

# Električno i magnetsko polje prijenosnih vodova za različite konfiguracije stupova dalekovoda

---

**Budim, Nikola**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:200:800327>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*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**

**ELEKTRIČNO I MAGNETSKO POLJE ZA RAZLIČITE  
KONFIGURACIJE STUPOVA DALEKOVODA**

**Diplomski rad**

**Nikola Budim**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. UVOD</b> .....                            | <b>1</b>  |
| <b>2. PREGLED LITERATURE</b> .....              | <b>2</b>  |
| <b>3. ELEKTRIČNO POLJE</b> .....                | <b>3</b>  |
| 3.1. Električno polje točkastog naboja .....    | 3         |
| 3.2. Električne silnice i tok vektora $E$ ..... | 4         |
| <b>4. MAGNETSKO POLJE</b> .....                 | <b>5</b>  |
| 4.1. Biot-Savartov zakon.....                   | 5         |
| 4.2. Ampereov zakon protjecanja .....           | 5         |
| <b>5. STUPOVI DALEKOVODA</b> .....              | <b>7</b>  |
| 5.1. Temelji stupova .....                      | 8         |
| 5.2. Materijal i izvedba stupova .....          | 8         |
| 5.3. Vrste stupova .....                        | 10        |
| <b>6. SIMULACIJA I REZULTATI</b> .....          | <b>12</b> |
| 6.1. Opis modela .....                          | 12        |
| 6.2. Pravilnici i norme.....                    | 12        |
| 6.3. 110 kV stup .....                          | 15        |
| 6.3.1. Električno polje .....                   | 15        |
| 6.3.2. Magnetsko polje .....                    | 17        |
| 6.4. 220 kV stup .....                          | 19        |
| 6.4.1. Električno polje .....                   | 19        |
| 6.4.2. Magnetsko polje .....                    | 21        |
| 6.5. 400 kV stup- dvosistemski .....            | 23        |
| 6.5.1. Električno polje .....                   | 23        |
| 6.5.2. Magnetsko polje .....                    | 25        |
| 6.6. 400 kV stup- „mačka stup“ .....            | 27        |
| 6.6.1. Električno polje .....                   | 27        |
| 6.6.2. Magnetsko polje .....                    | 29        |
| <b>7. ZAKLJUČAK</b> .....                       | <b>32</b> |
| <b>8. SAŽETAK</b> .....                         | <b>33</b> |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>9. ABSTRACT .....</b> | <b>34</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>  | <b>35</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>    | <b>36</b> |

## 1. UVOD

Elektroenergetski sustav izgrađen je od različitih vrsta stupova dalekovoda ovisno o naponu koji je potrebno prenijeti i gdje se taj stup nalazi (na primjer, u nekom naseljenom mjestu, na oranici, planini). Budući da postoje razne konfiguracije stupova dalekovoda, u ovom radu su obrađena 4 primjera stupa koja se najčešće koriste za prijenos i distribuciju električne energije u Republici Hrvatskoj. Određujući stup koji će se nalaziti na određenom dijelu trase dalekovoda, potrebno je znati zakonske odredbe koje kazuju granične vrijednosti jakosti električnog i magnetskog polja za razna područja. Potrebno je paziti na vrijednosti jakosti elektromagnetskih polja jer elektromagnetsko zračenje može biti jako štetno za živi svijet. Tako su odrađeni mnogi stručni radovi koji govore o štetnosti zračenja.

Tema ovog rada je objasniti izračun električnog i magnetskog polja u blizini vodova dalekovoda te, također, prikazati dozvoljene vrijednosti električnog i magnetskog polja za različita područja gdje se vodovi nalaze. Također u simulacijskom modelu u programskom paketu XGSLab za različite konfiguracije stupova dalekovoda izračunati i prikazati grafičke prikaze vrijednosti jakosti električnog i magnetskog polja na površini zemlje u ovisnosti o udaljenosti od osi dalekovoda.

## 2. PREGLED LITERATURE

U literaturi [1] se navodi važnost električnog i magnetskog polja kako za okoliš tako i za ljude. Sam dalekovod kao i stupovi dalekovoda ponekad moraju proći kroz naseljena mjesta te zbog toga moraju se znati točne vrijednosti jakosti električnog i magnetskog polja. Također u literaturi [2] se navodi da povećanjem vrijednosti napona i struje dalekovoda, može doći do problema između nadzemnih vodova i vodljivih objekata koji su povezani sa elektrostatskim i elektromagnetskim spajanjem. Provedeno je dosta istraživanja o utjecaju elektromagnetskih polja na okolinu. Tako u literaturi [3] mogu se vidjeti da je prijenos električne energije praćen stvaranjem niskofrekventnih elektromagnetskih polja. Kao i u [2] literatura [3] prikazuje zabrinutost mogućnosti štetnih utjecaja za razne žive organizme kao i rad električnih i elektroničkih uređaja. Dopusštena vrijednost magnetskog polja prema prethodnim studijama iznosi od  $4\text{-}100\mu\text{T}$  za ljude, ali to sve ovisi o postotku površine ljudskog tijela u odnosu na vrijednost linijske struje. Magnetsko polje nastaje gdje postoji i kretanje električnog naboja. Stoga, magnetsko polje je proporcionalno struji koja teče kroz vodič, a ne ovisi o naponu. [4-5] Literatura [6] navodi da u okolini vodiča koji je pod naponom te koji vodi struju stvara se električno i magnetsko polje. Tako silnice magnetskog polja obuhvaćaju vodič, dok silnice električnog polja padaju ortogonalno. U literaturi [7] je opisan socijalni fenomen, točnije negativni utjecaj emisije zračenja iz raznih elektroenergetskih objekata. Također, u literaturi [7] su navedene referentne razine za javna područja koja preporučuje ICNIRP i Europski parlament čija vrijednost iznosi  $5\text{ kV/m}$  i  $200\ \mu\text{T}$  za frekvenciju od  $50\text{ Hz}$  dok epidemiolozi navode ograničenja za magnetsko polje od  $0,3$  do  $0,4\ \mu\text{T}$ .

### 3. ELEKTRIČNO POLJE

Električno polje je posebno fizičko stanje u okolini naelektriziranog tijela, odnosno električnog naboja, koje se očituje u mehaničkoj sili ( $\vec{F}$ ) koja djeluje na pokusni naboj ( $Q_0$ ) unesen u električno polje. [6] Također, električno polje je vektorska veličina te se računa kao omjer mehaničke sile i pokusnog naboja. Jakost električnog polja se računa kao omjer mehaničke sile ( $F$ ) i naboja ( $Q$ ). Mjerna jedinica jakosti električnog polja je volt po metru (V/m).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{Q_0} \quad (3-1)$$

Polje ne postoji kao fizička pojava, više koristi za opis uzajamnog djelovanja električnog naboja. Važno je napomenuti također, ako se naboji gibaju, javlja se i magnetsko polje tj. stvara se elektromagnetsko polje koje se širi u obliku elektromagnetskih valova nekom konačnom brzinom.

#### 3.1. Električno polje točkastog naboja

Ako se želi odrediti jakost električnog polja oko nekog naboja ( $Q$ ), u prostor moramo unijeti pokusni naboj ( $Q_0$ ) jer uz pomoć njega možemo točno odrediti jakost električnog polja u bilo kojoj točki. Jako je važno predstaviti pokusni naboj kao jako malen kako ne bi utjecao na električno polje na određenom naboju u prostoru, pokusni naboj se predstavlja većinom kao pozitivno nabijen. Točkasti naboj se koristi samo kao matematički model uz pomoć kojeg možemo odrediti električno polje električnog naboja. Vektor električnog polja točkastog naboja računa se uz pomoć izraza:

$$\vec{E} = k_0 \frac{Q}{r^2} \vec{r}_0 \quad r > 0 \quad (3-2)$$

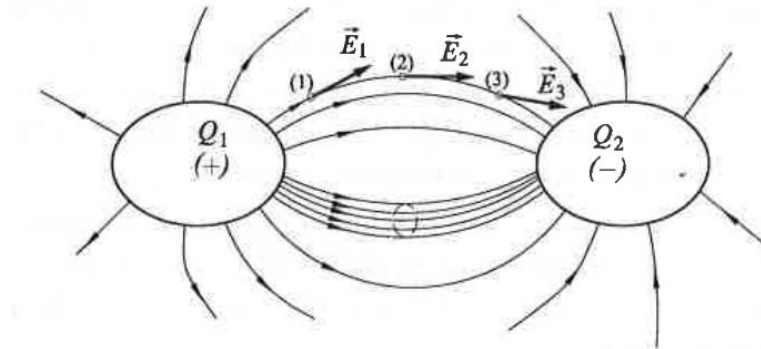
$r$ - udaljenost točke od točkastog naboja ( $Q$ )

$\vec{r}_0$  –jedinični vektor usmjeren od izvora polja prema promatranoj točki

Jakost električnog polja opada kvadratom udaljenosti, dakle što smo bliže promatranoj točki jakost polja se naglo povećava te izrazi za jakost električnog polja vrijede samo za  $r > 0$ .

### 3.2. Električne silnice i tok vektora $\vec{E}$

Za prikazivanje i lakše shvaćanje vizualnog prikaza kako električnog tako i magnetskog polja potrebno se zahvaliti M. Faradeyu koji je prvi uveo pojam linija sile. Silnice električnog polja se prikazuju kao zamišljene linije kojima je svaki vektor polja tangenta u toj točki.



Slika 3.1. Silnice električnog polja [7]

Kao što je vidljivo na slici 3.1, silnice električnog polja izvire iz pozitivnog naboja, a uviru u negativni naboj. Također, silnice se nikad ne presijecaju jer je jakost električnog polja jednoznačno određena u svakoj točki. Broj silnica nekog polja je konstantan, ali što se više udaljavaju od naboja i njihova gustoća se smanjuje. Dakle, iz tog možemo zaključiti da je na mjestu gdje su silnice najgušće i električno polje je najjače. Zahvaljujući ovome možemo zaključiti da je električno polje nehomogeno jer je gustoća silnica promjenjiva. Za računanje električnog toka nehomogenog električnog polja potrebno je površinu podijeliti na elementarne površine, zato se za lakše shvaćanje električnog toka koristi homogeno električno polje, čija formula kroz ravnu površinu (S) izgleda:

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{S} = EScos\alpha \quad (3-2)$$

Iz formule vidimo da je tok skalarna veličina i hoće li vrijednost toka biti pozitivna ili negativna ovisi o kutu  $\alpha$ . Ako je kut  $\alpha < 90^\circ$  tok je pozitivan, a ako je  $\alpha = 90^\circ$  tok ne postoji.



## 4. MAGNETSKO POLJE

Gibanjem dvaju naboja osim električnog polja, javlja se još jedna dodatna sila. Ta sila je posljedica magnetskog polja. Veličina kojom se opisuje magnetsko polje je magnetska indukcija ( $B$ ). Magnetsku indukciju stvorio je gibajući naboj  $Q_1$  na mjestu naboja  $Q_2$ , a njen iznos je prikazan:

$$B = \mu_0 \frac{Q_1 v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (4-1)$$

gdje je  $\mu_0$  konstanta koja označava permeabilnost vakuumu.

Magnetska indukcija ( $\vec{B}$ ) je vektorska veličina, a mjerna jedinica je tesla (T). Budući da je magnetska indukcija ( $\vec{B}$ ) vektorska veličina, kao i brzina ( $\vec{v}$ ) kojom se naboj ( $Q_1$ ) giba u magnetskom polju tako magnetsku silu možemo prikazati na sljedeći način:

$$\vec{F}_m = Q_1(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4-2)$$

### 4.1. Biot-Savartov zakon

Vektor magnetske indukcije ( $d\vec{B}$ ) okomit je na ravninu koju čine vektori  $d\vec{l}$  i  $\vec{r}^0$ , a smjer mu je određen po pravilu desnog vijka u odnosu na smjer struje. Taj smjer se lako odredi tako da se palac desne ruke postavi u smjeru struje i tada prsti pokazuju smjer magnetske indukcije. Budući da se strujni element ( $I d\vec{l}$ ) ne može izdvojiti iz strujnog kruga, indukciju koju on stvara ne može se direktno izmjeriti. [7]

Jednadžba (4-3) je poznata kao Biot-Savartov zakon:

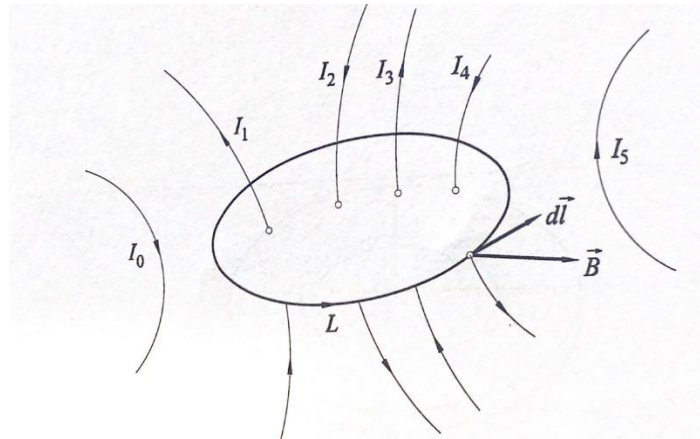
$$d\vec{B} = \mu_0 \frac{I(d\vec{l} \times \vec{r}^0)}{4\pi r^2} \quad (4-3)$$

### 4.2. Ampereov zakon protjecanja

Važno za znati je da su silnice magnetske indukcije uvijek zatvorene linije, a ne kružnice jer silnice ovise o geometriji strujnih vodiča i jakosti struje u njima. Ampere je došao do zakona koji kaže da je krivuljni integral vektora  $\vec{B}$  po zatvorenoj proizvoljnoj konturi  $L$  proporcionalan s algebarskom sumom struja obuhvaćenih tom krivuljom  $L$  bez obzira na oblik strujnog vodiča. [7] Ampereov zakon možemo prikazati ovako:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k \quad (4-4)$$

Prilikom izračuna sume struja važno je paziti koji je referentni smjer struje, tako struje čiji je referentni smjer povezan sa smjerom obilaska konture  $L$  po pravilu desnog vijka ima pozitivan predznak, dok u suprotnom sličaju predznak je negativan.

