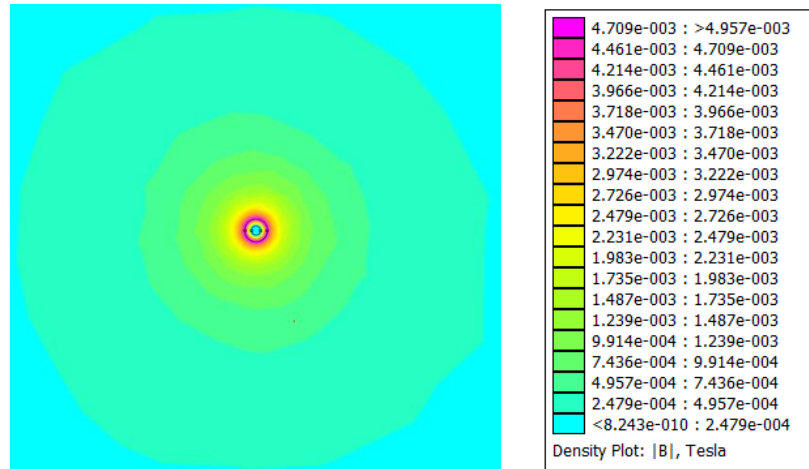


Slika 5.44. Prikaz gustoće magnetskog toka i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

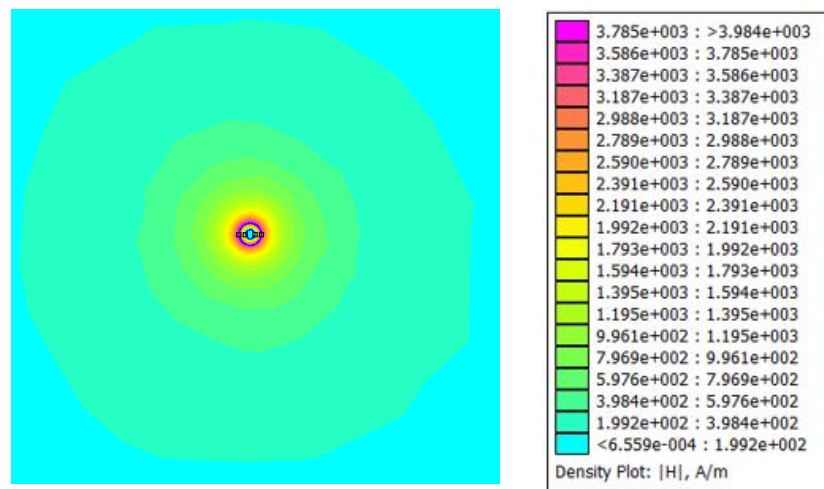


Slika 5.45. Prikaz jakosti magnetskog polja i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela

Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću magnetskog toka (Sl. 5.46.) i jakost magnetskog polja (Sl. 5.47.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81$  A.



Slika 5.46. Prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Jela u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81$  A



Slika 5.47. Prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Jela u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81$  A



U nastavku je prikazan analitički izračun navedenih veličina na udaljenosti  $r$  koja predstavlja polumjer vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81A$ . Gustoća magnetskog toka na površini vodiča računa se izrazom:

$$H = \frac{i_3}{2r\pi} \quad (5-4)$$

dok se jakost magnetskog polja računa izrazom:

$$B = \mu \cdot H \quad (5-5)$$

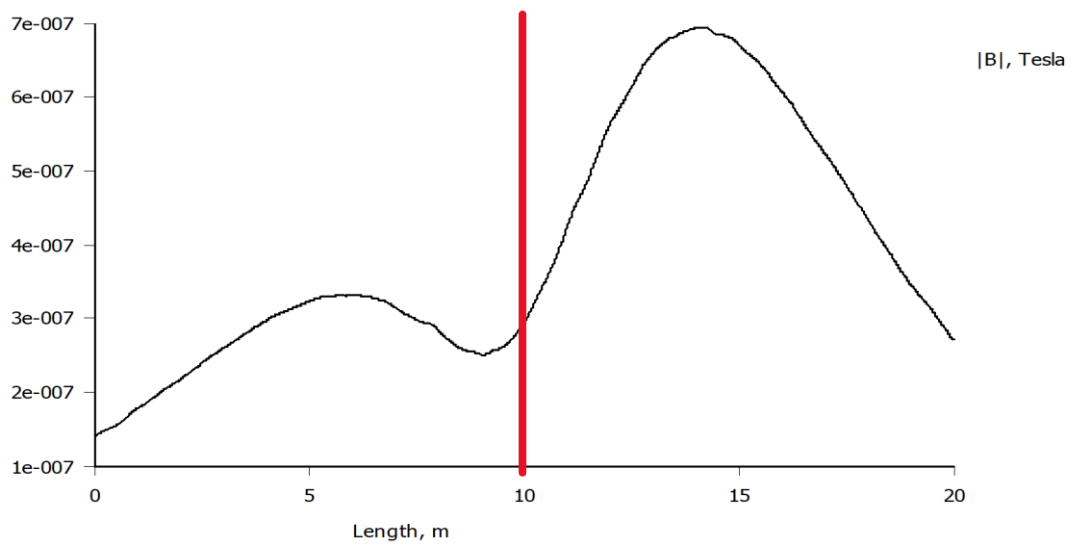
gdje je  $\mu$  magnetska permeabilnost iznosa  $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ .

Po uzoru na opisane formule izračunate su sljedeće vrijednosti na površini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3$ :

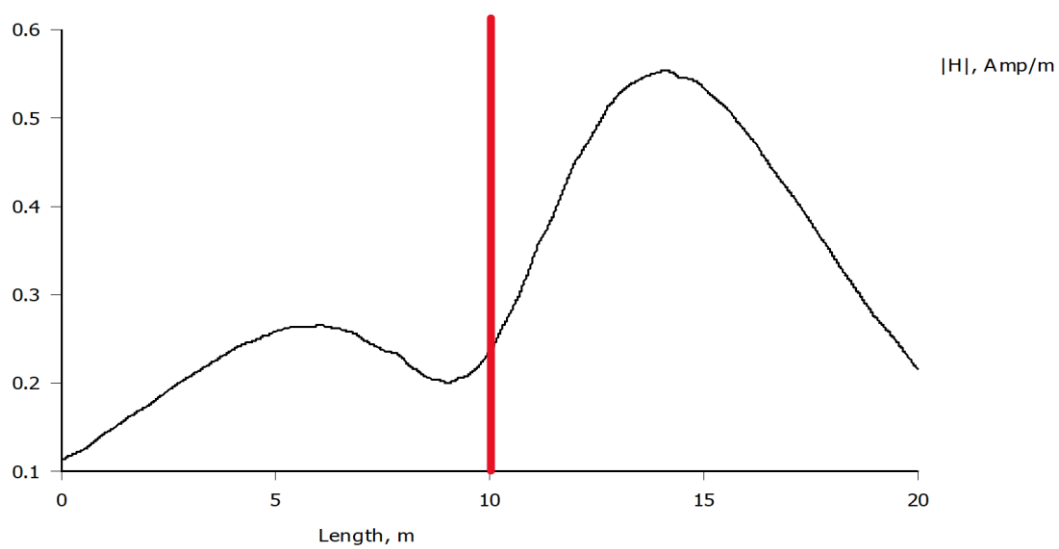
$$B = 4,903 \cdot 10^{-3} T$$

$$H = 3,902 \cdot 10^3 A/m$$

Kako bi simulacija prikazala gustoću magnetskog toka i jakost magnetskog polja na visini  $1,5 m$  iznad tla i u rasponu udaljenosti  $10 m$  od stupa nadzemnog voda, potrebno je primijeniti identični postupak kao i u prethodnim poglavljima. Slika 5.48. prikazuje graf gustoće magnetskog toka, dok slika 5.49. prikazuje graf jakosti magnetskog polja.



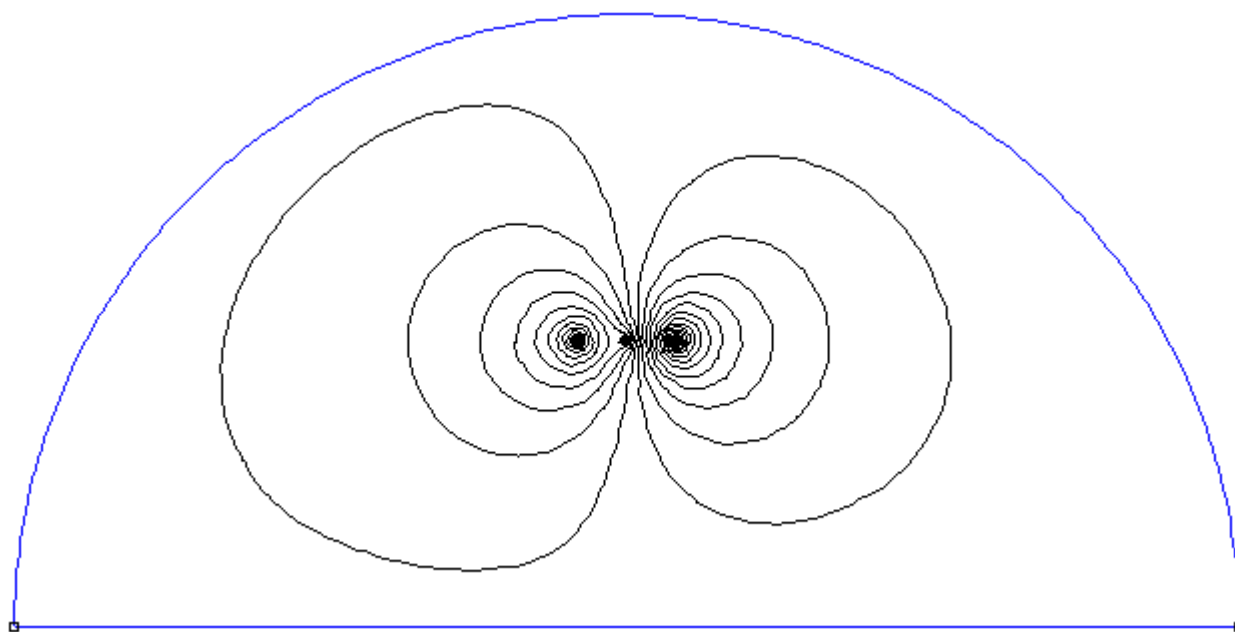
Slika 5.48. Grafički prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela na visini 1,5m iznad tla



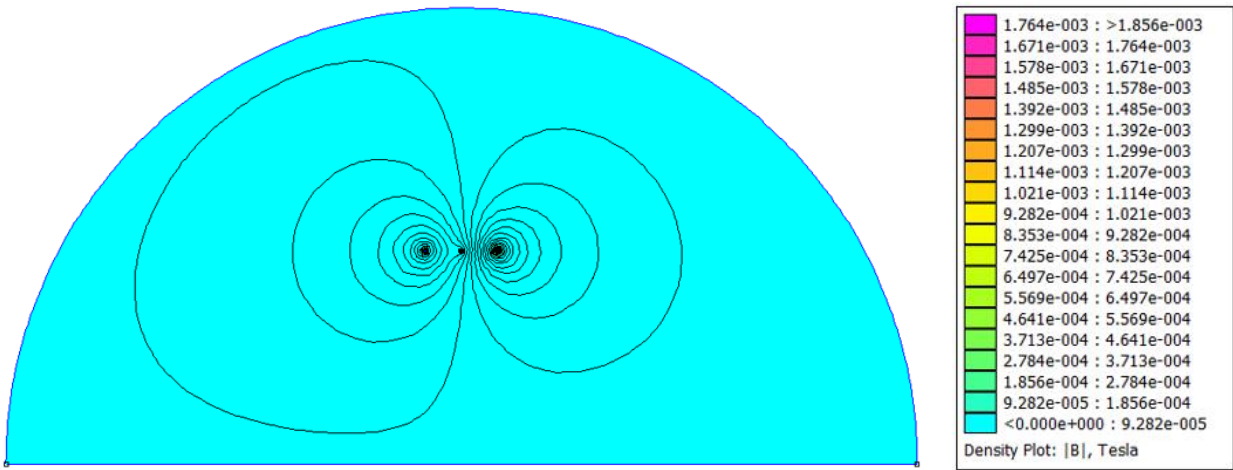
Slika 5.49. Grafički prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Jela na visini 1,5m iznad tla

## 5.6. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama

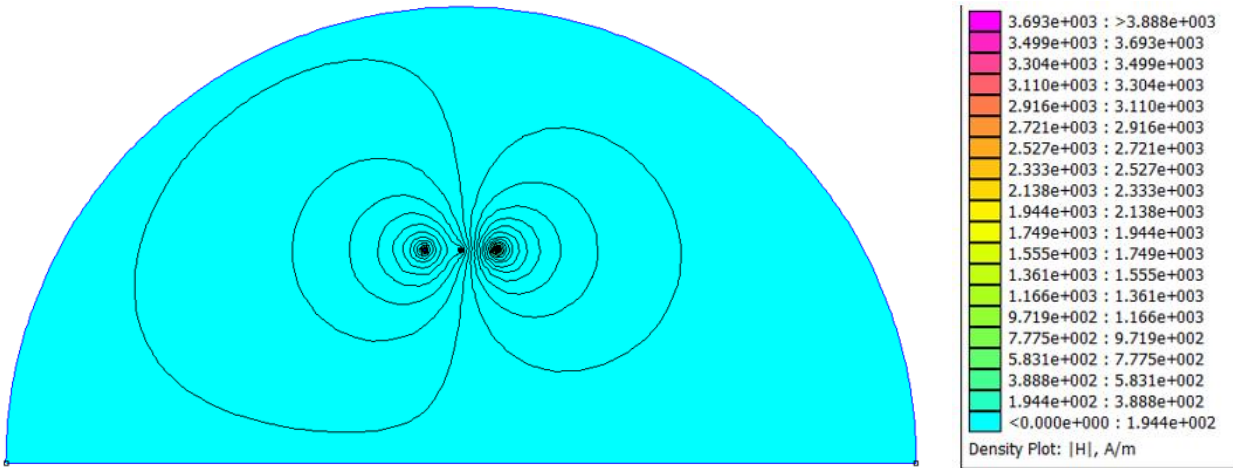
Za navedenu simulaciju potrebno je uvesti odgovarajuću geometriju. U program je implementirana geometrija nadzemnog voda raspoređenog po obliku glave stupa *Gama* te su u opciji „*Circuits*“ definirane vrijednosti struja prikazane tablicom 5.3. Slika 5.50. prikazuje silnice magnetskog polja, slika 5.51. prikazuje gustoću magnetskog toka nadzemnih vodova za navedeni oblik glave stupa, a slika 5.52. prikazuje jakost magnetskog polja.



Slika 5.50. Silnice magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa *Gama*

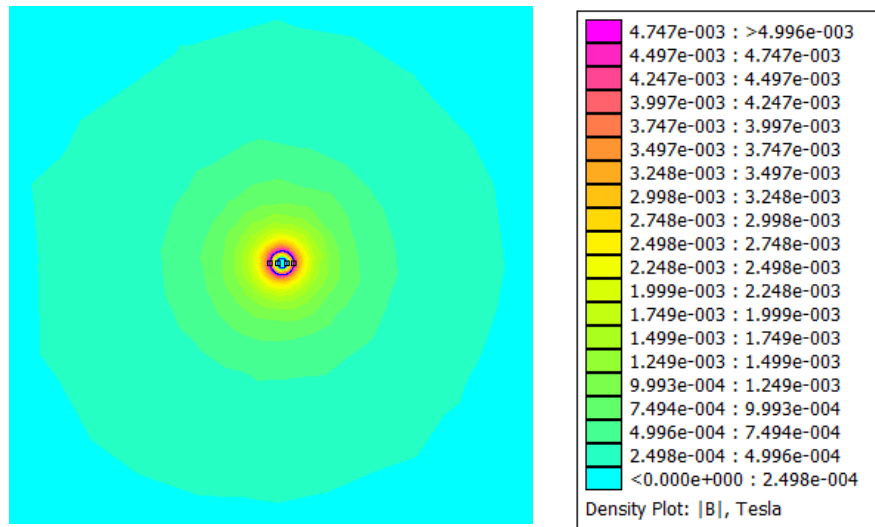


*Slika 5.51. Prikaz gustoće magnetskog toka i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama*

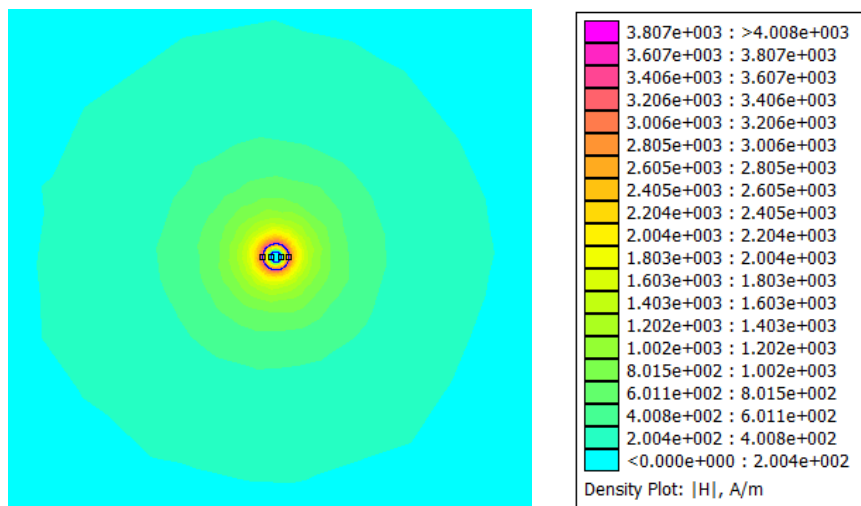


*Slika 5.52. Prikaz jakosti magnetskog polja i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama*

Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću magnetskog toka (Sl. 5.53.) i jakost magnetskog polja (Sl. 5.54.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$ .



Slika 5.53. Prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Gama u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$



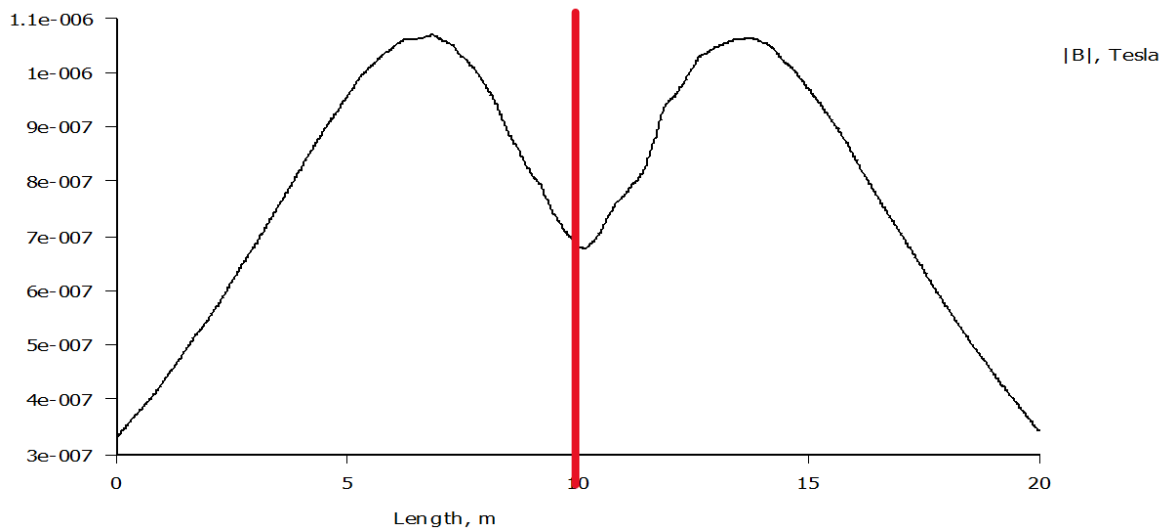
Slika 5.54. Prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Gama u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$

Po uzoru na izraze (5-4) i (5-5) izračunate su sljedeće vrijednosti na površini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3$ :

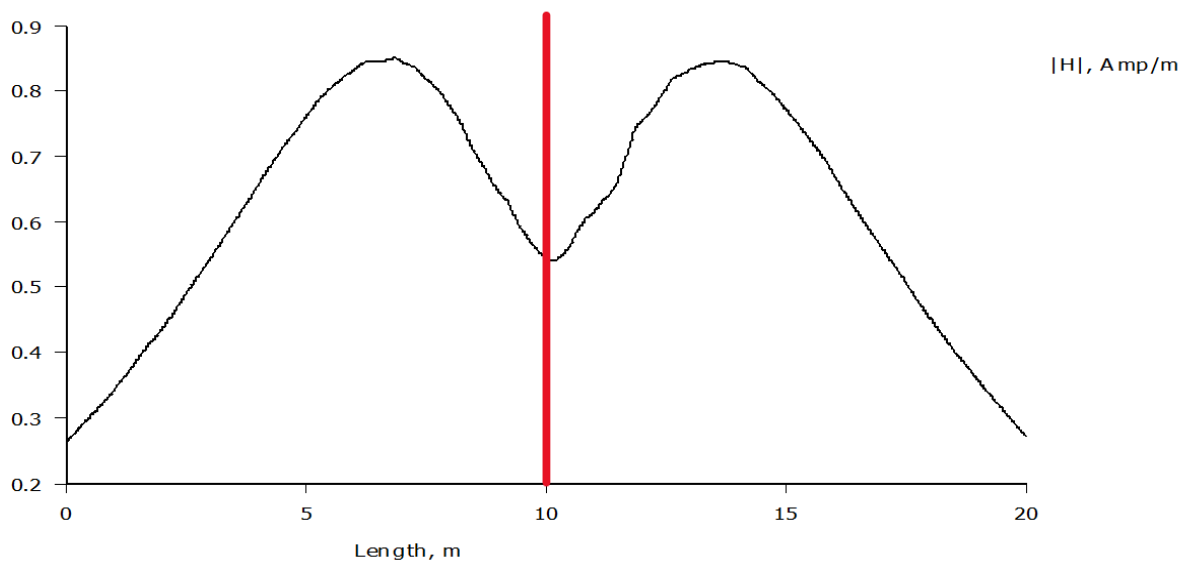
$$B = 4,903 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$H = 3,902 \cdot 10^3 \text{ A/m}$$

Na slici 5.55. prikazana je gustoća magnetskog toka na visini  $1,5 \text{ m}$  od tla i u rasponu  $10 \text{ m}$  od stupa nadzemnog voda, dok je na slici 5.56. prikazana jakost magnetskog polja u tom području. Svi prikazani rezultati dobiveni su identičnim postupcima kao u poglavlju 5.2.