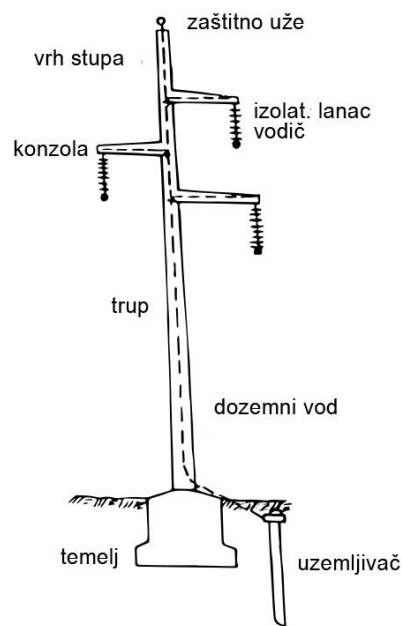


Slika 4.1. Primjer Amperovog zakona protjecanja [7]

## 5. STUPOVI DALEKOVODA

Stupovi dalekovoda služe za zatezanje i nošenje vodiča dalekovoda i zaštitnih užeta. Svi stupovi imaju jednake sastavne dijelove, ali se razlikuju u rasporedu funkcija, materijala od kojih su napravljeni. Sastavni dijelovi svakog stupa dalekovoda (Slika 5.1.) odozdo prema gore su:

- Uzemljivač
- Temelj
- Dozemni vod
- Trup dalekovoda
- Konzola
- Izolacijski lanac
- Vrh stupa
- Zaštitno uže



Slika 5.1. Sastavni dijelovi stupa dalekovoda

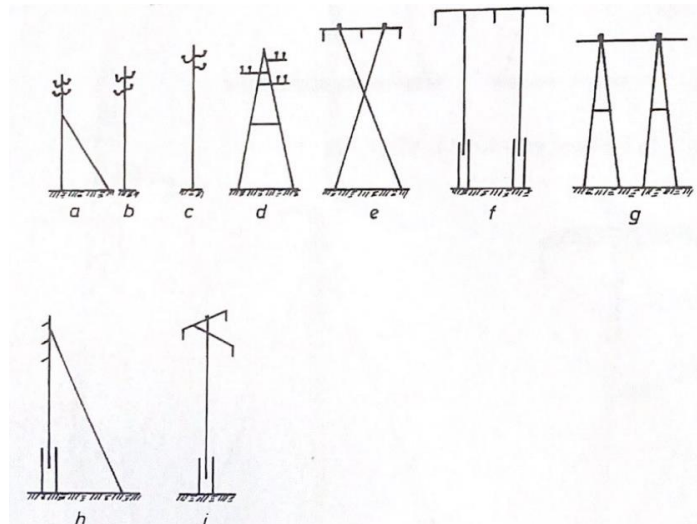
Dakle, svaki stup se sastoji od jednog ili više temelja, uz pomoć trupa se postiže potrebna visina iznad tla, a konzole služe za povezivanje vodiča te na vrh stupa se pričvršćuje zaštitni vodič. Također većina stupova ima i svoj posebni zemljovod koji služi za galvansko povezivanje s uzemljivačem koji se nalazi na tom stupu.

## **5.1. Temelji stupova**

Osnovni zadatak temelja stupova je prenošenje svih sila sa stupa na tlo te fiksiranje stupa. Dakle, temelji moraju biti takvi da pod bilo kakvim djelovanjem određene sile ostanu stabilni te ne dođe do nikakvog pomjeranja. Da bi se to zadovoljilo postoje razne rješenja kao što su razni materijali, oblici, konstrukcije stupa i svojstvo tla. Što se tiče materijala stupova postoje drveni, betonski i čelični stupovi. Što se tiče drvenih stupova oni se mogu direktno ukopati u zemlju ili uz pomoć posebnih nogara na koje se stavlja stup. Nogari mogu biti betonski ili drveni i kao takvi štite stup od propadanja u tlo. Prednost drvenih nogara je što se lako mijenjaju u slučaju truljenja te se ne mora mijenjati cijeli stup. Naravno, betonski nogari su bolji jer osiguravaju veću čvrstoću, stabilnost i trajanje. U nekim posebnim slučajevima, na primjer, kod zateznih stupova moguće je drveni stup pričvrstiti na betonske temelje uz pomoć željeznih nogara. Što se tiče čeličnih stupova ukopaju se pomoću betonskih temelja ili industrijskih izvedenih temeljnih blokova. Najčešće se koriste četiri temeljna bloka. Budući da postoje različite vrste tla, tako se u močvarnim tlima na veću dubinu ukopavaju temeljni blokovi promjera minimalno 1m, dok kod kamenog tla uz pomoć svrdla se buše rupe širine dovoljne za temeljni dio stupa te se beton koristi samo da poveže stup sa kamenom.

## **5.2. Materijal i izvedba stupova**

Postoje razni materijali za izradu stupova dalekovoda. Najčešće se isti materijal koristi pri izradi cijelog stupa, ali također može se i kombinirati više materijala što se slabije koristi u praksi. Prvi materijal koji se koristio za izradu stupova je drvo. Drvo se koristi za vodove manjeg napona, u našim krajevima se koristi za stupove niskonaponskih i 10 kV vodova, rjeđe za 20 kV vodove. Vrste drveta koje se najviše koristi za izradu stupova dalekovoda su bor, hrast, kesten. Koriste se kao obrađeno stablo u prirodnom obliku koje se mora impregnirati kako bi se trajnost povećala do nekih 20 godina. Impregnacija se vrši uz pomoć kreozita i otrovne soli ovisno o vrsti drveta. Najveća prednost drveta je ta što se koristi kao dodatna izolacija pa se samim tim nosači izolatora ne uzemljuju. Također, prednosti drveta su mala težina, jednostavna montaža te jeftina izgradnja, a nedostaci se očituju u izloženosti vanjskim utjecajima što utječe na trajnost drveta te potrebu za stalnim održavanjem.

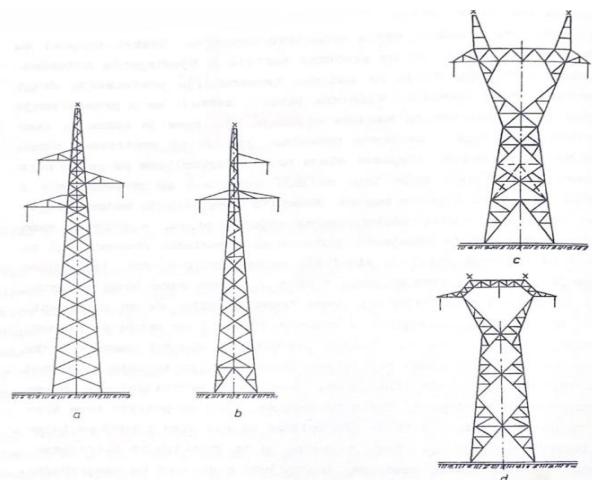


Slika 5.2. Tipične izvedbe drvenih stupova:

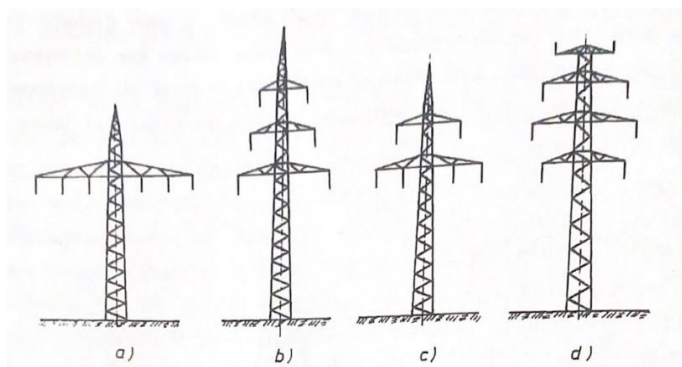
- a) niski napon, kutni; b) niski napon, linijski; c) 10-20 kV, linijski; d) 10-20 kV, kutni A-stup; e) 35 kV, nosivi X-stup; f) 110 kV, nosivi, portal; g) 35-110 kV, zatezni, kutni, „dvostruka piramida“; h) 35 kV, kutni, usidreni jarbol; i) 35-110 kV, nosivi [6]

Također, za izradu stupova dalekovoda koriste se i razni metali. Metal koji se najčešće koristi je čelik. Ovakvi stupovi se grade kao rešetkaste konstrukcije od kutnog profila. Najveći nedostatak čeličnih stupova očituje se u osjetljivosti na koroziju, stoga takvi stupovi zahtijevaju dodatnu zaštitu u vidu dodatnog premaza bojom koja je otporna na vanjske čimbenike, korištenje legiranim čelika...

U današnje vrijeme sve češće se koriste aluminijske legure za izradu stupova jer su takvi stupovi jednostavniji za transport jer su lagani te nema potrebe za posebnom zaštitom od korozije.

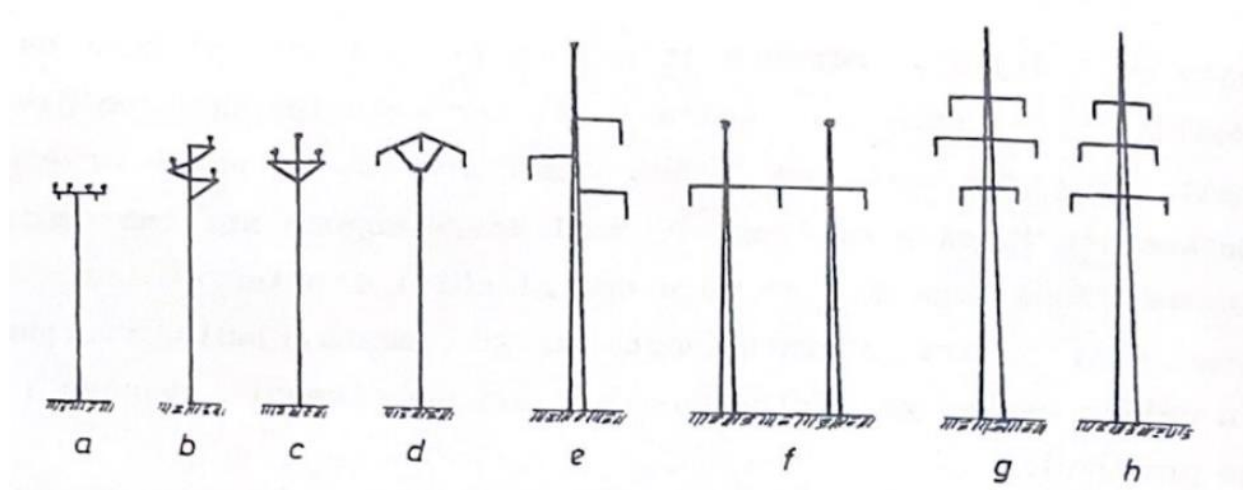


Slika 5.3. Jednostruki čelično-rešetkasti stupovi: a) „jela“; b) modificirana jela; c) Y-stup; d) „mačka“ stup [6]



Slika 5.4. Dvostruki čelično-rešetkasti stupovi: a) horizontalni raspored vodiča; b) dvostruka jela; c) „Dunav“ stup; d) „bačva“ stup [6]

Još jedna materijal koji se često koristi za izradu stupova je armirani beton. Pri izradi stupova od armiranog betona utroši se upola manje čelika nego za izradu čeličnih stupova, samo što su betonski stupovi teški te kao takvi mogu stvarati probleme prilikom transporta i montaže. Prednost ovakvih stupova je velika trajnost bez ikakve potrebe za održavanjem te jednostavan oblik.



Slika 5.5. Tipične izvedbe betonskih stupova: a) niski napon; b), c) i d) 10-20 kV; e) 35-110 kV, „jela“; f) 110 kV, „portal“ stup; g) 35-110 kV, „bačva“ stup; h) 35-110 kV, „dvostruka jela“ [6]

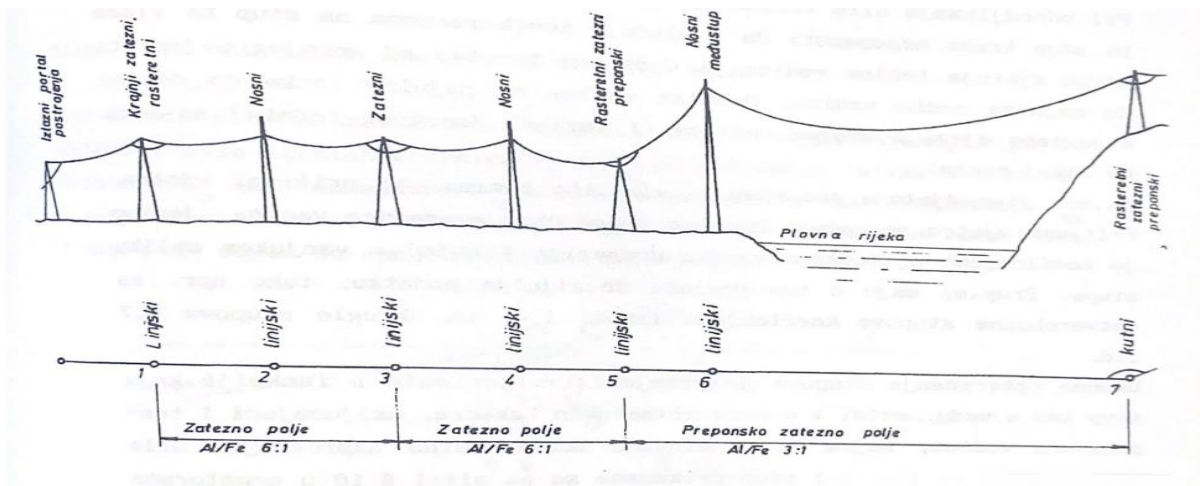
### 5.3. Vrste stupova

Prema svojoj funkciji stupove možemo podijeliti na zatezne i nosive. Nosivi stupovi služe za nošenje vodiča i zaštitnih užeta koji neprekinuto prolaze kraj stupa i nisu odvojeno pričvršćeni na stup s jedne i druge strane. Zatezni stupovi služe ne samo za nošenje nego također i prvenstveno, za zatezanje vodiča i zaštitnih užeta, koji su s obje strane odvojeno pričvršćeni na stup. [6] Stupovi ovisno o položaju mogu biti linijski i kutni. Dakle, i nosivi i zatezni stupovi mogu biti i linijski i kutni, ali nosivi stup može biti kutni samo ako je lom puta neznatan. Što se tiče sila koje djeluju

na stup vlačne sile kod linijskih nosivih stupova se poništavaju te se ne prenose na stup. Kod linijskih zateznih stupova sila na stup se određuje kao razlika sila koje djeluju i s jedne i s druge strane.

Važno je spomenuti i neke od specijalnih stupova koje imaju posebne funkcije u vodu, a to su:

- Krajnji stup - najčešće rasteretni stup koji je zadnji stup na krajevima voda prije spajanja na rasklopno postrojenje
- Preponski stup - na njemu dolazi do najveće promjene dozvoljenog naprežanja vodiča te nije jednako napregnut s obje strane
- Međustup – nosivi stup koji se umeće u zatezno polje kako bi vodiči dobili određenu visinu
- Križišni stup – prilagođen za križanje vodiča dvaju vodova
- Prepletni stup – koristi se za preplitanje vodiča za lakše uspostavljanje simetričnih prilika u vodu što se tiče induktiviteta i kapaciteta.



Slika 5.5. Primjer stupova u trasi dalekovoda [6]

## 6. SIMULACIJA I REZULTATI

### 6.1. Opis modela

Simulacije su izrađene u programskom paketu XGSLab, točnije dio programskog paketa XGSA FD koji koristi frekvencijske domene za izračune električnog i magnetskog polja različitih stupova dalekovoda. Za svaki stup korištene su odgovarajuće koordinate x,y i z kako bi isti bio nacrtan. Zbog različitih kutova pojedine faze struje i napona su unesene u kompleksnom obliku. Udaljenost između dva stupa za koje su rađeni izračuni je bila 400m. Izračuni su rađeni na tri različite visine, a to su:

- na tlu (0m)
- visina čovjeka (2m)
- u razini vodiča (ovisi o visini stupa).

Također izračuni su rađeni na sredini voda jer je tu provjes najveći.

### 6.2. Pravilnici i norme

Radnici koji rade na održavanju dalekovoda moraju biti upoznati sa opasnostima zračenja električnog i magnetskog polja, kao i inženjeri koji projektiraju trase dalekovoda moraju znati granične vrijednosti kako ne bi preveliko zračenje štetilo prirodi, ljudima, životinjama. Tako u Narodnim novinama su izdati razni pravilnici od kojih ću nabrojati dva, a to su: Pravilnik o zaštiti elektromagnetskih polja (2014.) i Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti elektromagnetskih polja (2019.). U Pravilniku o zaštiti elektroenergetskih polja izdate su granične vrijednosti elektromagnetskih polja, postupci provjere i opisana je zaštita ljudi na javnim područjima, područjima povećane osjetljivosti i područjima profesionalne izloženosti. Dok u Pravilniku o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti elektromagnetskih polja opisane su vrijednosti upozorenja i objašnjeno je što je to profesionalna izloženost. A područja profesionalne izloženosti su područja unutar kojih radnik tjedno obavlja 40 sati raznih poslova vezanih za izvore elektromagnetskih polja te je upoznat sa svim rizicima i opasnostima koje se mogu dogoditi, te kao takav ima i posebnu opremu za rad.



Tablica 6.1. Granične razine referentnih veličina za javna područja [9]

| Frekvencijski opseg | Jakost električnog polja E (V/m) | Jakost magnetskog polja H (A/m)     | Gustoća magnetskog toka B (μT)     | Gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala Sekv (W/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| 1-8 Hz              | $10^4$                           | $3,2 \cdot \frac{10^4}{f^2}$        | $4 \cdot \frac{10^4}{f^2}$         |  |
| 8-25 Hz             | $10^4$                           | $4 \cdot \frac{10^3}{f}$            | $5 \cdot \frac{10^3}{f}$           |  |
| 25-800 Hz           | $2,5 \cdot \frac{10^5}{f}$       | $4 \cdot \frac{10^3}{f}$            | $5 \cdot \frac{10^3}{f}$           |  |
| 0,8-3 kHz           | $\frac{250}{f}$                  | 5                                   | 6,25                               |  |
| 3-100 kHz           | 83                               | 5                                   | 6,25                               |  |
| 100-150 kHz         | 83                               | 5                                   | 6,25                               |  |
| 0,15-1 MHz          | 83                               | $\frac{0,73}{f}$                    | $\frac{0,92}{f}$                   |  |
| 1-10 MHz            | $\frac{83}{\sqrt{f}}$            | $\frac{0,73}{f}$                    | $\frac{0,92}{f}$                   |  |
| 10-400 MHz          | 26                               | $6,9 \cdot 10^{-2}$                 | $8,7 \cdot 10^{-2}$                | 1,8  |
| 400-2000 MHz        | $1,3 \cdot \sqrt{f}$             | $3,45 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$ | $4,3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$ | $4,5 \cdot 10^{-3} \cdot f$                                      |
| 2-10 GHz            | 58                               | 0,15                                | 0,19                               | 8,9  |
| 10-300 GHz          | 58                               | 0,15                                | 0,19                               | 8,9  |

Tablica 6.2. Granične razine referentnih veličina za područja povećane osjetljivosti [9]

| Frekvencijski opseg | Jakost električnog polja E (V/m) | Jakost magnetskog polja H (A/m)     | Gustoća magnetskog toka B (μT)      | Gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala Sekv (W/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1-8 Hz              | $4 \cdot 10^3$                   | $1,28 \cdot \frac{10^4}{f^2}$       | $1,6 \cdot \frac{10^4}{f^2}$        | -  |
| 8-25 Hz             | $4 \cdot 10^3$                   | $1,6 \cdot \frac{10^3}{f}$          | $2 \cdot \frac{10^3}{f}$            | -  |
| 25-800 Hz           | $\frac{10^5}{f}$                 | $1,6 \cdot \frac{10^3}{f}$          | $2 \cdot \frac{10^3}{f}$            | -  |
| 0,8-3 kHz           | $\frac{100}{f}$                  | 2                                   | 2,5                                 | -  |
| 3-100 kHz           | 34,8                             | 2                                   | 2,5                                 | -  |
| 100-150 kHz         | 34,8                             | $\frac{175}{f}$                     | $\frac{220}{f}$                     | -  |
| 0,15-1 MHz          | 34,8                             | $\frac{0,292}{f}$                   | $\frac{0,368}{f}$                   | -  |
| 1-10 MHz            | $\frac{34,8}{\sqrt{f}}$          | $\frac{0,292}{f}$                   | $\frac{0,368}{f}$                   | -  |
| 10-400 MHz          | 11,2                             | 0,0292                              | 0,0368                              | 0,326  |
| 400-2000 MHz        | $0,55 \cdot \sqrt{f}$            | $1,48 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$ | $1,84 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$ | $\frac{f}{1250}$   |
| 2-10 GHz            | 24,4                             | 0,064                               | 0,08                                | 1,6  |
| 10-300 GHz          | 24,4                             | 0,064                               | 0,08                                | 1,6  |

Gledajući tablicu 6.1. i znajući da je frekvencija sustava 50 Hz, granične vrijednosti za javna područja iznose za jakost električnog polja 5000 V/m, a iznos za gustoću magnetskog toka je 100 μT.

Tablica 6.3. Vrijednosti upozorenja za izloženost električnim poljima od 1 Hz do 10 MHz [10]

| Raspon frekvencije                 | Niske vrijednosti upozorenja (ALs(E)) za jakost električnog polja (E) [Vm <sup>-1</sup> ] (RMS) | Visoke vrijednosti upozorenja (ALs(E)) za jakost električnog polja (E) [Vm <sup>-1</sup> ] (RMS) |
|------------------------------------|---|--|
| $1 \leq f < 25$ Hz                 | $2,0 \times 10^4$   | $2,0 \times 10^4$  |
| $25 \leq f < 50$ Hz                | $5,0 \times 10^5/f$   | $2,0 \times 10^4$  |
| $50 \text{ Hz} \leq f < 1,64$ kHz  | $5,0 \times 10^5/f$   | $1,0 \times 10^6/f$  |
| $1,64 \leq f < 3$ kHz              | $5,0 \times 10^5/f$   | $6,1 \times 10^2$  |
| $3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz | $1,7 \times 10^2$   | $6,1 \times 10^2$  |

Tablica 6.4. Vrijednosti upozorenja za izloženost magnetskim poljima od 1 Hz do 10 MHz [10]

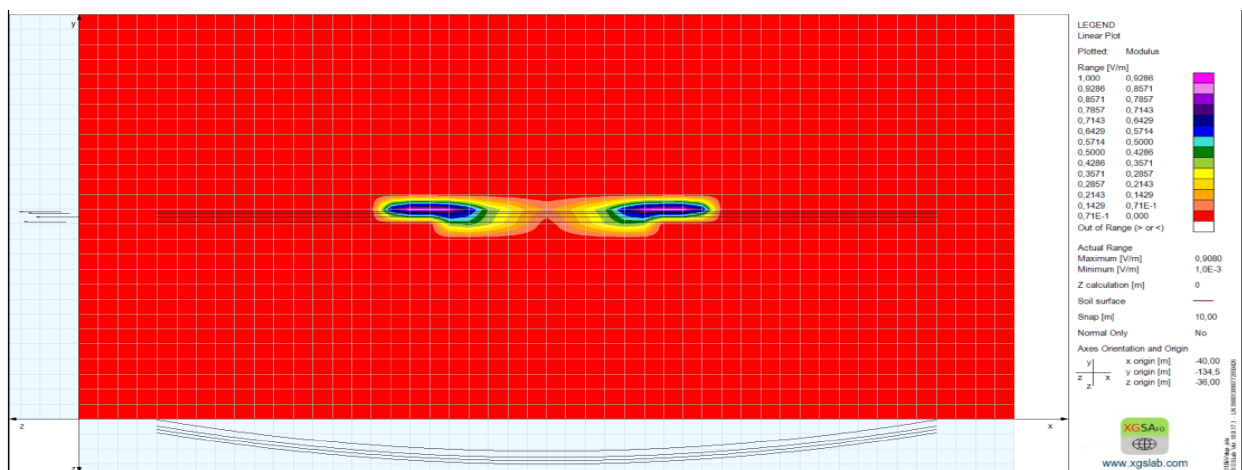
| Raspon frekvencije                         | Niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka (B) [ $\mu\text{T}$ ] (RMS) | Visoke vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka (B) [ $\mu\text{T}$ ] (RMS) | Vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka za izloženost ekstremiteta lokaliziranom magnetskom polju [ $\mu\text{T}$ ] (RMS) |
|--|---|--|---|
| $1 \leq f < 8 \text{ Hz}$                  | $2,0 \times 10^5/f^2$   | $3,0 \times 10^5/f$  | $9,0 \times 10^5/f$   |
| $8 \leq f < 25 \text{ Hz}$                 | $2,5 \times 10^4/f$   | $3,0 \times 10^5/f$  | $9,0 \times 10^5/f$   |
| $25 \leq f < 300 \text{ Hz}$               | $1,0 \times 10^3$   | $3,0 \times 10^5/f$  | $9,0 \times 10^5/f$   |
| $300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$    | $3,0 \times 10^5/f$   | $3,0 \times 10^5/f$  | $9,0 \times 10^5/f$   |
| $3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ | $1,0 \times 10^2$   | $1,0 \times 10^2$  | $3,0 \times 10^2$   |

Gledajući tablice 6.3. i 6.4. niske vrijednosti upozorenja za električno polje kao i za magnetsko polje iznosile bi za frekvenciju od 50 Hz 10000 V/m i 1000  $\mu\text{T}$ .

### 6.3. 110 kV stup

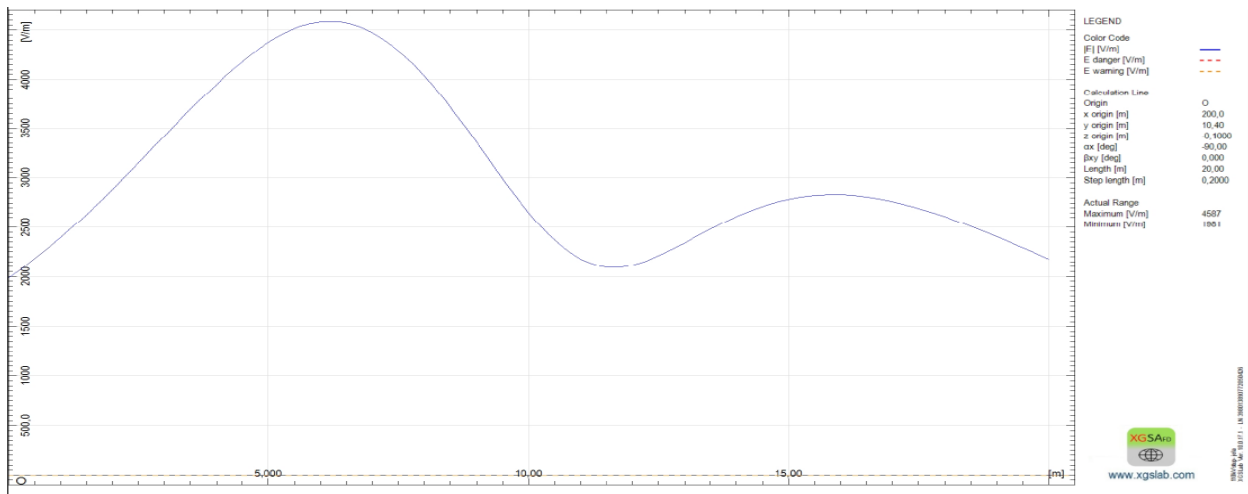
Primjer stupa od 110 kV, takozvani „jela“ stup, sastoji se od tri vodiča Al/Fe 240/40mm<sup>2</sup> čija je dozvoljena struja 841A pri 0°C, a pri 20°C 736A. Za izračun i električnog i magnetskog polja je korišten nosni stup uz struju od 736A.