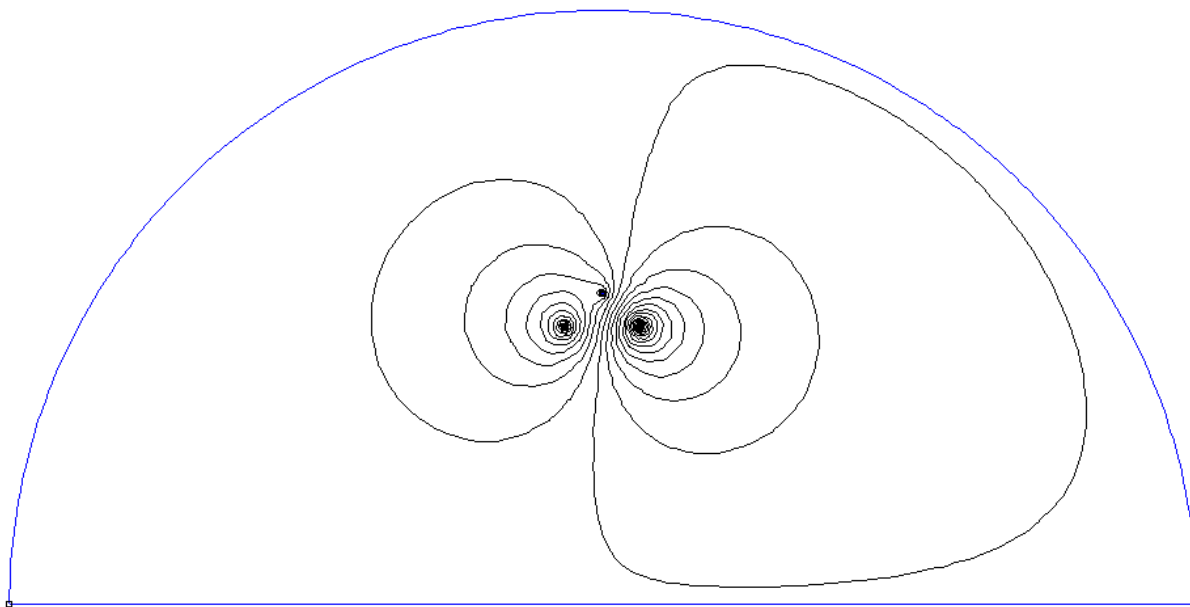
Slika 5.55. Grafički prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama na visini  $1,5 \text{ m}$  iznad tla



*Slika 5.56. Grafički prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Gama na visini 1,5m iznad tla*

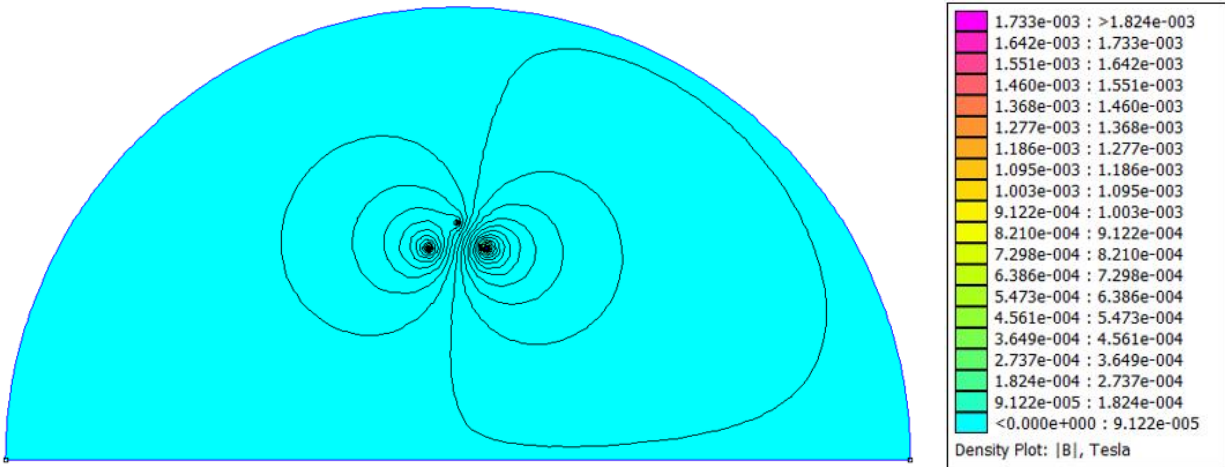
## 5.7. Simulacija magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta

Za navedenu simulaciju potrebno je uvesti odgovarajuću geometriju. U program je implementirana geometrija nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa *Gama* te su u opciji „Circuits“ definirane vrijednosti struja prikazane tablicom 5.3. Slika 5.57. prikazuje silnice magnetskog polja, slika 5.58. prikazuje gustoću magnetskog toka nadzemnih vodova za navedeni oblik glave stupa, a slika 5.59. prikazuje jakost magnetskog polja Svi prikazani rezultati dobiveni su identičnim postupcima kao u poglavlju 5.2.

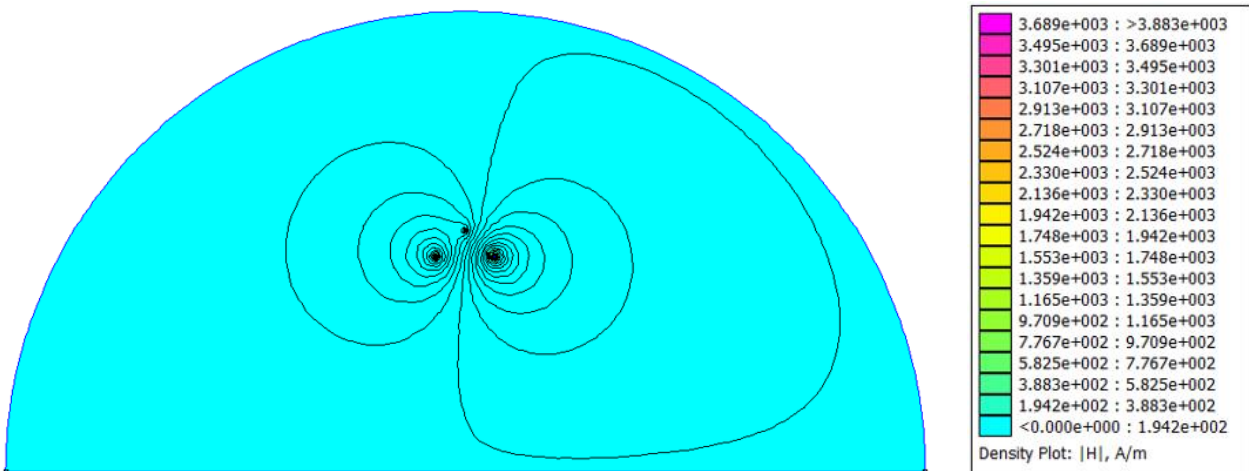


Slika 5.57. Silnice magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta



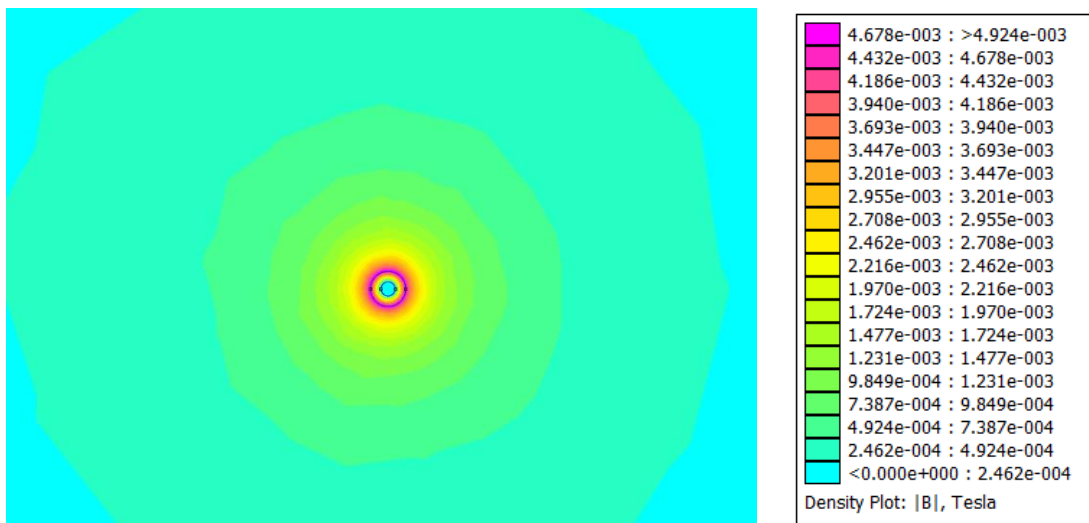


Slika 5.58. Prikaz gustoće magnetskog toka i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta

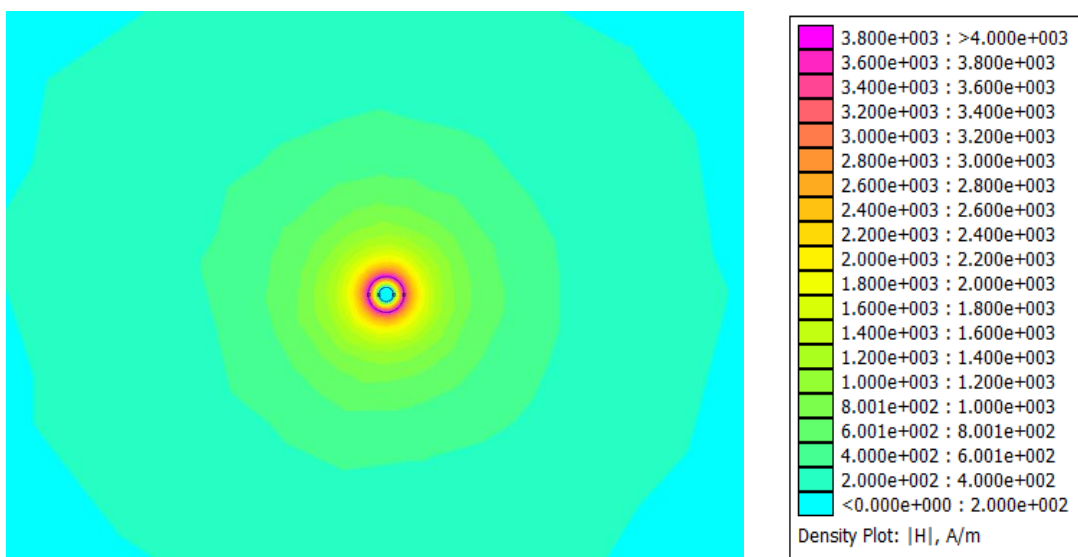


Slika 5.59. Prikaz jakosti magnetskog polja i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta

Slike u narednom tekstu vizualno prikazuju gustoću magnetskog toka (Sl. 5.60.) i jakost magnetskog polja (Sl. 5.61.) u blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$ .



Slika 5.60. Prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnog voda oblika glave stupa Delta u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$



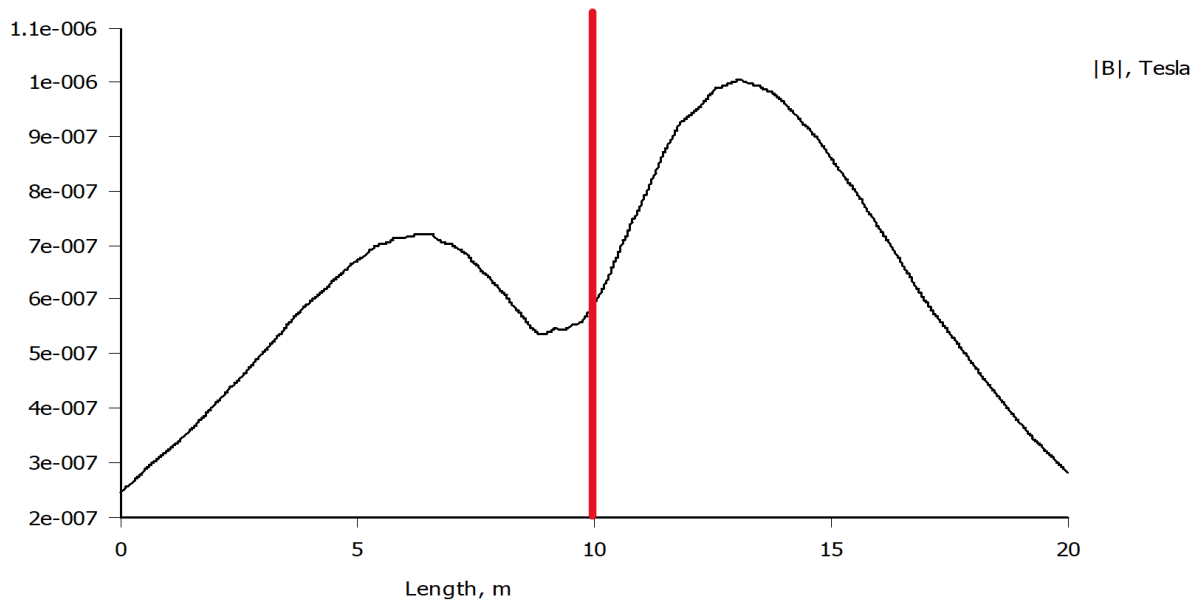
Slika 5.61. Prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnog voda oblika glave stupa Delta u neposrednoj blizini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3 = 97,81 \text{ A}$

Po uzoru na izraze (5-4) i (5-5) izračunate su sljedeće vrijednosti na površini vodiča s trenutnom vrijednosti struje  $i_3$ :

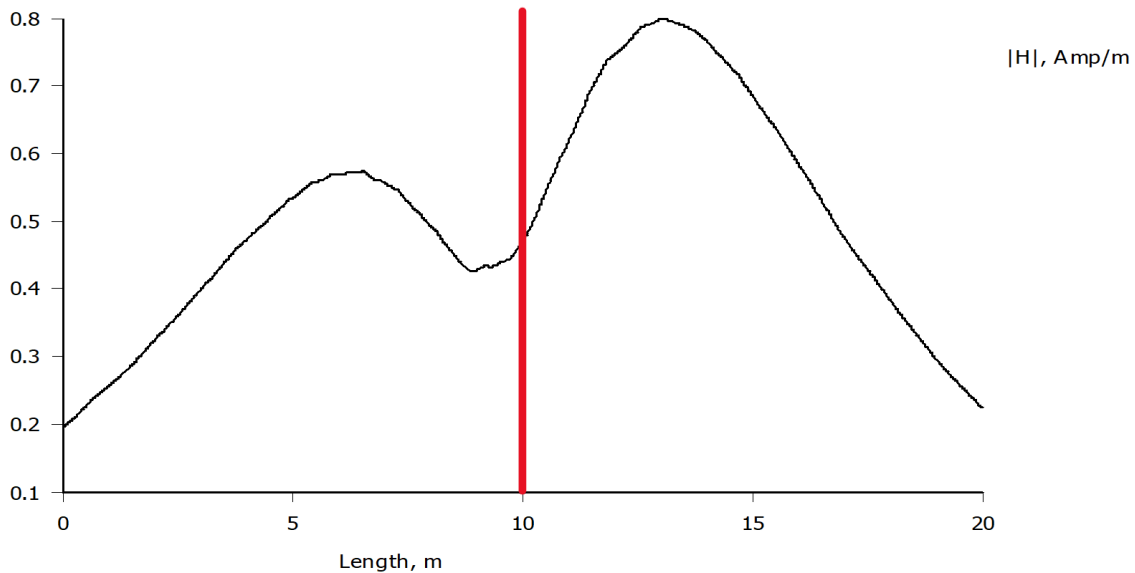
$$B = 4,903 \cdot 10^{-3} T$$

$$H = 3,902 \cdot 10^3 A/m$$

Na slici 5.62. prikazana je gustoća magnetskog toka na visini 1,5 m od tla i u rasponu 10 m od stupa nadzemnog voda, dok je na slici 5.63. prikazana jakost magnetskog polja u tom području.