#### 6.3.1. Električno polje



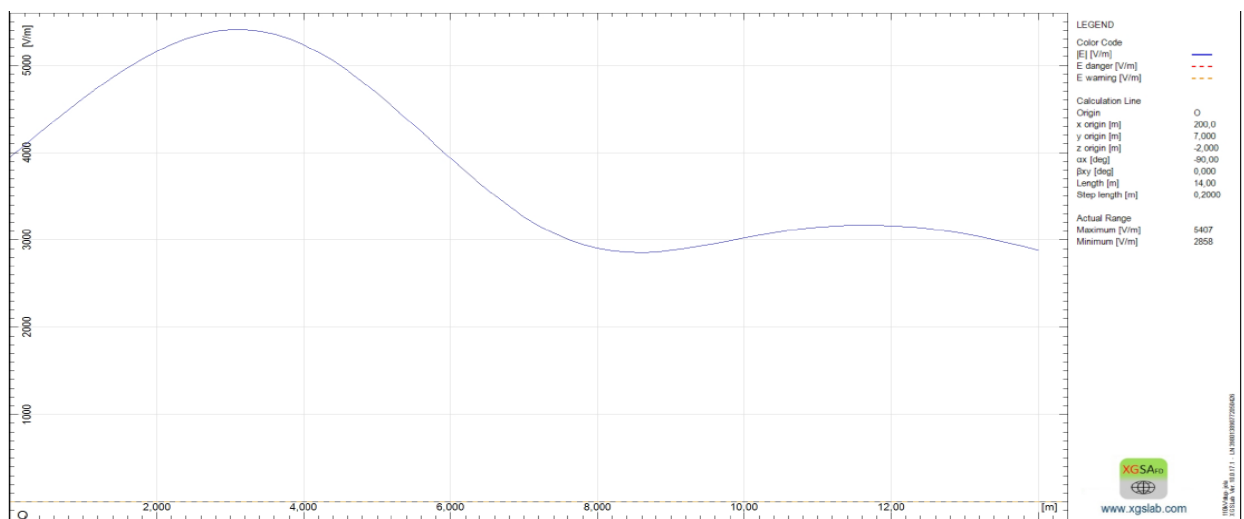
Slika 6.1. 2D prikaz električnog polja 110 kV stupa

Na slici 6.1. vidljivo je da je električno polje najveće na sredini, točnije s lijeve i desne strane najvećeg provjesa između dva stupa. Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 0,9286 V/m, a minimalna vrijednost je 0,071 V/m.



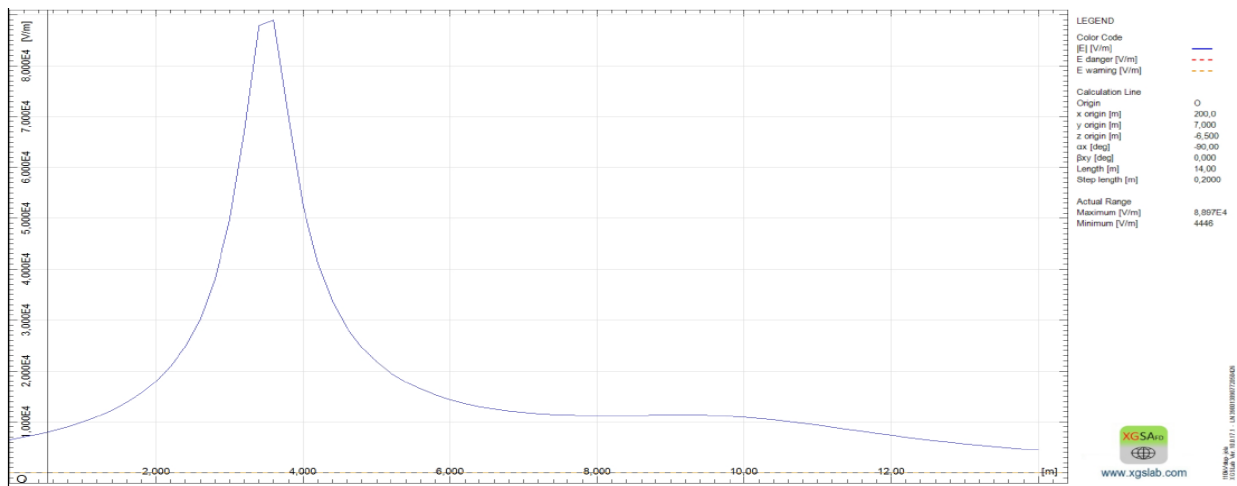
Slika 6.2. Električno polje na visini tla (0 m)

Na Slici 6.2. je prikazana vrijednost električnog polja na tlu na sredini voda, gledano okomito u odnosu na vodiče, maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 4587 V/m te uspoređujući tu vrijednost s граниčnom vrijednošću iz tablice 6.1. zaključuje se da je vrijednost unutar dopuštene granice. Maksimalna vrijednost je postignuta na najnižoj fazi promatranog stupa.



Slika 6.3. Električno polje na visini čovjeka (2m)

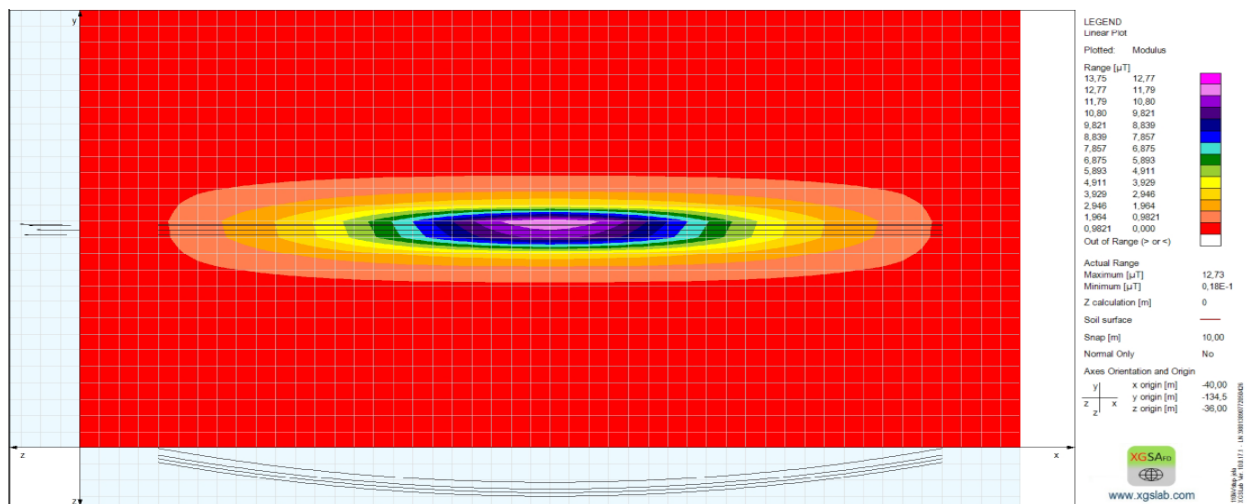
Sljedeći izračun je izveden na visini čovjeka kako bi se uvidjela štetnost električnog polja u slučaju da se čovjek kreće ispod trase dalekovoda. Izmjerena maksimalna vrijednost iznosi 5407 V/m što je iznad dozvoljene granice.



Slika 6.4. Električno polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (6,5m)

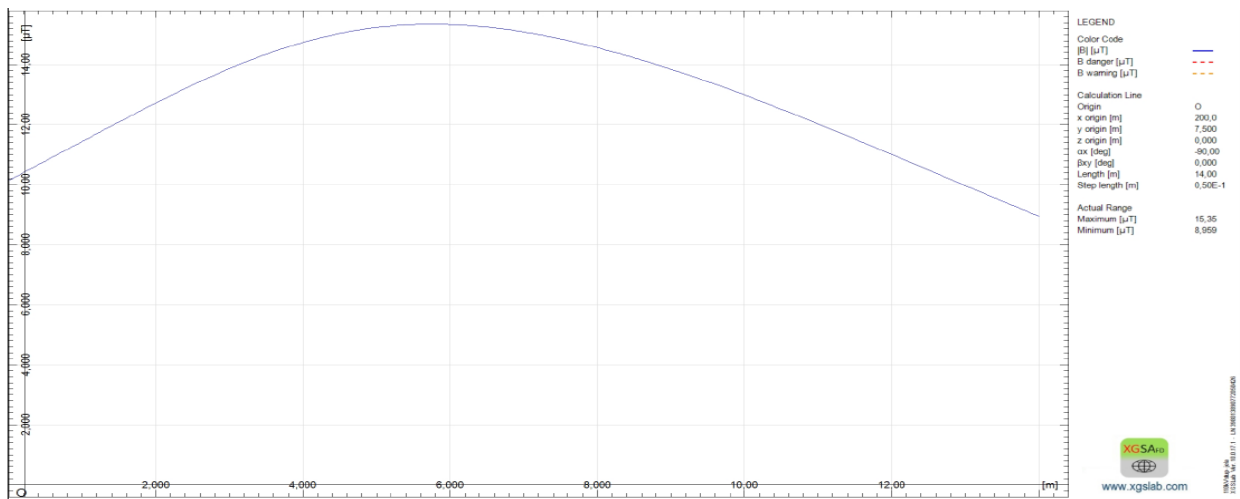
Računajući vrijednost električnog polja u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa dobivena maksimalna vrijednost premašuje vrijednost niskog upozorenja iz Tablice 6.3. za 8 puta te iznosi 88970 V/m. Stoga u slučaju rada na tom dijelu dalekovoda, radnici koji obavljaju remont moraju imati posebna odijela i posebnu zaštitu kako bi mogli obaviti posao. Na Slici 6.4. također može se vidjeti da je maksimalna vrijednost izmjerena točno ispod najniže faze promatranog stupa dalekovoda.

### 6.3.2. Magnetsko polje



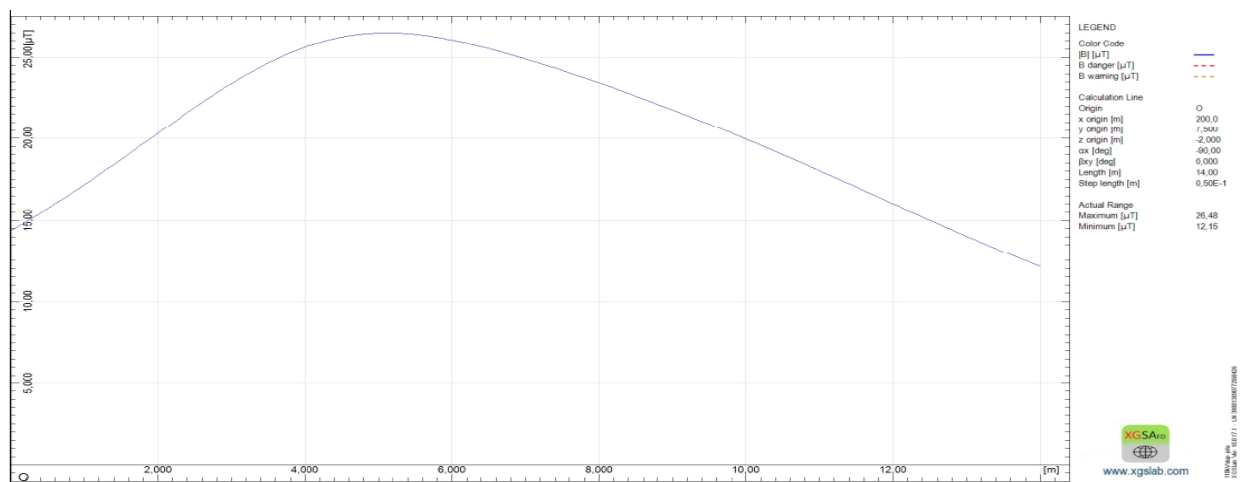
Slika 6.5. 2D prikaz magnetskog polja 110 kV stupa

Maksimalna vrijednost magnetskog polja koju možemo vidjeti na slici 6.5. iznosi 12,77  $\mu\text{T}$ , a minimalna vrijednost 0,9821  $\mu\text{T}$ . Također roza boja označava gdje je magnetsko polje najjače, a to je ispod provjesa te će se daljnji prikazi magnetskog polja odnositi upravo na ovo područje, gledano okomito na vodiče



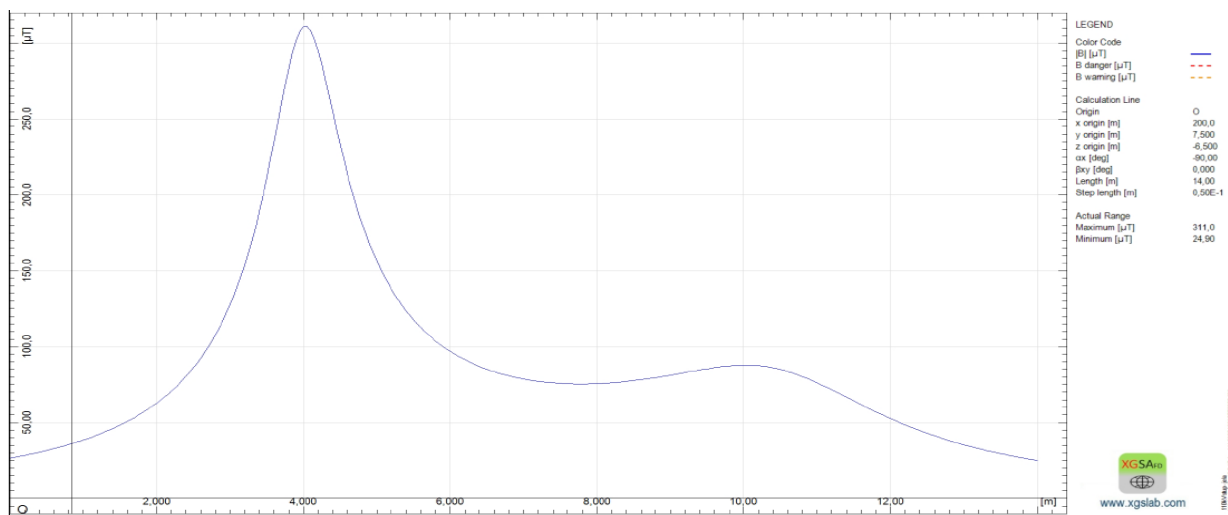
Slika 6.6. Magnetsko polje na površini zemlji (0 m)

Što se tiče magnetskog polja stupa od 110 kV, takozvanog „jela“- stupa, maksimalna vrijednost magnetskog polja na tlu iznosi  $15,35 \mu\text{T}$ . Uspoređujući s graničnom vrijednošću iz Tablice 6.1. koja iznosi  $100 \mu\text{T}$ , može se zaključiti da je vrijednost u dozvoljenim granicama.



Slika 6.7. Magnetsko polje na visini čovjeka (2 m)

Maksimalna vrijednost magnetskog polja izračunata na visini čovjeka iznosi  $26,48 \mu\text{T}$  te kao takva ta vrijednost zadovoljava graničnu vrijednost magnetskog polja koja je propisana Pravilnikom o zaštiti elektromagnetskih polja. Dakle, živa bića se bez problema mogu kretati ispod bez straha o štetnom utjecaju magnetskog polja na njih.