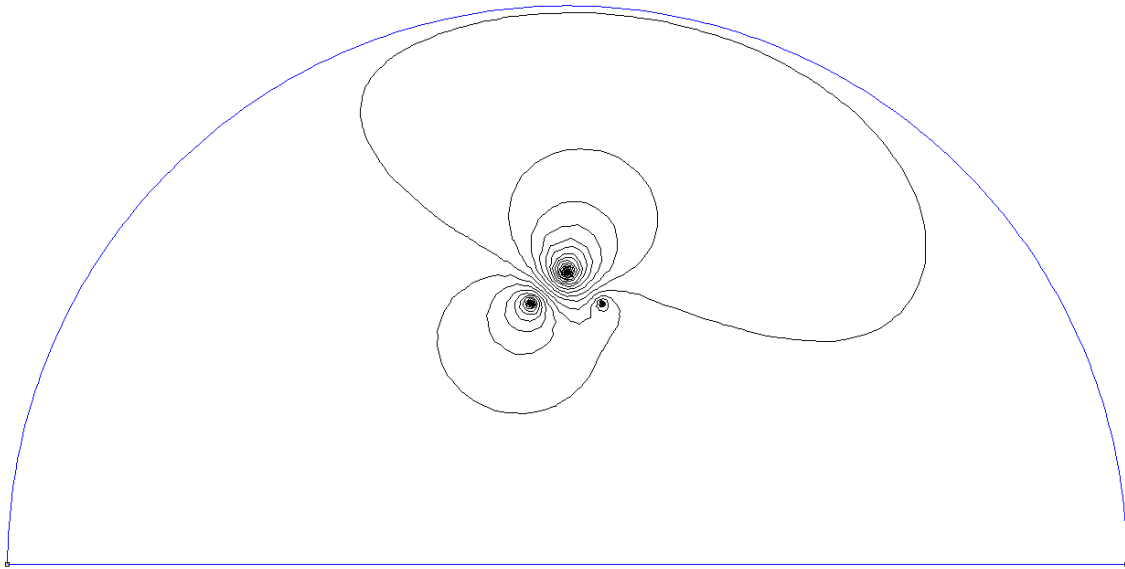


*Slika 5.62. Grafički prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla*

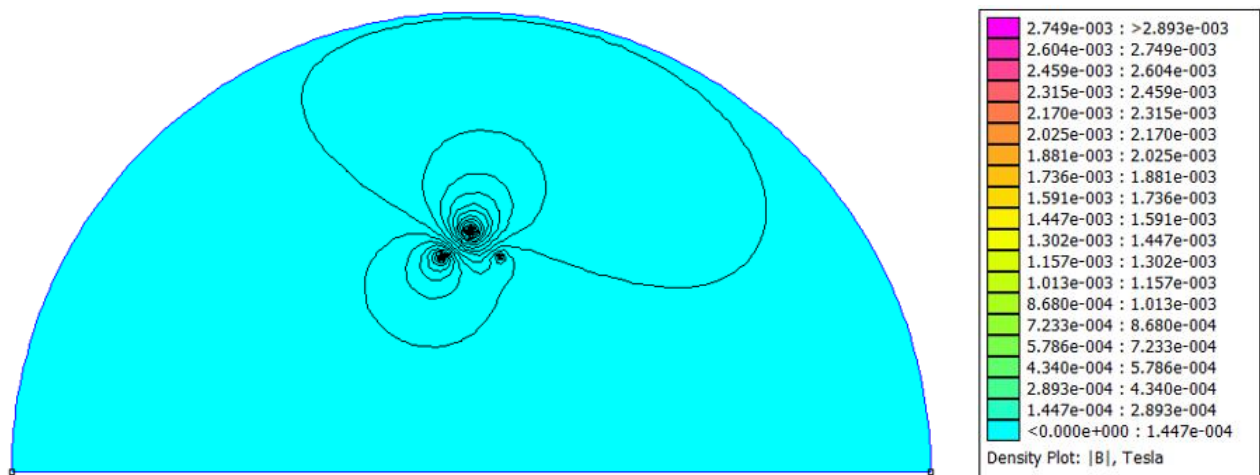


*Slika 5.63. Grafički prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla*

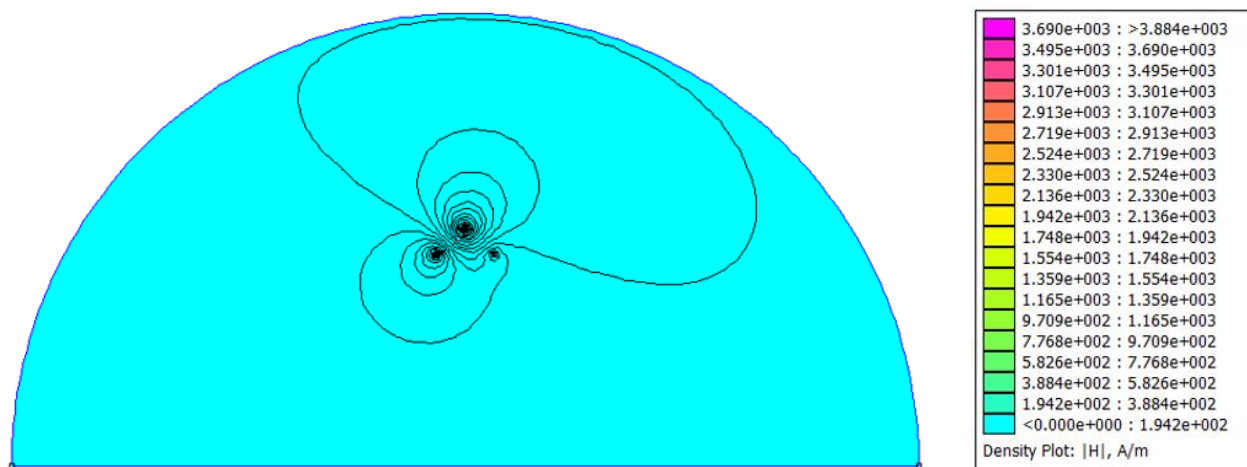
Na ovom primjeru geometrije zamijenjena su mjesta vodičima s trenutnim strujama  $i_2$  i  $i_3$  (Tablica 5.3.) kako bi se utvrdilo postoji li utjecaj na vrijednosti magnetostatike prilikom zamjene pozicije vodiča nadzemnog voda. Slike u narednom tekstu prikazuju rezultate simulacije nakon zamjene mjesta prethodno navedenih vodiča. Kao i u prethodnoj simulaciji, slika 5.64. prikazuje silnice magnetskog polja, slika 5.65. prikazuje gustoću magnetskog toka nadzemnih vodova za navedeni oblik glave stupa, a slika 5.66. prikazuje jakost magnetskog polja. Na slici 5.67. prikazana je gustoća magnetskog toka na visini 1,5 m od tla i u rasponu 10 m od stupa nadzemnog voda, dok je na slici 5.68. prikazana jakost magnetskog polja u tom području. Svi prikazani rezultati dobiveni su identičnim postupcima kao u poglavlju 5.2.



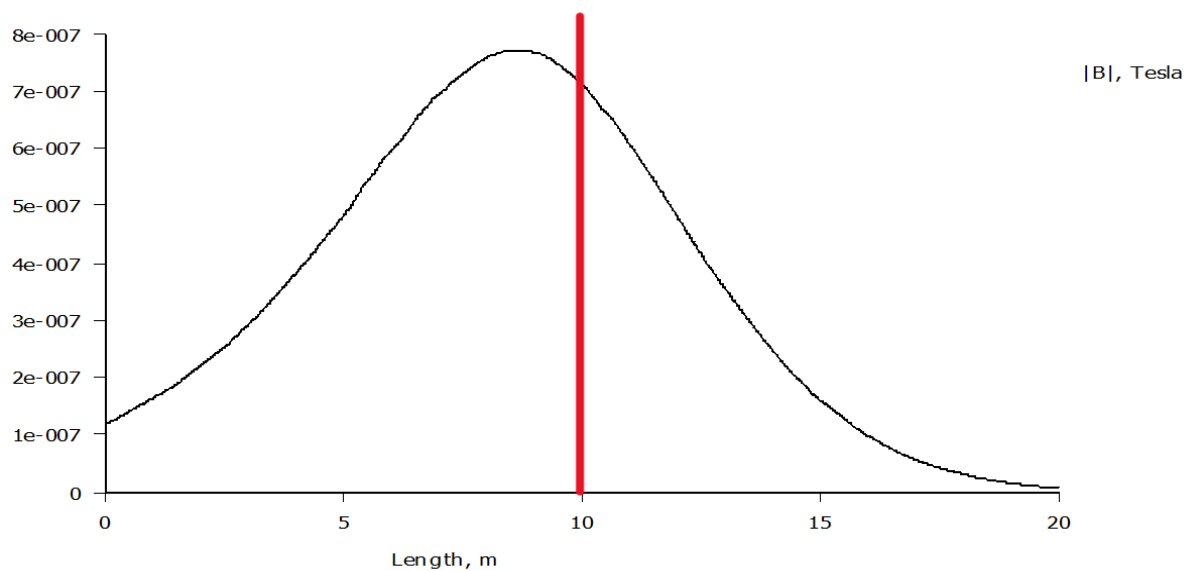
Slika 5.64. Silnice magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta nakon zamjene mjesta vodiča s trenutnim vrijednostima struja  $i_2$  i  $i_3$



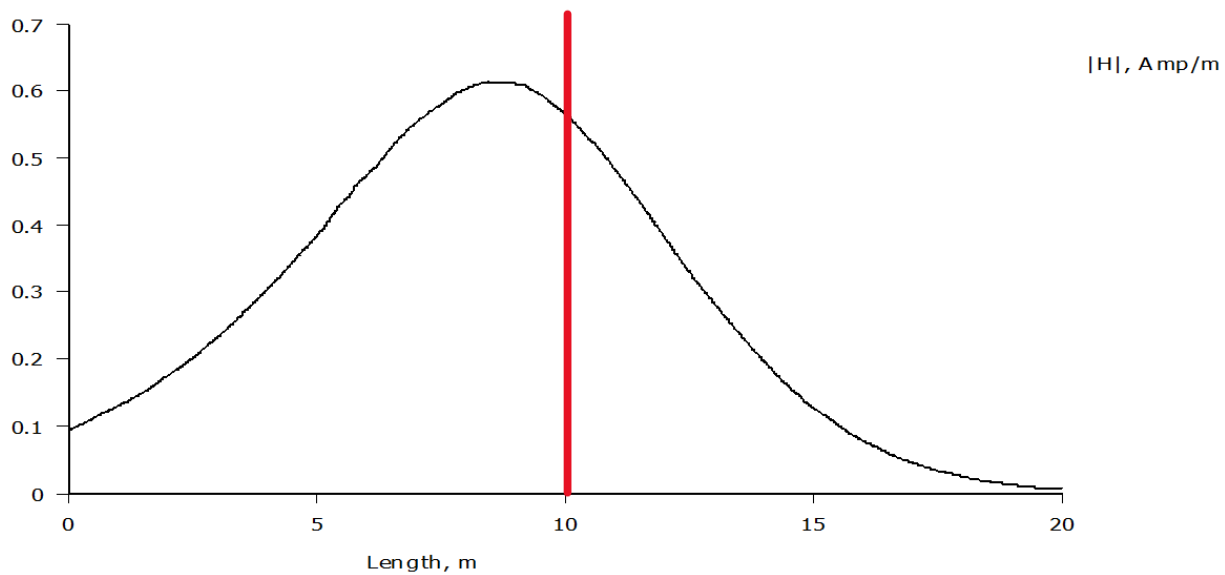
Slika 5.65. Prikaz gustoće magnetskog toka i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta nakon zamjene mjesta vodiča s trenutnim vrijednostima struja  $i_2$  i  $i_3$



Slika 5.66. Prikaz jakosti magnetskog polja i silnica u prostoru oko nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta nakon zamjene mjesta vodiča s trenutnim vrijednostima struja  $i_2$  i  $i_3$



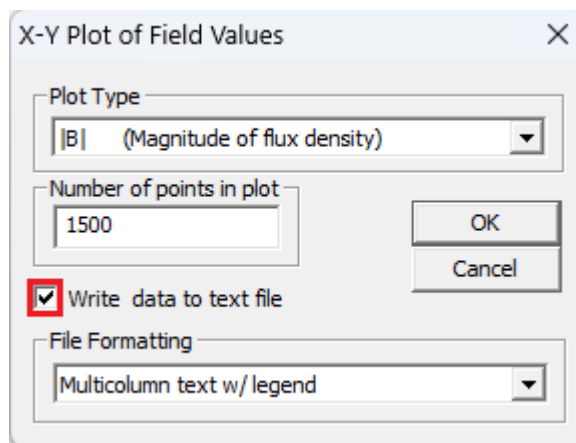
Slika 5.67. Grafički prikaz gustoće magnetskog toka nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla nakon zamjene mjesta vodiča s trenutnim vrijednostima struja  $i_2$  i  $i_3$



*Slika 5.68. Grafički prikaz jakosti magnetskog polja nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta na visini 1,5m iznad tla nakon zamjene mjesta vodiča s trenutnim vrijednostima struja  $i_2$  i  $i_3$*

## 5.8. Usporedba rezultata simulacija s propisanim graničnim vrijednostima

U ovom poglavlju tablično je prikazana usporedba jakosti električnog polja, jakosti magnetskog polja te gustoće magnetskog toka s graničnim vrijednostima za profesionalnu izloženost prikazanih tablicom 5.2. U tablicu su upisane najveće izmjerene veličine u trenutku  $t = 3\text{ s}$  na visini 1,5 metara iznad tla u rasponu 10m od stupa nadzemnog voda. Navedene maksimalne veličine nisu pročitane iz grafičkih prikaza već su određene preciznijim načinom, a to je ispis mjerenih veličina u .txt dokumentu, u ovom slučaju otvorenom u aplikaciji „Notepad“. Za navedeni ispis potrebno je pokrenuti simulaciju te kliknuti na ikonu grafa kako bi se otvorio prozor pod imenom „X-Y Plot of Field Values“ prikazan slikom 5.69. Unutar prozora potrebno je kliknuti na crveno uokvireno polje „Write data to text file“ te naredbu „OK“, nakon čega program sprema ispis u .txt obliku na odabrano mjesto, npr. Desktop. Nakon spremanja datoteke, potrebno ju je otvoriti i iščitati najveću vrijednost. Navedene vrijednosti prikazane su u aplikaciji „Notepad“ na slici 5.70. Tablica 5.5. prikazuje prethodno opisanu usporedbu, a odabrane graniče vrijednosti su definirane za frekvenciju veličine  $f = 0\text{ Hz}$  jer je za sve simulacijske zadatke definirana frekvencija vrijednosti 0.