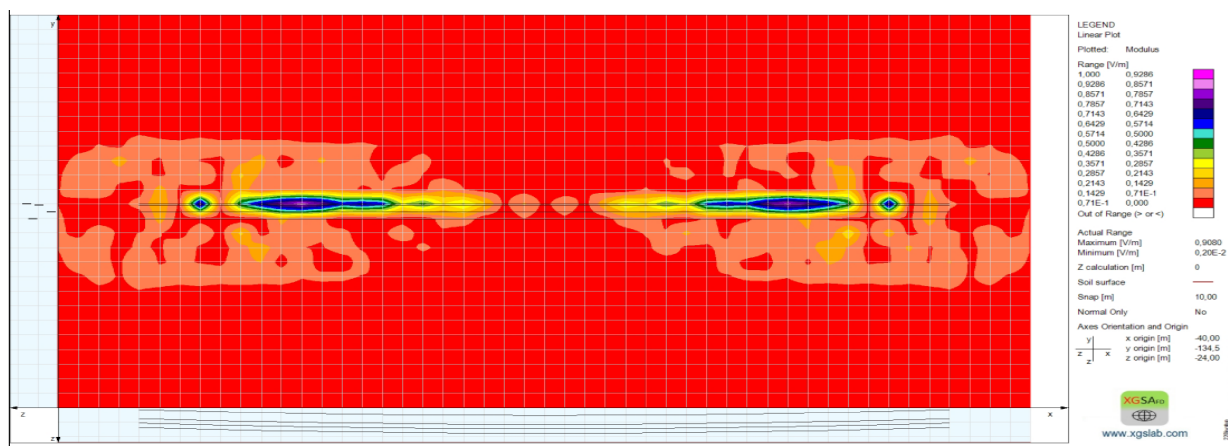
Slika 6.8. Magnetsko polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (6,5 m)

Što se tiče maksimalne vrijednosti magnetskog polja izračunate u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa, a koja se tiče radnika u slučaju nekog remonta, također i ta vrijednost, koja iznosi 311  $\mu\text{T}$ , zadovoljava nisku vrijednost upozorenja za rad koja se može vidjeti u Tablici 6.4.

## 6.4. 220 kV stup

Stup od 220 kV je također „jela“ stup čiji su vodiči sastavljeni od Al/Fe 360/57mm<sup>2</sup>, a dozvoljena struja pri 0°C iznosi 1085 A, dok pri 20°C struja iznosi 949 A. Za izračun je korištena struja pri 20°C jer je to struja u normalnom načinu rada.

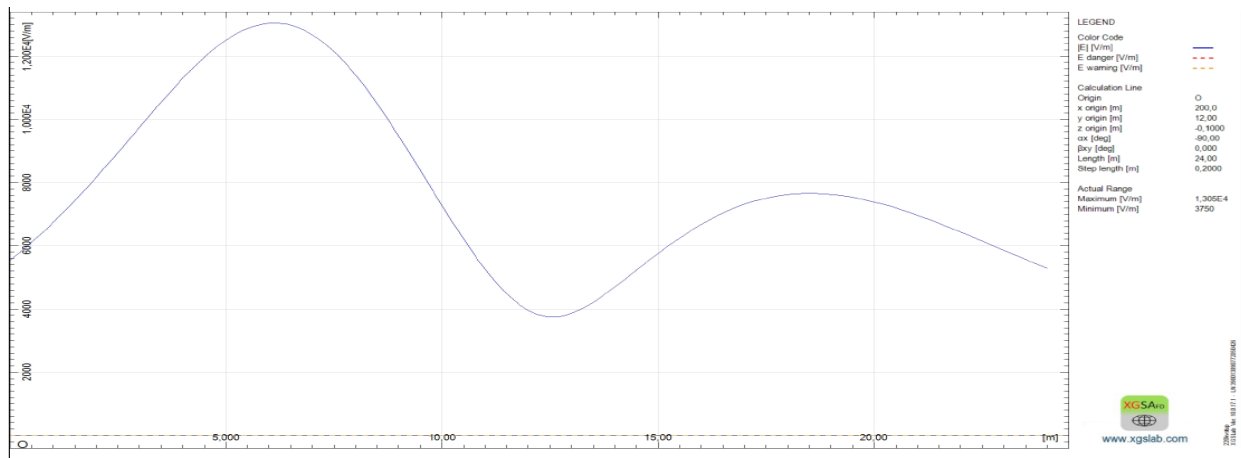
### 6.4.1. Električno polje



Slika 6.9. 2D prikaz električnog polja 220 kV dalekovoda

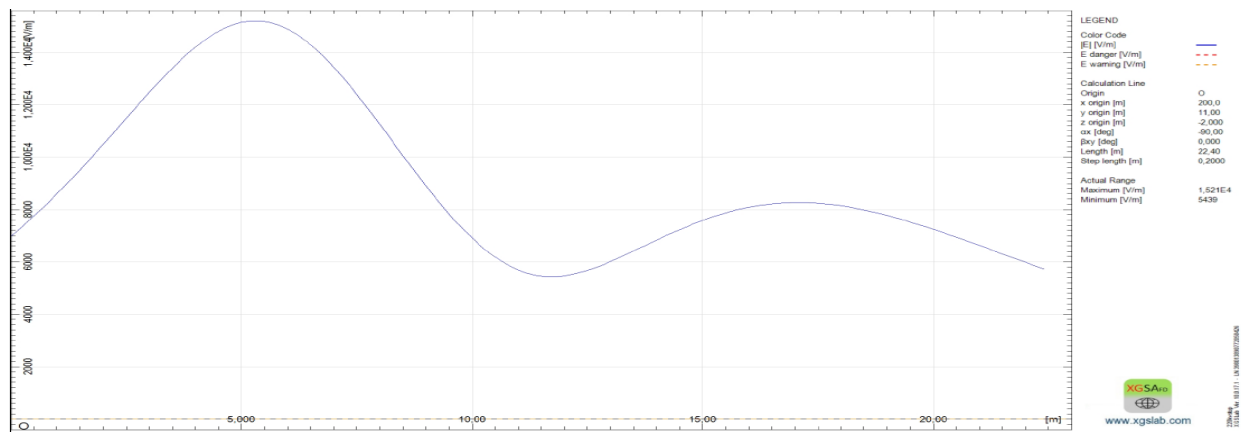
Na slici 6.9. vidljiv je 2D prikaz rasprostiranja električnog polja po površini, tako se može primijetiti da je polje najjače bliže stupu dalekovoda nego na sredini gdje je najveći provjes.

Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 0,9286 V/m, a minimalna vrijednost polja 0,071 V/m.



Slika 6.10. Električno polje na površini zemlje (0 m)

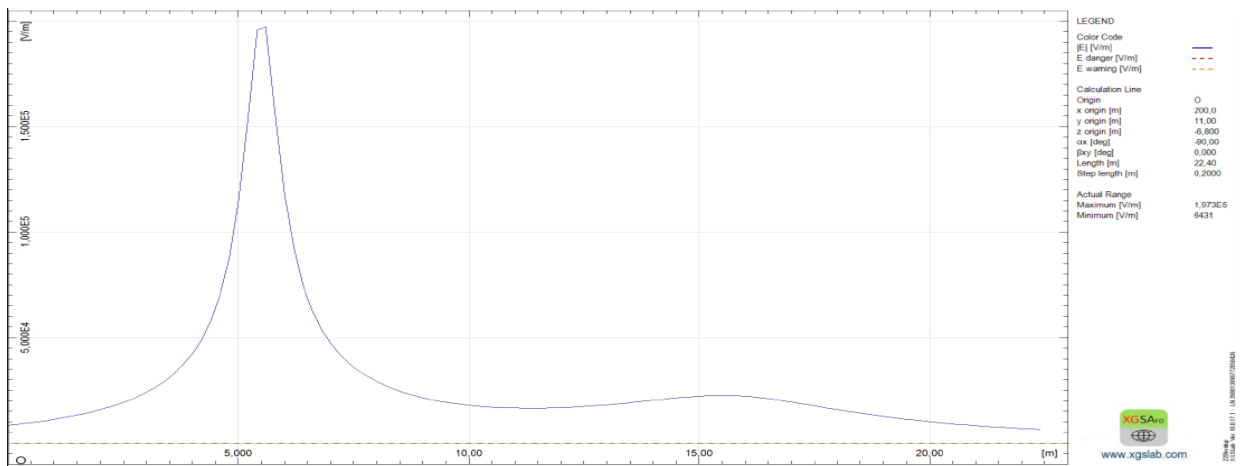
Što se tiče stupa od 220 kV maksimalna izračunata vrijednost premašuje graničnu vrijednost za javna područja, kao i nisku vrijednost upozorenja za jakost električnog polja i ta vrijednost iznosi 13050 V/m. Gledajući zadane koordinate u modelu, ovaj stup je nizak za ovoliku vrijednost napona stoga bi se ove vrijednosti u praksi mogle korigirati promjenom visine stupa ili nekih drugih parametara.



Slika 6.11. Električno polje na visini čovjeka (2 m)

Kao i na tlu maksimalna vrijednost električnog polja na visini od 2 m premašuje graničnu vrijednost kao i vrijednost niskog upozorenja za jakost električnog polja, a njen iznos je 15210 V/m.

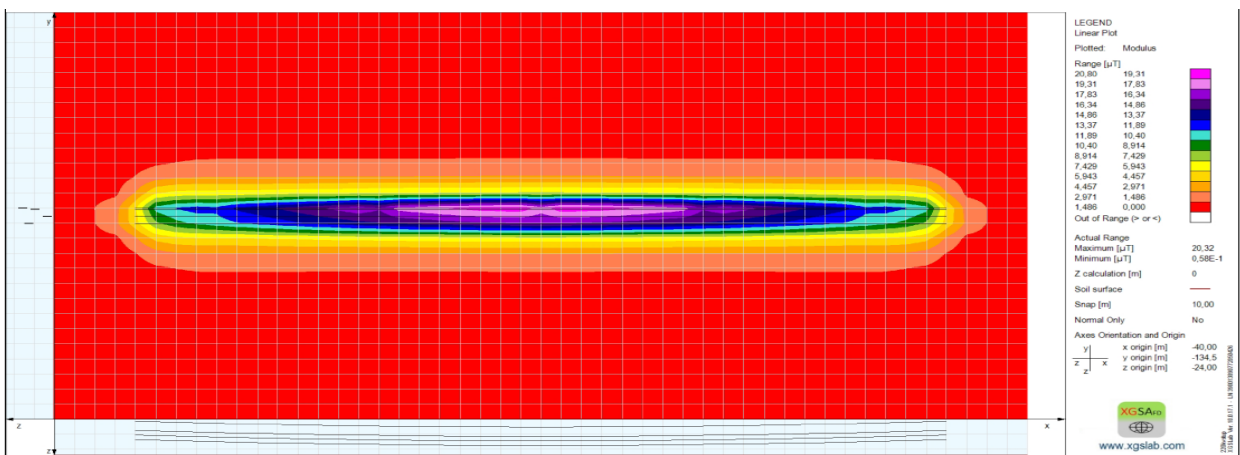




Slika 6.12. Električno polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa ( 6,8 m)

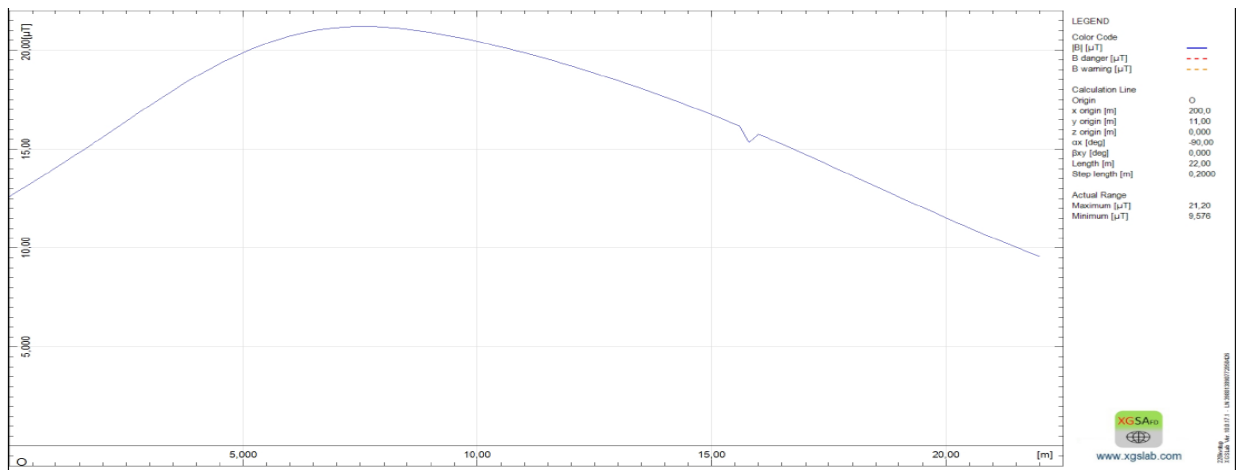
Maksimalna vrijednost električnog polja u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa kao i vrijednosti na tlu i na 2 m također premašuje dozvoljene vrijednosti i iznosi 197300 V/m što je izrazito visoka vrijednost.

### 6.4.2. Magnetsko polje



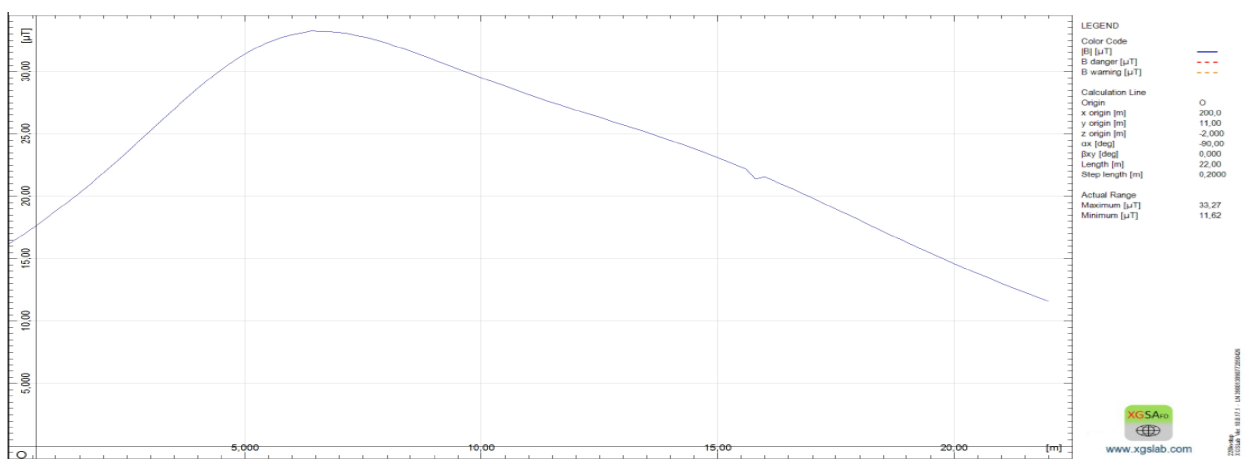
Slika 6.13. 2D prikaz magnetskog polja 220 kV stupa dalekovoda

Na 2D prikazu magnetskog polja 220 kV stupa, na slici 6.13. vidljivo je da je magnetsko polje najjače na sredini gdje je najveći provjes, dalje se prikazuju slike okomito gledano na vodiče. Maksimalna vrijednost magnetskog polja iznosi 19,31  $\mu\text{T}$ , a minimalna vrijednost iznosi 1,486  $\mu\text{T}$ .