Slika 5.69. Naredba za ispis mjerenih veličina u programu Notepad



```

rezsimulacijamagnpoljegama.tb
Datoteka  Uređivanje  Prikaži

% Column 0: Length, m
% Column 1: |B|, Tesla
0.0000000e+000 0.0000000e+000
1.03144527e-002 4.25179980e-010
2.06289054e-002 8.50348677e-010
3.09433582e-002 1.27551737e-009
4.12578109e-002 1.70068607e-009
5.15722636e-002 2.05411164e-009
6.18867163e-002 2.36013821e-009
7.22011690e-002 2.66620539e-009
8.25156217e-002 2.97230063e-009
9.28300745e-002 3.35348825e-009
1.03144527e-001 3.74285880e-009
1.13458980e-001 4.13402551e-009
1.23773433e-001 4.52652276e-009
1.34087885e-001 4.92003211e-009
1.44402338e-001 5.29808801e-009
1.54716791e-001 5.67007135e-009
1.65031243e-001 6.04243747e-009
1.75345696e-001 6.41511974e-009
1.85660149e-001 6.78806607e-009
1.95974602e-001 7.16123521e-009
2.06289054e-001 7.53459405e-009
2.16603507e-001 7.90811573e-009
2.26917960e-001 8.28177821e-009
2.37232412e-001 8.65556376e-009

Ln 1, Col 1 49.545 znakova

```

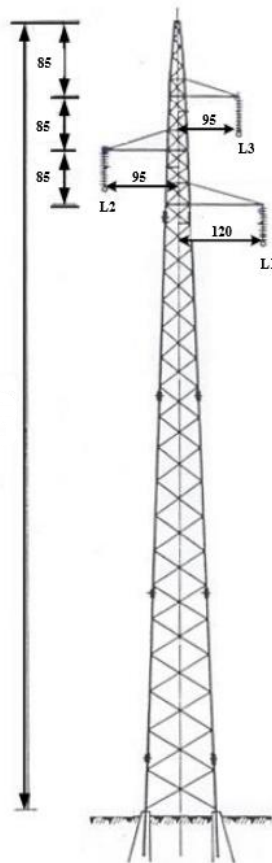
Slika 5.70. Ispis mjerenih veličina u programu Notepad

Tablica 5.5. Usporedba mjerenih veličina s graničnim vrijednostima za profesionalnu izloženost

OBLIK GLAVE STUPA	JAKOST ELEKTRIČNOG POLJA $E$ [V/m]	JAKOST MAGNETSKOG POLJA $H$ [A/m]	GUSTOĆA MAGNETSKOG TOKA $B$ [T]
Gama	5092,32	0,5793	$6,9831 \cdot 10^{-7}$
Delta	258,23	0,8494	$1,0786 \cdot 10^{-6}$
Jela	679,87	0,8005	$1,0002 \cdot 10^{-6}$
<b>GRANIČNE VRIJEDNOSTI:</b>	14000	32000	0,04

## 6. JEDINIČNI PARAMETRI 110kV NADZEMNIH VODOVA RASPOREĐENIH PO OBLIKU GLAVE STUPA JELA

Ovo poglavlje prikazuje analitički izračun jediničnih parametara voda metodom srednjih geometrijskih udaljenosti (*SGU metoda*) te način kako navedene parametre ispisati u programu FEMM. Točnije, prikazan je izračun jediničnih induktiviteta i jediničnih kapaciteta modela 110kV nadzemnog voda oblika glave stupa Jela iz poglavlja 5.4. čija je geometrija prikazana slikom 6.1. Na kraju poglavlja rezultati SGU metode uspoređeni su s rezultatima programa FEMM.



Slika 6.1. Geometrija 110kV nadzemnog voda oblika glave stupa Jela

Parametri voda su veličine karakteristične za izračun električnih prilika na vodu u svim pogonskim slučajevima. Vrijednosti parametara voda ovise o materijalu, okolini, međusobnom geometrijskom odnosu dijelova voda i odnosu dijelova voda s okolinom. Parametri voda navode se po svakoj fazi posebno te po dužini vodiča iznosa 1km. Vremenski ovisni parametri voda su napon, struja i frekvencija, a vremenski neovisni (jedinični) parametri voda su:

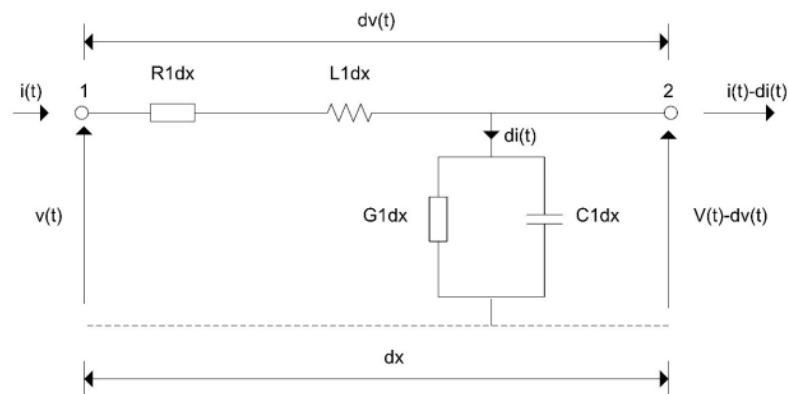
- jedinični djelatni otpor:  $R_1$  [ $\Omega/km$ ]

- jedinični odvod:  $G_1$  [ $S/km$ ]

- jedinični induktivitet:  $L_1$  [ $H/km$ ]

- jedinični kapacitet:  $C_1$  [ $F/km$ ]

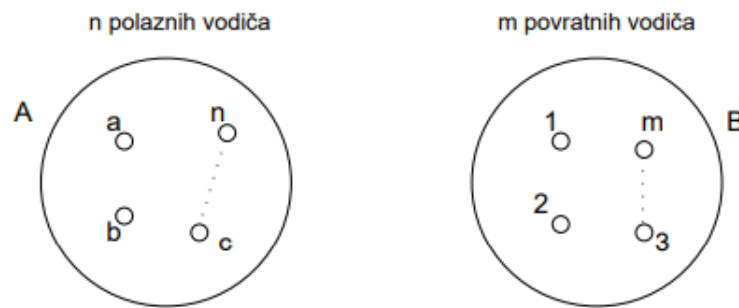
Sve jedinične vrijednosti realnog voda su uvijek različite od nule. Idealni vod je vod bez gubitaka kojemu su jedinični induktivitet i kapacitet različiti od nule, a jedinični djelatni otpor i odvod jednaki nuli. Prolaskom struje kroz jedinični djelatni otpor i odvod dolazi do toplinskih gubitaka te su zato nazvani toplim parametrima, dok su jedinični kapacitet i jedinični induktivitet hladni parametri. Prema položaju djelatni otpor i induktivitet su uzdužni parametri, a odvod i kapacitet su poprečni parametri [15]. Slika 6.2. prikazuje položaj konstanti voda na dijelu  $dx$ .



Slika 6.2. Nadomjesna shema položaja konstanti jedne faze simetričnog trofaznog voda [16]

## 6.1. Metoda srednjih geometrijskih udaljenosti (SGU metoda)

Ova metoda je primjenjiva za izračun jediničnih parametara voda samo ako je ispunjen uvjet  $\sum I = 0$ . Vodiče je tada moguće podijeliti u dvije grupe, grupu A koja se sastoji od  $n$  polaznih vodiča kojima teče pozitivna struja ( $+\vec{I}$ ) i grupu B koja se sastoji od  $m$  povratnih vodiča kojima teče negativna struja ( $-\vec{I}$ ).



Slika 6.3. Prikaz podjele vodiča u dvije grupe u svrhu primjene SGU metode

Veličina  $D_m$  definirana je kao međusobna srednja geometrijska udaljenost vodiča grupe A i B. Kako u grupi A ima  $n$  vodiča, a u grupi B  $m$  vodiča ukupno postoji  $m \cdot n$  udaljenosti pa je potrebno odrediti  $(m \cdot n)$ -ti korijen u izrazu:

$$D_m = \sqrt[m \cdot n]{(D_{a1} \cdot D_{a2} \cdot \dots \cdot D_{an}) \cdot (D_{b1} \cdot D_{b2} \cdot \dots \cdot D_{bn}) \cdot \dots \cdot (D_{n1} \cdot D_{n2} \cdot \dots \cdot D_{nm})} \quad (6-1)$$

Veličina  $D_s$  definirana je kao vlastita srednja geometrijska udaljenost vodiča grupe A, a ukupan broj udaljenosti jednak je  $n \cdot n = n^2$  u izrazu:

$$D_s = \sqrt[n^2]{(D_{aa} \cdot D_{ab} \cdot \dots \cdot D_{an}) \cdot (D_{ba} \cdot D_{bb} \cdot \dots \cdot D_{bn}) \cdot \dots \cdot (D_{na} \cdot D_{nb} \cdot \dots \cdot D_{nn})} \quad (6-2)$$

Tablica 6.1. prikazuje unaprijed definirane (reducirane) vlastite SGU za vodove od  $n$  žica vanjskog polumjera  $R$ .

Tablica 6.1. Reducirana vlastita SGU za vodiče od  $n$  žica [15]

Broj žica vodiča	Vlastita SGU vodiča
$n = 3$	$D_s = 0,677R$
$n = 7$	$D_s = 0,726R$
$n = 19$	$D_s = 0,758R$
$n = 37$	$D_s = 0,768R$
$n > 61$	$D_s = 0,7788R$

Potrebno je napomenuti kako SGU metoda računa jedinične parametre nadomjesnog vodiča, ali ne i jedinične parametre svakog vodiča u snopu zasebno te da kod trofaznih vodova daje rezultate kao da je vod simetričan, bio on to stvarno ili ne.[15] Nakon definiranih izraza za SGU metodu, jednostavnom geometrijom (Pitagorin poučak) određene su udaljenosti između vodiča na slici 6.1. iznosa:

$$D_{12} = 1,8275 \text{ m}$$

$$D_{13} = 1,615 \text{ m}$$

$$D_{23} = 1,7183 \text{ m}$$

pri čemu je:

$D_{12}$  – udaljenost između faza  $L_1$  i  $L_2$

$D_{13}$  – udaljenost između faza  $L_1$  i  $L_3$

$D_{23}$  – udaljenost između faza  $L_2$  i  $L_3$

Za geometriju na slici 6.1. potrebno je prikazati jedinične djelatne otpore te jedinične induktivitete i kapacitete svih faza kako bi se dobile srednje ukupne vrijednosti za nadzemni vod. Za jedinični djelatni otpor nije prikazan izračun, nego je za SGU metodu definiran iz tablice u literaturi 15. Kako bi se izračunao jedinični induktivitet i kapacitet faze  $L_1$ , navedenu fazu je potrebnu svrstati u grupu A, a ostale faze u grupu B te izračunati  $D_m$  po uzoru na izraz 6-1:

$$D_m = \sqrt[2]{D_{12} \cdot D_{13}} \quad (6-3)$$

$$D_m = \sqrt[2]{1,8275 \cdot 1,615}$$

$$D_m = 1,718 \text{ m}$$

U 5. poglavlju ovog diplomskog rada opisano je kako se vodič sastoji od 7 žica te je iz navedenih podataka presjeka vodiča utvrđen vanjski polumjer  $R = 0,004 \text{ m}$ . Na temelju ovih podataka moguće je odrediti vlastitu SGU vodiča koristeći izraz iz tablice 6.1.:

$$D_s = 0,726R \quad (6-4)$$

$$D_s = 0,726 \cdot 0,004$$

$$D_s = 2,904 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Navedeni  $D_s$  jednak je za sve faze jer se radi o jednakom vodiču. Nakon što su definirani potrebni podaci za proračun, jedinični induktivitet faze  $L_1$  računa se izrazom:

$$L_{L_1} = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_m}{D_s} = 1,2766 \cdot 10^{-3} \text{ H/km} \quad (6-5)$$

dok se jedinični kapacitet faze  $L_1$  računa izrazom:

$$C_{L_1} = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \ln \frac{D_m}{D_s}} = 8,7039 \cdot 10^{-9} \text{ F/km} \quad (6-6)$$

Jednakim postupkom izračunati su preostali jedinični induktiviteti i kapaciteti faza  $L_2$  i  $L_3$ . Srednja geometrijska udaljenost faze  $L_2$  računa se izrazom:

$$D_m = \sqrt[2]{D_{12} \cdot D_{23}} \quad (6-7)$$

$$D_m = \sqrt[2]{1,8275 \cdot 1,7183}$$

$$D_m = 1,7721 \text{ m}$$

Jedinični induktivitet i kapacitet faze  $L_2$  imaju vrijednosti:

$$L_{L_2} = 1,2828 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$C_{L_2} = 8,6618 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

Na kraju, srednja geometrijska udaljenost faze  $L_3$  računa se izrazom:

$$D_m = \sqrt[2]{D_{13} \cdot D_{23}} \quad (6-8)$$

$$D_m = \sqrt[2]{1,615 \cdot 1,7183}$$

$$D_m = 1,6558 \text{ m}$$

Jedinični induktivitet i kapacitet faze  $L_3$  imaju vrijednosti:

$$L_{L_3} = 1,2692 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$$

$$C_{L_3} = 8,7545 \cdot 10^{-9} \text{ F/km}$$

Iz prethodno navedenih podataka izračunate su srednje ukupne vrijednosti induktiviteta i kapaciteta nadzemnog voda:

$$L = \frac{L_{L_1} + L_{L_2} + L_{L_3}}{3} = 1,2762 \cdot 10^{-3} \text{ H/km} \quad (6-9)$$

$$C = \frac{C_{L_1} + C_{L_2} + C_{L_3}}{3} = 8,7067 \cdot 10^{-9} \text{ F/km} \quad (6-10)$$

U konačnici je potrebno definirati djelatni otpor. Ovo poglavlje ne prikazuje njegov izračun, već je iz tablice 6.2. preuzeta njegova ukupna srednja vrijednost.