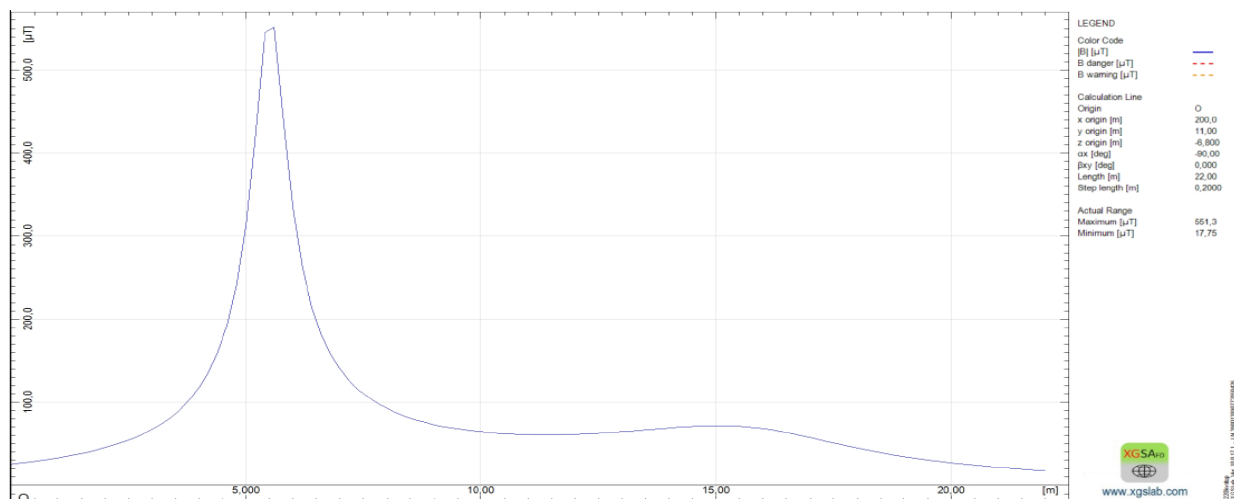
Slika 6.14. Magnetsko polje na površini zemlje (0 m)

Maksimalna vrijednost magnetskog polja za 220 kV stup na površini zemlje iznosi 21,20  $\mu\text{T}$  što je uspoređujući s vrijednošću iz Tablice 6.1. u dozvoljenim granicama. Kod ovog stupa treba spomenuti propad na 16 m što se vidi i na Slici 6.14. Propad se javljao koliki god je bio „step length“.



Slika 6.15. Magnetsko polje na visini čovjeka (2 m)

Na Slici 6.15. kao i na Slici 6.14. vidljiv je propad na istom mjestu. Što se tiče maksimalne vrijednosti magnetskog polja ona iznosi 33,27  $\mu\text{T}$  te se nalazi u dozvoljenom području za ograničenja koja su data u pravilnicima.



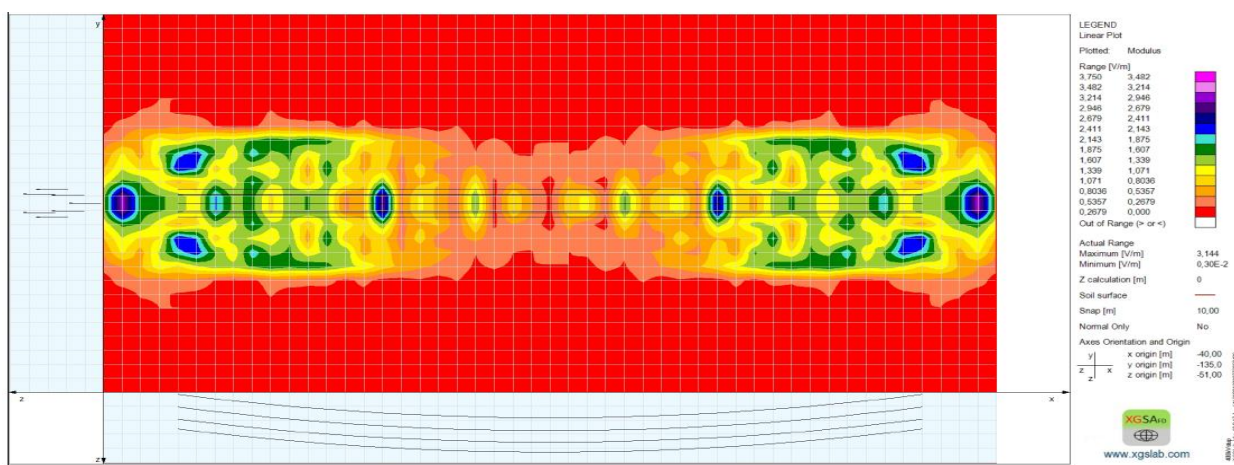
Slika 6.16. Magnetsko polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (6,8 m)

Vrijednost magnetskog polja izračunata ispod provjesa iznosi 551,3  $\mu\text{T}$  što predstavlja dozvoljene vrijednosti upozorenja koja se moraju poštivati. Budući da je vrijednost unutar ograničenja nesmetan rad je omogućen radnicima koji su obučeni za takve poslove.

## 6.5. 400 kV stup- dvosistemski

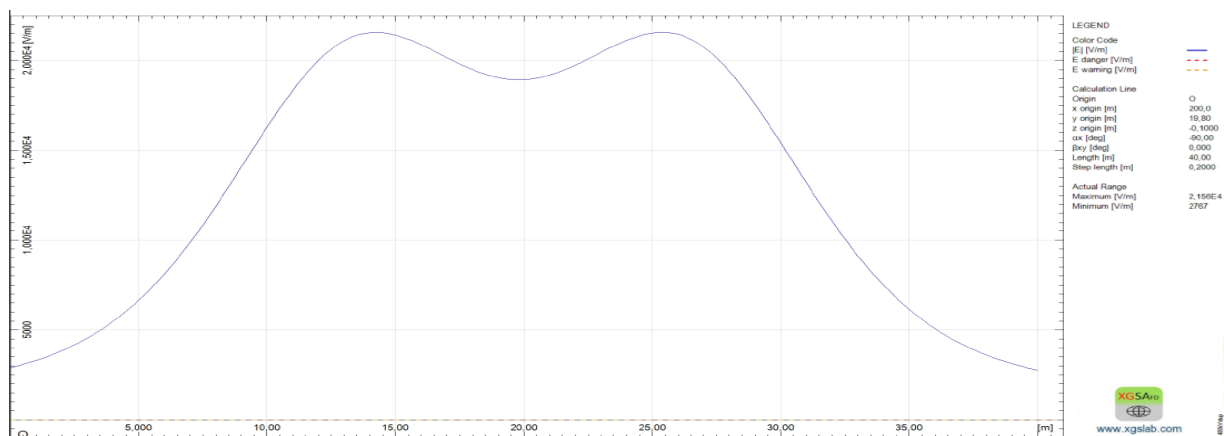
Za dvosistemski stup korišteni su vodiči  $\text{Al/Fe } 2 \times 490/65 \text{ mm}^2$ , a dozvoljena struja pri  $0^\circ\text{C}$  je 2644 A, a pri  $20^\circ\text{C}$  struja iznosi 2306 A.

### 6.5.1. Električno polje



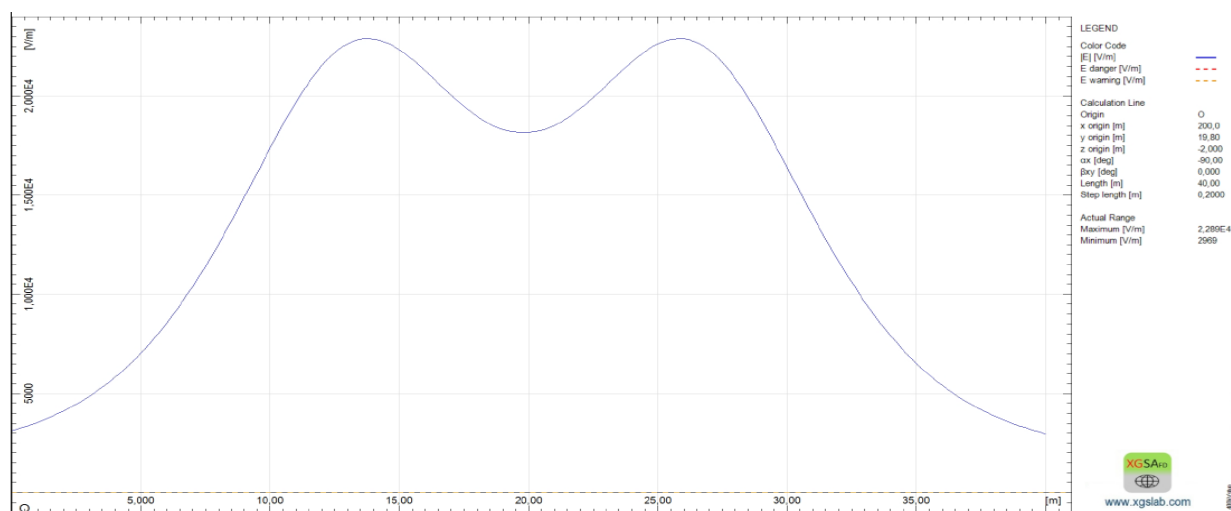
Slika 6.17. 2D prikaz električnog polja dvosistemskog stupa od 400 kV

Na slici 6.17. je prikazan 2D prikaz električnog polja gdje su vidljive oscilacije. Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 3,482 V/m, a minimalna vrijednost iznosi 0,2679 V/m.



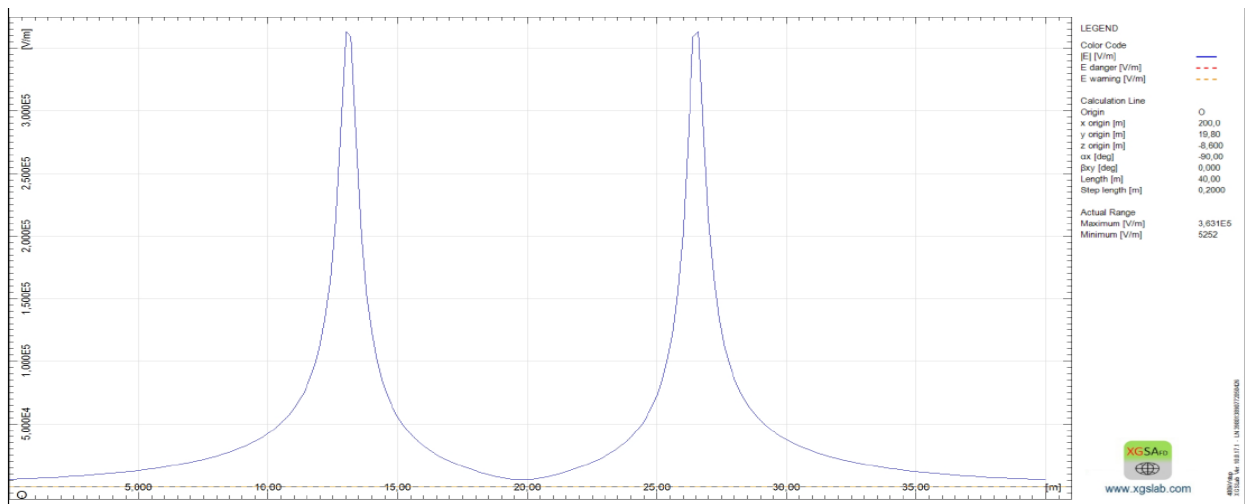
Slika 6.18. Električno polje na površini zemlje (0 m)

Gledajući Sliku 6.18. primjećuju se dva brijega koja označavaju vrijednosti iznad dvije najniže faze jer kod dvosistemskog stupa faze su poredane jedna iznad druge sa lijeve i desne strane. Maksimalna izračunata vrijednost električnog polja iznosi 21560 V/m što je iznad dopuštenog ograničenja, kako za javna, tako i za područja profesionalne izloženosti.



Slika 6.19. Električno polje na visini čovjeka (2 m)

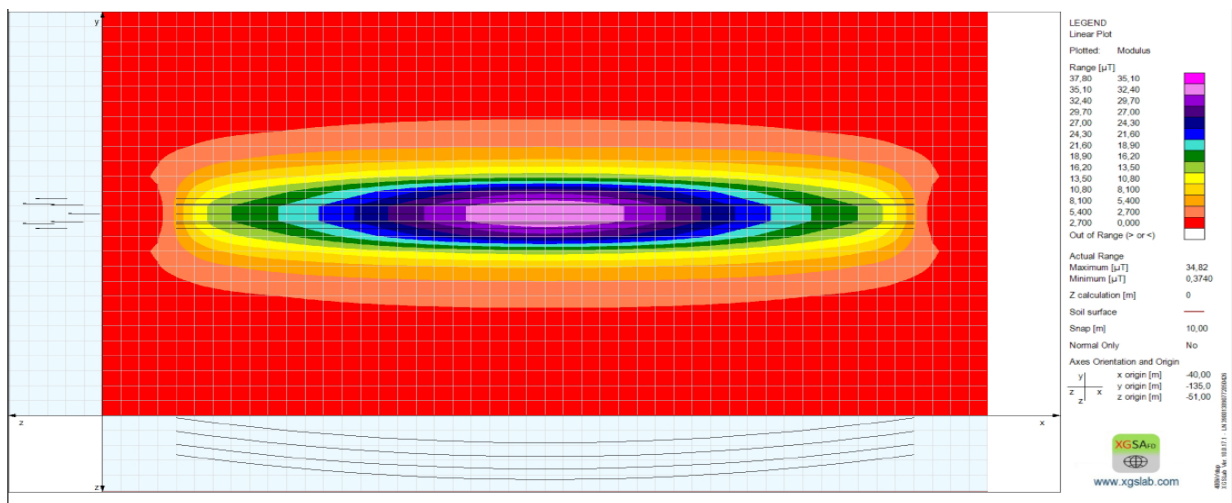
Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 22890 V/m. Maksimalna vrijednost premašuje granične vrijednosti stoga se ovakvi stupovi dalekovoda postavljaju i koriste za prijenos električne energije na područjima koja nisu naseljena.



Slika 6.20. Električno polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (8,6 m)

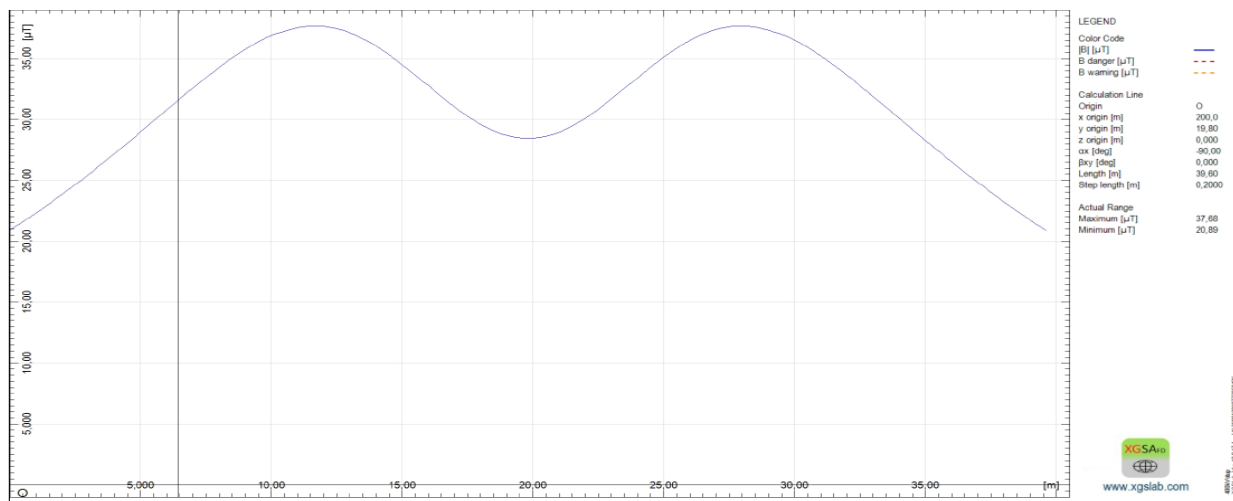
Na Slici 6.20. se može vidjeti da je maksimalno magnetsko polje izračunato točno na najnižim fazama koje se nalaze ispod zadanog provjesa. Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 363100 V/m što je izrazito visoka vrijednost u odnosu na granične vrijednosti.

### 6.5.2. Magnetsko polje



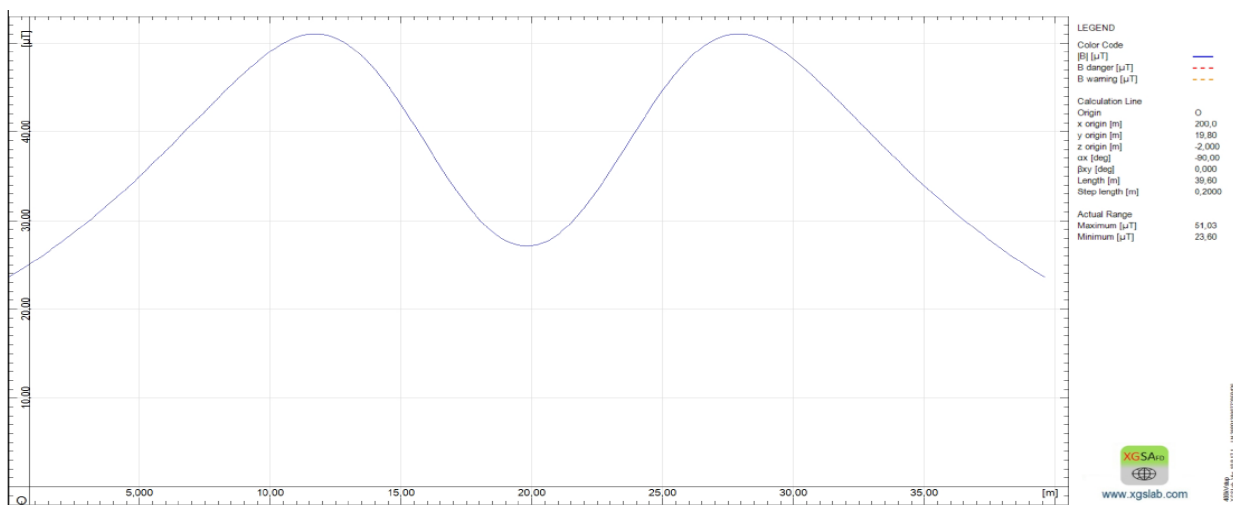
Slika 6.21. 2D prikaz magnetskog polja dvosistemskog 400 kV stupa

Kao i na prethodnim slikama 2D prikaza magnetskog polja vidljivo je da je magnetsko polje najjače na sredini dalekovoda, u razini vodiča gdje je provjes najveći, gledajući okomito na vodiče. Maksimalna vrijednost magnetskog polja iznosi 35,10  $\mu\text{T}$ , a minimalna vrijednost iznosi 2,7  $\mu\text{T}$ .



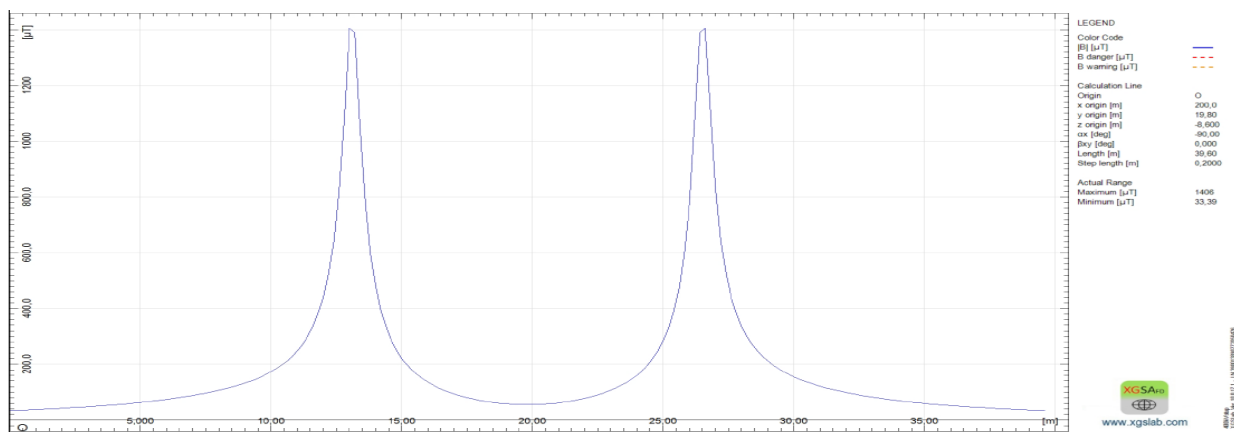
Slika 6.22. Magnetsko polje na površini zemlje (0 m)

Vrijednost magnetskog polja na tlu je manja od graničnih dopuštenih vrijednosti jakosti magnetskog polja i ona iznosi  $37,68 \mu\text{T}$ . Ali uspoređujući ovu vrijednost s maksimalnom vrijednošću magnetskog polja sa Slike 6.21. vidljivo je da je vrijednost magnetskog polja veća za skoro  $3 \mu\text{T}$ .



Slika 6.23. Magnetsko polje na visini čovjeka (2 m)

Maksimalna vrijednost magnetskog polja izračunata na 2 m iznosi  $51,03 \mu\text{T}$  što uspoređujući sa vrijednostima iz Tablica 6.1. i 6.4, dovodi do zaključka da se izračunata vrijednost nalazi u dozvoljenim granicama.



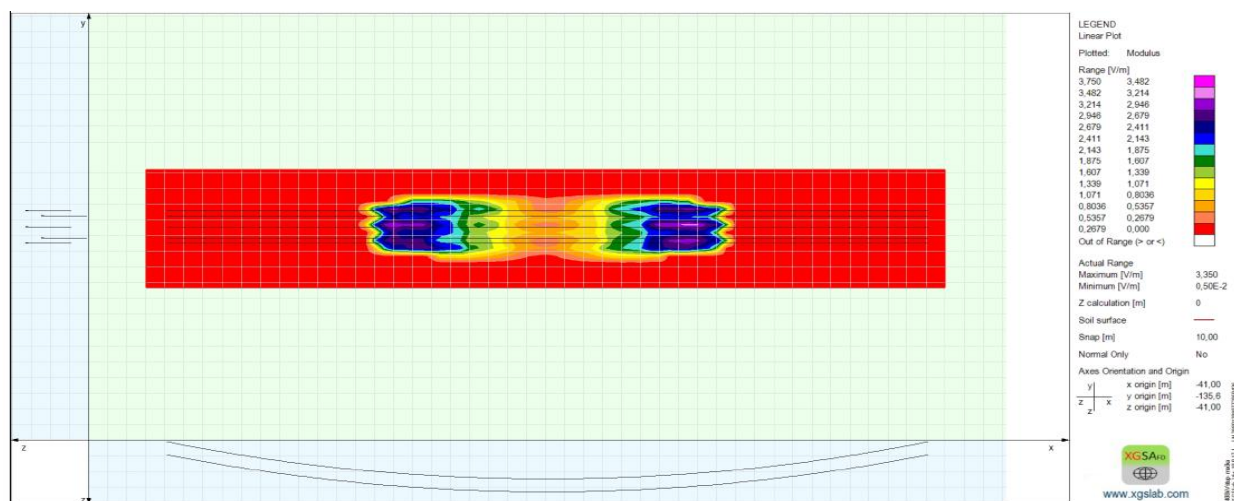
Slika 6.24. Magnetsko polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (8,6 m)

Maksimalna vrijednost magnetskog polja izračunata u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa iznosi 1406  $\mu\text{T}$ . Ta vrijednost prelazi vrijednost niskog upozorenja za profesionalni rad, dok granicu visokog upozorenja za rad ne prelazi što se može vidjeti iz Tablice 6.4.

## 6.6. 400 kV stup- „mačka stup“

Kao i kod dvosistemskog 400 kV stupa korišteni su Al/Fe  $2 \times 490/65 \text{ mm}^2$  vodiči, a dozvoljena struja pri  $0^\circ\text{C}$  je 2644 A, a pri  $20^\circ\text{C}$  struja iznosi 2306 A. Kao i u prethodnim slučajevima korištena je struja pri  $20^\circ\text{C}$ .

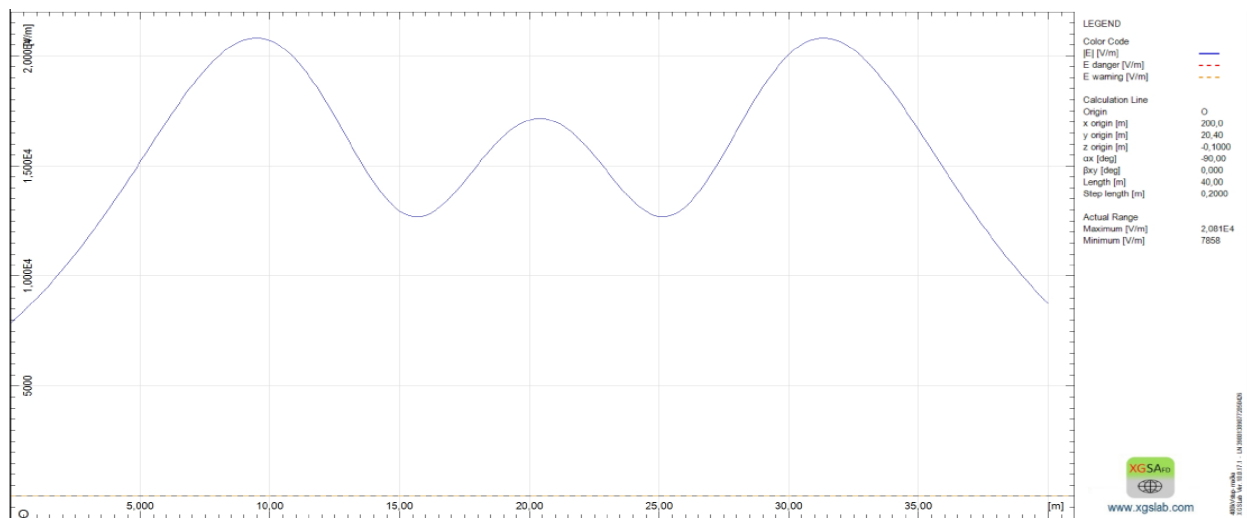
### 6.6.1. Električno polje



Slika 6.25. 2D prikaz električnog polja „mačka“ stupa

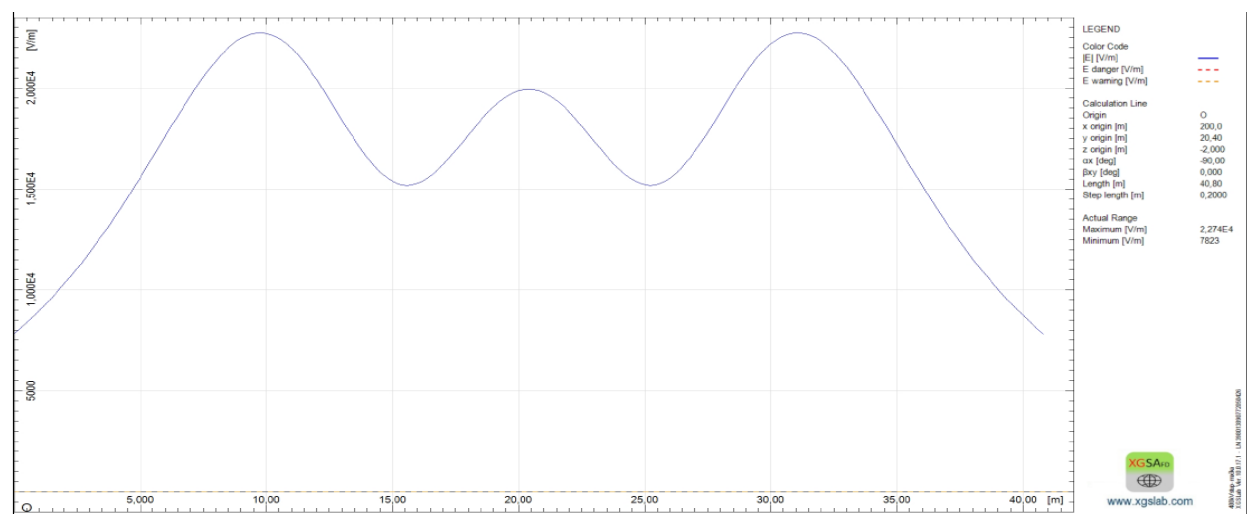
Gledajući 2D prikaz električnog polja na Slici 6.25. te uspoređujući ga sa Slikom 6.17. vidljivo je da je prikaz puno jasniji te nema oscilacija kao na Slici 6.17. Što se tiče maksimalne i minimalne vrijednosti jakosti električnog polja vrijednost iznosa jakosti električnog polja je ista kao i kod

dvosistemskog stupa. Maksimalna vrijednost iznosi 3,482 V/m, a minimalna vrijednost 0,2679 V/m.