Tablica 6.2. Konstrukcijske karakteristike vodiča [17]

Dimenzije – nazivni presjek	Računski presjek	Konstrukcija		Vanjski promjer	Težina	Dopuštena sila napreznja	Otpor vodiča pri 20 °C	Dopuštena struja
		Al	Fe					
Al/Fe	ukupni				Neto		maks.	
mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>			mm	kg/km	N	Ω/km	A
16/2,5	17,8	6x1,80	1x1,80	5,4	62	5,825	1,878	90
25/4	27,8	6x2,25	1x2,25	6,8	97	9,030	1,200	125
35/6	40,0	6x2,70	1x2,70	8,1	140	12,660	0,835	145
44/32	75,7	14x2,00	7x2,40	11,2	378	45,500	0,657	
50/8	56,3	6x3,20	1x3,20	9,6	196	17,140	0,595	170
50/30	81,0	12x2,33	7x2,33	11,7	383	44,225	0,564	290
70/12	81,3	26x1,85	7x1,44	11,7	285	26,315	0,413	290
95/15	109,7	26x2,15	7x1,67	13,6	384	35,140	0,306	350
95/55	152,8	12x3,20	7x3,20	16,0	722	80,200	0,299	350
105/75	181,5	14x3,10	19x2,25	17,5	907	106,635	0,274	
120/20	141,4	26x2,44	7x1,90	15,5	496	44,885	0,237	410
120/70	193,3	12x3,60	7x3,60	18,0	913	98,195	0,236	410
125/30	157,7	30x2,33	7x2,33	16,3	595	57,800	0,226	425
150/25	173,1	26x2,70	7x3,10	17,1	607	54,315	0,194	470
170/40	211,9	30x2,70	7x2,70	18,9	798	77,040	0,168	520
185/30	213,6	26x3,00	7x2,33	19,0	748	66,225	0,157	535
210/35	243,2	26x3,20	7x2,49	20,3	852	74,950	0,138	590
210/50	261,6	30x3,00	7x3,00	21,0	986	92,275	0,136	610
230/30	260,7	24x3,50	7x2,33	21,0	878	73,030	0,125	630
240/40	282,5	26x3,45	7x2,68	21,8	990	86,460	0,119	645
265/35	297,8	24x3,74	7x2,49	22,4	1,003	82,955	0,109	680
300/50	353,7	26x3,86	7x3,00	24,4	1,239	105,120	0,949	740
305/40	344,1	54x2,68	7x2,68	24,1	1,160	99,305	0,949	740
340/30	369,1	48x3,00	7x2,33	25,0	1,177	92,505	0,085	
360/57	416,5	26x4,20	7x3,20	26,4	1,449	125,245	0,080	
360/57	417,5	26x4,20	19x1,96	26,6	1,468	125,245	0,080	
380/50	431,5	54x3,00	7x3,00	27,0	1,454	120,990	0,076	840
385/35	420,1	48x3,20	7x2,49	26,7	1,341	104,315	0,075	
435/55	490,6	54x3,20	7x3,20	28,8	1,654	136,275	0,059	900
450/40	488,2	48x3,45	7x2,68	28,7	1,557	120,195	0,064	
490/65	553,9	54x3,40	7x3,40	30,6	1,868	152,915	0,059	960
495/35	528,2	45x3,74	7x2,49	29,9	1,639	120,280	0,058	
510/45	555,5	48x3,68	7x2,87	30,7	1,775	134,295	0,057	
550/70	621,3	54x3,60	7x3,60	32,4	2,094	167,530	0,051	1020
560/50	611,2	48x3,86	7x3,00	32,2	1,950	146,300	0,051	
570/40	610,3	45x4,02	7x2,68	32,2	1,895	138,000	0,051	
650/45	698,5	45x4,30	7x2,87	34,4	2,169	155,550	0,044	
680/85	764,8	54x4,00	19x2,40	36,0	2,573	210,055	0,043	1150

Za alučelično uže nazivnog presjeka 50/8 mm<sup>2</sup> definiran je djelatni otpor iznosa:

$$R = 0,595 \Omega/km$$

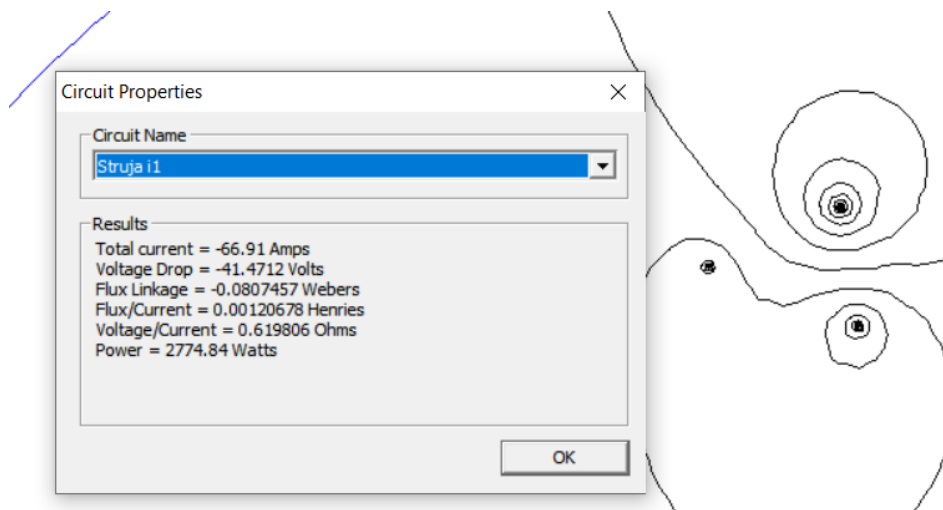


## 6.2. Ispis jediničnih parametara voda u programskom paketu FEMM

Za ispis rezultata jediničnog djelatnog otpora i induktiviteta simulacije prethodno navedenog nadzemnog voda potrebno je ponovno otvoriti prethodno kreiranu magnetostatsku simulaciju nadzemnog voda oblika glave stupa „Jela“ te pokrenuti simulaciju. Nakon pokretanja simulacije potrebno je kliknuti na ikonu prikazanu slikom 6.4. koja otvara prozor pod nazivom „Circuit properties“ prikazan slikom 6.5.



Slika 6.4. Ikona za ispis parametara magnetostatike vodiča



Slika 6.5. Prozor „Circuit properties“ s ispisanim parametrima magnetostatike vodiča

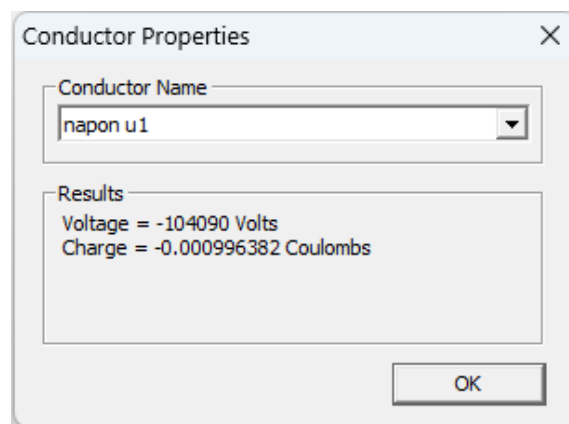
Potrebno je napomenuti kako je prije pokretanja simulacije nužno kliknuti na izbornik „Problem“ te veličinu „Depth“ promijeniti u vrijednost 1000. Tada program FEMM računa parametre po dužini iznosa 1000 m, što je i potrebno jer se jedinični parametri navode po kilometru dužine vodiča.

Nadalje, u prozoru „*Circuit properties*“ moguće je odabrati kojoj fazi ispisati parametre. Na slici 6.5. su istaknute vrijednosti jediničnog djelatnog otpora i jediničnog induktiviteta faze  $L_1$  kojom teče struja iznosa  $i_1$ , a imaju sljedeće vrijednosti:

$$R_{L_1} = 0.00102 \Omega/km$$

$$L_{L_1} = 1.18592 \cdot 10^{-3} H/km$$

Potrebno je još samo definirati jedinični kapacitet faze  $L_1$  za koji je potrebno otvoriti elektrostatsku simulaciju nadzemnog voda oblika glave stupa „Jela“ te prije pokretanja simulacije ponovno promijeniti vrijednost veličine „*Depth*“ na 1000. Zatim klikom na ikonu prikazanu slikom 6.4. program otvara prozor pod imenom „*Conductor properties*“ prikazan slikom 6.6.



Slika 6.6. Prozor „*Circuit properties*“ s ispisanim parametrima elektrostatičke vodiča

Slika 6.6. prikazuje trenutni napon i naboj faze  $L_1$  koji iznose:

$$u_1 = 104090 V$$

$$q_1 = 0.000996 C$$

Pomoću navedenih parametara jedinični kapacitet faze  $L_1$  računa se izrazom:

$$C_{L_1} = \frac{q_1}{u_1} = \frac{0.000996}{104090} = 9,5686 \cdot 10^{-9} F/km.$$

Za izračun  $R$ ,  $L$  i  $C$  parametara preostalih dviju faza primjenjuje se identičan postupak te su izračunati slijedeći rezultati za fazu  $L_2$ :

$$R_{L_2} = 0,00102 \Omega/km$$

$$L_{L_2} = 1,2228 \cdot 10^{-3} H/km$$

$$C_{L_2} = 9,3613 \cdot 10^{-9} F/km$$

I u konačnici za fazu  $L_3$ :

$$R_{L_3} = 0,00102 \Omega/km$$

$$L_{L_3} = 1,2238 \cdot 10^{-3} H/km$$

$$C_{L_3} = 9,4189 \cdot 10^{-9} F/km$$

Istim načinom kao i u prethodnom poglavlju, izračunate su srednje ukupne vrijednosti  $R$ ,  $L$  i  $C$  parametara čiji rezultati iznose:

$$R = 0,00102 \Omega/km$$

$$L = 1,21084 \cdot 10^{-3} H/km$$

$$C = 9,4496 \cdot 10^{-9} F/km$$

### 6.3. Usporedba rezultata SGU metode i programskog paketa FEMM

U ovom poglavlju uspoređeni su rezultati izračuna  $R$ ,  $L$  i  $C$  parametara dobivenih SGU metodom i programom FEMM. Tablica 6.2. prikazuje iznose jediničnih parametara, dok tablica 6.3. prikazuje iznose ukupnih srednjih vrijednosti parametara nadzemnog voda.

Tablica 6.2. Prikaz i usporedba rezultata jediničnih parametara nadzemnog voda

FAZE NADZEMNOG VODA	JEDINIČNI PARAMETRI NADZEMNOG VODA	SGU METODA	PROGRAMSKI PAKET FEMM
FAZA $L_1$	$R_{L_1}$ [ $\Omega/km$ ]	–	0,6198
	$L_{L_1}$ [ $H/km$ ]	$1,2766 \cdot 10^{-3}$	$1,1893 \cdot 10^{-3}$
	$C_{L_1}$ [ $F/km$ ]	$8,7039 \cdot 10^{-9}$	$9,5723 \cdot 10^{-9}$
FAZA $L_2$	$R_{L_2}$ [ $\Omega/km$ ]	–	0,6198
	$L_{L_2}$ [ $H/km$ ]	$1,2828 \cdot 10^{-3}$	$1,2288 \cdot 10^{-3}$
	$C_{L_2}$ [ $F/km$ ]	$8,6618 \cdot 10^{-9}$	$9,3651 \cdot 10^{-9}$
FAZA $L_3$	$R_{L_3}$ [ $\Omega/km$ ]	–	0,6198
	$L_{L_3}$ [ $H/km$ ]	$1,2692 \cdot 10^{-3}$	$1,2261 \cdot 10^{-3}$
	$C_{L_3}$ [ $F/km$ ]	$8,7545 \cdot 10^{-9}$	$9,4189 \cdot 10^{-9}$

Tablica 6.2. Prikaz i usporedba rezultata ukupnih srednjih vrijednosti parametara nadzemnog voda

UKUPNE SREDNJE VRIJEDNOSTI PARAMETARA NADZEMNOG VODA	SGU METODA	PROGRAMSKI PAKET FEMM
<i>Djelatni otpor R</i> [ $\Omega/km$ ]	0,595	0,6198
<i>Induktivitet L</i> [ $H/km$ ]	$1,2762 \cdot 10^{-3}$	$1,2147 \cdot 10^{-3}$
<i>Kapacitet C</i> [ $F/km$ ]	$8,7067 \cdot 10^{-9}$	$9,4521 \cdot 10^{-9}$

## 7. ZAKLJUČAK

Izračun vrijednosti magnetskih i električnih polja nužan je za uredan rad elektroenergetskog sustava, kao i za provjeru kriterija sigurnosti po pitanju zdravlja izloženih ljudi. Izloženost elektromagnetskim pojavama nadzemnih vodova je najčešća kod stručnog osoblja koje vrši ugradnju, popravak ili kontrolu rada istih, stoga se nadzemni vodovi trebaju parametrirati na način da poštuju ograničenja profesionalne izloženosti prikazanih tablicom 5.2. U ovom diplomskom radu dokazano je da raspored nadzemnih vodova utječe na vrijednosti elektromagnetskih pojava u okolišu nadzemnih vodova te da se promjenom međusobne udaljenosti vodiča može utjecati na veličinu tih iznosa. Vrijednosti električnih i magnetskih polja prethodnih simulacija uspoređene su s graničnim vrijednostima pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja te je zaključeno da svi simulirani nadzemni vodovi imaju optimalne rezultate za profesionalnu izloženost u trenutku u kojem su izračunati. Prema rezultatima simulacija i tablici 5.3., najveće vrijednosti gustoće električnog polja i jakosti električnog polja dobivene su za raspored nadzemnih vodova po obliku glave stupa Jela, a najmanje vrijednosti prikazuje simulacija za oblik glave stupa Gama. Najveće vrijednosti gustoće magnetskog toka i jakosti magnetskog polja prikazuje simulacija nadzemnih vodova raspoređenih po obliku glave stupa Delta, a najmanje vrijednosti su dobivene rasporedom po glavi stupa Jela. Obavljenim analitičkim i programskim proračunom te usporedbom jediničnih i ukupnih srednjih vrijednosti parametara voda prikazanih tablicama 6.2. i 6.3. vidljiva su manja odstupanja u jediničnim i ukupnim vrijednostima induktiviteta i kapaciteta te veća odstupanja u ukupnoj vrijednosti djelatnog otpora. Rezultati odstupaju iz razloga što SGU metoda za proračun koristi formule koje su prethodno definirane nekakvim srednjim vrijednostima koje se uglavnom temelje na udaljenostima između vodiča, dok program FEMM uzima u obzir puno više parametara koji utječu na kvalitetniji izračun. Iz navedenih razloga se FEMM-ovi rezultati smatraju preciznijima. Potrebno je napomenuti kako su sve veličine mjerene u trenutku  $t = 3s$  te nisu stalnog iznosa jer su vremenski promjenjive. FEMM se pokazao optimalnim programom za predodžbu o ponašanju elektromagnetskih pojava te na jednostavan način pokazuje kako tim pojavama manipulirati. Iz navedenih razloga je pogodan u edukativne svrhe, no napretkom tehnologije danas postoje puno brži, kvalitetniji i precizniji 3D programi koji su ipak pogodniji za izračun ovakvih vrijednosti, pogotovo kada je u pitanju ljudska sigurnost.

## 8. LITERATURA

1. Z. Haznadar, Ž. Štih, Elektromagnetizam – 1, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
2. Električni naboj, u Hrvatska enciklopedija, dostupno na: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17585> [30.5.2024.]
3. N. Brković, P. Pećina, Fizika u 24 Lekcije, Element, Zagreb, 2013.
4. Električni energentski vod, u Hrvatska enciklopedija, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17577> [30.5.2024.]
5. Električni vodič, u Hrvatska enciklopedija, dostupno na : <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=71017> [10.6.2024.]
6. M. Delimar, Prijenos i razdjela električne energije: Zapisi s predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2017., dostupno na: [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/PRIJENOS\\_I\\_RAZDJELA\\_ELEKTRICNE\\_ENERGIJE.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/PRIJENOS_I_RAZDJELA_ELEKTRICNE_ENERGIJE.pdf) [15.06.2024.]
7. R.A. Serway, J.W. Jewett, V. Peroomian, Physics for scientists and engineers, Saunders college publishing, Philadelphia, 2000.
8. S. Galović, M. Srdelić, Fizika 2: Magneti i magnetsko polje [online], Hrvatska akademska i istraživačka mreža – CARNET, Zagreb, 2024, dostupno na: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7578\\_Magneti\\_i\\_magnetsko\\_polje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/7578_Magneti_i_magnetsko_polje.html) [20.06.2024.]
9. D. Meekeer, Finite Element Method Magnetics : HomePage, dostupno na : <https://www.femm.info/wiki/HomePage> [30.5.2024.]
10. Metoda konačnih elemenata, Struna – Hrvatsko strukovno nazivlje, dostupno na: <http://struna.ihjj.hr/naziv/metoda-konacnih-elemenata/33028/> [20.06.2024.]
11. D. Horvat, Analiza elektroenergetskog kabela primjenom računalnog programa za numeričke simulacije elektromagnetskih polja, Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2020.
12. N. Furčić, Z. Varga, Elektrotehnika i elektronika 1 : udžbenik za 2. razred srednjih strukovnih škola za zanimanje, Element, Zagreb, 2021.
13. J. Zeba, Numerička analiza čeličnog rešetkastog stupa dalekovoda, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.

14. Narodne novine, Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja [online], Narodne novine d.d., Zagreb, 2003 dostupno na : [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2003\\_12\\_204\\_3306.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2003_12_204_3306.html), [11.9.2017.]
15. M. Ožegović, K. Ožegović, Električne energetske mreže I, FESB, Split, 1996.
16. I. Šegota, Određivanje induktiviteta nadzemnih vodova s vodičima u snopu, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2022.
17. Tim Kabel, Konstrukcija užeta [online], Tim Kabel, Zagreb, 2024, dostupno na: <https://www.tim-kabel.hr/content/view/273/342/lang,hrvatski/> [07.09.2024]



## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisana je elektromagnetska analiza nadzemnih vodova primjenom simulacijskih alata. U uvodu je opisana kratka povijest i važnost električnih i magnetskih polja, kao i opis zadatka diplomskog rada. U 2. poglavlju prikazana su elementarna svojstva električnih i magnetskih polja. Poglavlje 3. opisuje konstrukciju nadzemnih vodova, kao i elemente od kojih se sastoje. 4. poglavlje prikazuje mogućnosti i funkcije simulacijskog programa FEMM. U poglavlju 5. prikazane su simulacije i rezultati električnih i magnetskih polja za različite glave stupa nadzemnih vodova. Na kraju, u 6. poglavlju je opisan proračun jediničnih parametara voda koji je tablično uspoređen s rezultatima programa FEMM.

Ključne riječi: električno polje, magnetsko polje, gustoća magnetskog toka, gustoća električnog polja, nadzemni vodovi, FEMM, djelatni otpor, induktivitet, kapacitet, SGU metoda

## ABSTRACT

In this thesis, an electromagnetic analysis of overhead power lines using simulation tools is described. The introduction provides a brief history and importance of electric and magnetic fields, as well as an overview of the thesis task. Chapter 2 presents the fundamental properties of electric and magnetic fields. Chapter 3 describes the construction of overhead power lines and the elements they consist of. Chapter 4 outlines the capabilities and functions of the FEMM simulation program. Chapter 5 presents the simulations and results of electric and magnetic fields for different overhead line tower heads. Finally, Chapter 6 provides a calculation of the unit parameters of the lines, which is compared in tabular form with the results of the FEMM program.

Keywords: electric field, magnetic field, magnetic flux density, electric field density, overhead power lines, FEMM, active resistance, inductance, capacitance, SGU method

## ŽIVOTOPIS

Marko Filipović rođen je u Osijeku 23. ožujka 1998. godine. Živi i odrasta u Čepinu gdje je pohađao osnovnu školu „Miroslav Krleža“. Nakon završene osnovne škole 2012. godine odlučuje upisati Opću gimnaziju u Osijeku te se tijekom treće školske godine prebacuje u Prirodoslovno - matematičku gimnaziju u Osijeku. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja upisuje se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te odabire stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Nakon završenog stručnog studija stječe zvanje bacc.ing.el i upisuje program razlikovnih obveza na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku u svrhu upisa diplomskog studija. 2021. godine redovno upisuje diplomski studij Elektrotehnika, smjer elektroenergetika.

---

Potpis autora