Slika 6.26. Električno polje na površini zemlje (0 m)

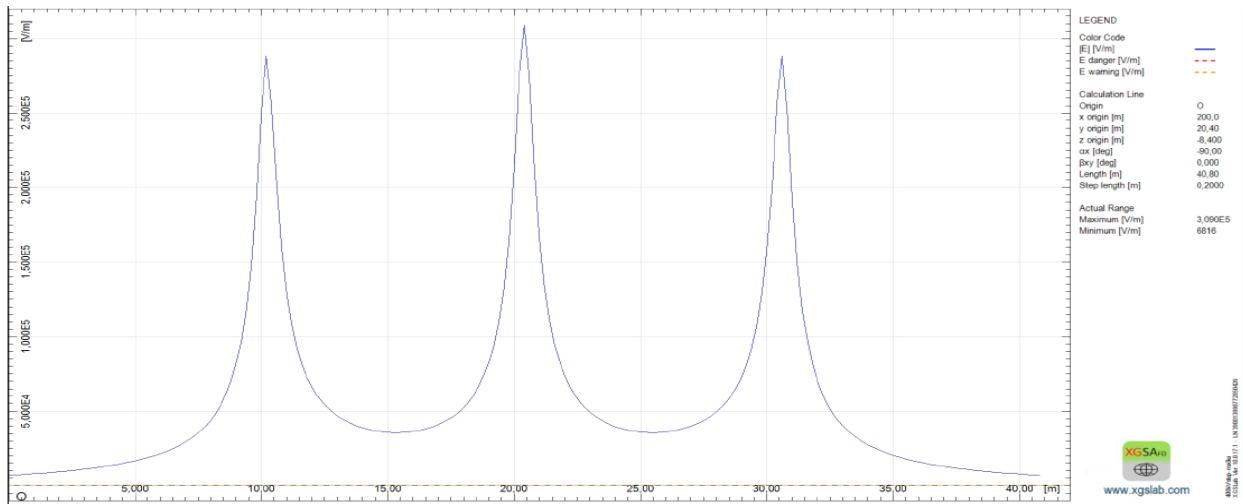
Maksimalna vrijednost jakosti električnog polja na tlu za „mačka“ stup iznosi 20810 V/m što uspoređujući sa vrijednošću jakosti električnog polja dvosistemskog stupa je manja vrijednost, ali također prelazi granice iz Tablice 6.1. kao i granice niskog i visokog upozorenja dane u Tablici 6.3..



Slika 6.27. Električno polje na visini čovjeka (2 m)

Uspoređujući vrijednosti jakosti električnog polja na 2 m između „mačka“ stupa i dvosistemskog stupa vrijednost se razlikuje, ali manje nego uspoređivane vrijednosti izračunate na tlu. Maksimalna vrijednost jakosti električnog polja „mačka“ stupa je 22740 V/m što kao i ostale vrijednosti električnog polja prelazi dozvoljene granice date u Tablici 6.1.

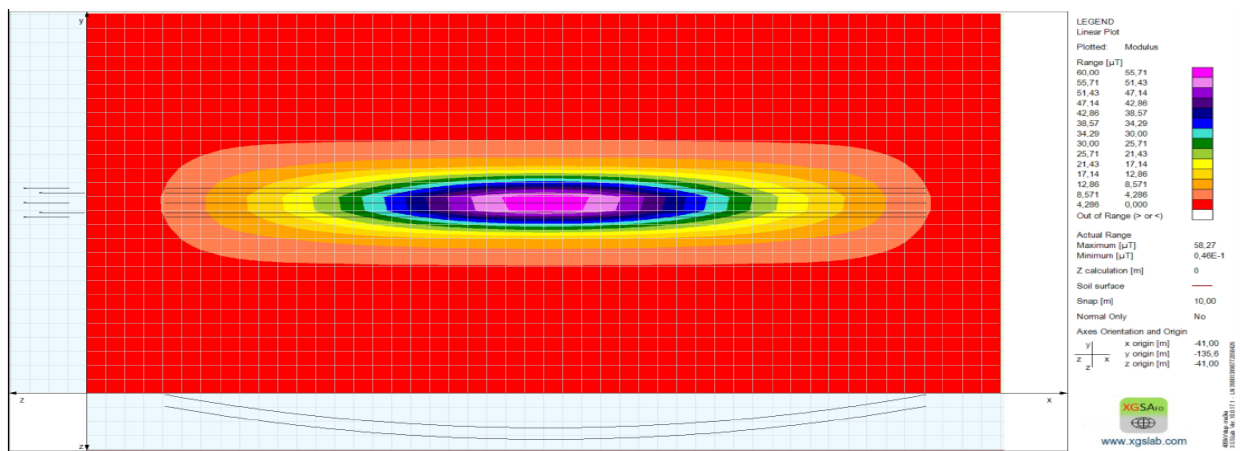




Slika 6.28. Električno polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (8,6 m)

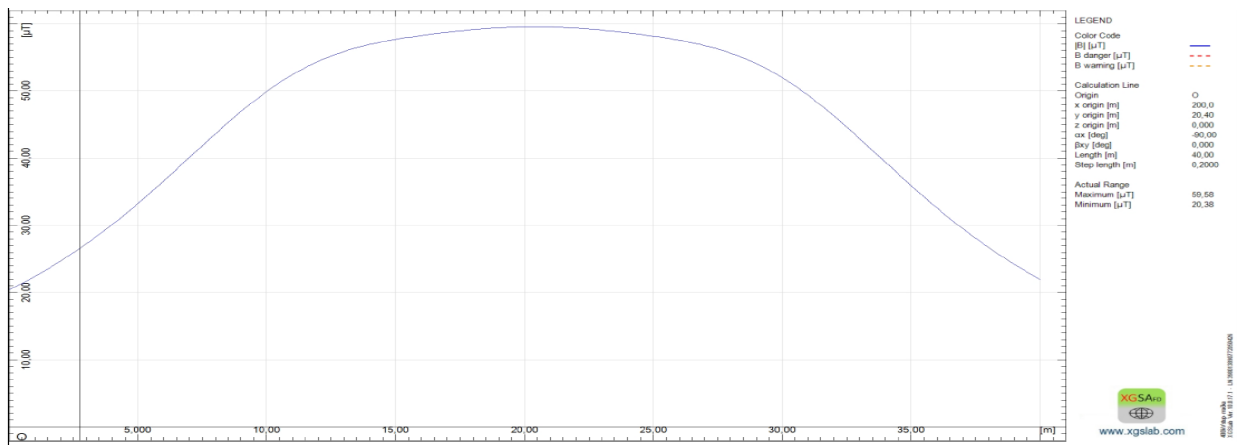
Što se tiče maksimalne vrijednosti električnog polja izračunate u razini vodiča ona također prelazi granice niskog i visokog upozorenja za jakosti električnog polja, a maksimalna izračunata vrijednost električnog polja iznosi 309000 V/m što je za preko 50000 V/m manja vrijednost nego vrijednost jakosti električnog polja kod dvosistemskog stupa.

### 6.6.2. Magnetsko polje



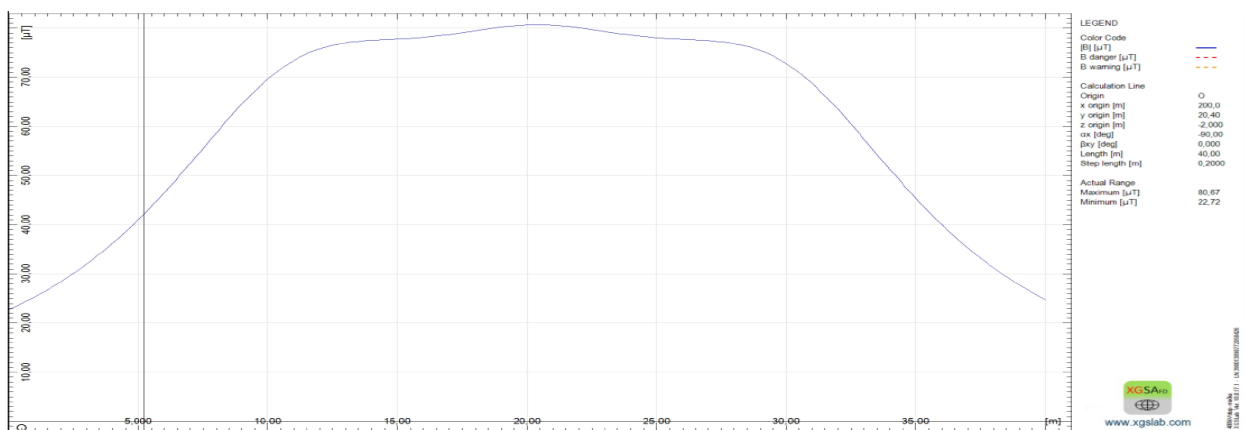
Slika 6.29. 2D prikaz magnetskog polja „mačka“ stupa

Na Slici 6.29. je vidljiv 2D prikaz magnetskog polja gdje se vidi da je magnetsko polje najjače na sredini dalekovoda gdje je najveći provjes gledano okomito na vodiče. Maksimalna vrijednost magnetskog polja izračunata na cijelom području iznosi 55,71  $\mu\text{T}$ , a najniža izračunata vrijednost iznosi 4,286  $\mu\text{T}$ . Izračunate vrijednosti su više u usporedbi sa vrijednostima izračunatim kod dvosistemskog 400 kV stupa.



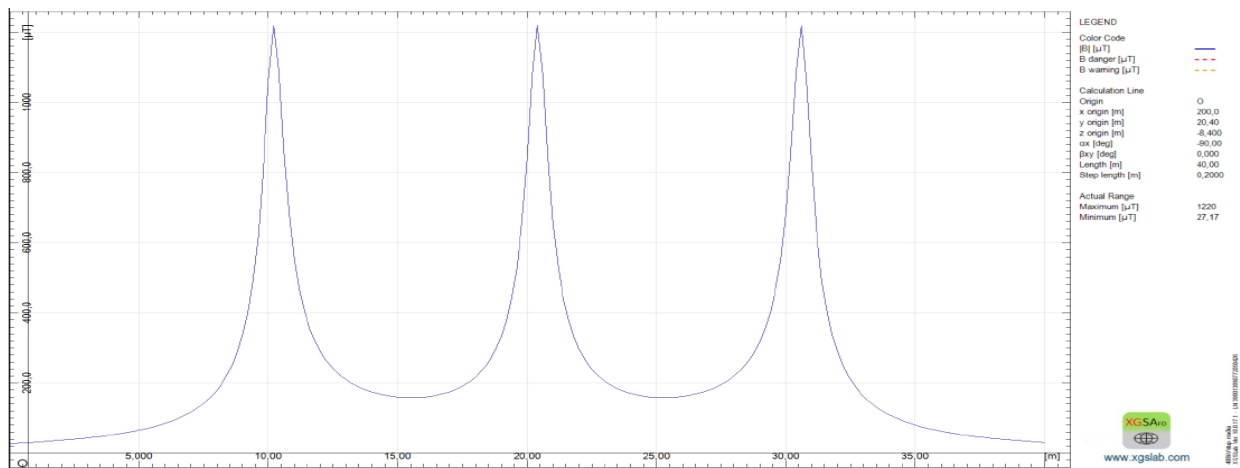
Slika 6.30. Magnetsko polje na površini zemlje (0 m)

Vrijednost jakosti magnetskog polja izračunata na tlu iznosi  $59,58 \mu\text{T}$  što je viša vrijednost nego vrijednost jakosti magnetskog polja dvosistemskog stupa. Uspoređujući vrijednost jakosti magnetskog polja „mačka“ stupa sa graničnom vrijednošću za javna područja iz Tablice 6.1. vidljivo je da se dobivena vrijednost nalazi u okvirima dozvoljenih granica.



Slika 6.31. Magnetsko polje na visini čovjeka (2 m)

Na Slici 6.31. vidljiv je utjecaj blizine vodiča što se može primjetiti između 10 m i 30 m. Maksimalna izračunata vrijednost magnetskog polja iznosi  $80,67 \mu\text{T}$  i idalje se nalazi u granicama dozvoljenim za javna područja.



Slika 6.32. Magnetsko polje u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa (8,6 m)

Jakost magnetskog polja izračunatog u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa kako bi provjerili je li moguć nesmetan rad radnicima bez štetnih zračenja na „mačka“ stupu. Može se zaključiti da maksimalna izračunata vrijednost prelazi granicu niskog upozorenja za jakost magnetskog polja, ali je daleko niža, nego granična vrijednost visokog upozorenja. Maksimalna izračunata vrijednost magnetskog polja u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa iznosi 1220  $\mu\text{T}$ .

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu izrađena su četiri različita modela za četiri različita stupa dalekovoda te su izračunate vrijednosti električnog i magnetskog polja u programskom paketu XGSLab\_FD. Cilj je bio prikazati i numeričke i grafičke vrijednosti jakosti elektromagnetskih polja za različite udaljenosti od osi dalekovoda. Tako su rađene simulacije na tlu, na visini čovjeka (2 m) te u razini vodiča na mjestu najvećeg provjesa čija je visina različita za različite stupove dalekovoda. Važno je napomenuti da su prikazi električnog i magnetskog polja izrađeni na mjestu najviših vrijednosti s prikazom okomito u odnosu na vodiče. Vrijednosti jakosti polja računane na mjestu najvećeg provjesa rađene su kako bi se uvidjelo je li moguć siguran rad radnicima koji rade na održavanju dalekovoda te koliko je zračenje elektromagnetskih polja. Gledajući 2D prikaze kako električnog tako i magnetskog polja za sve stupove odrađene u radu vidljivo je da je magnetsko polje najjače na sredini gdje je najveći provjes, a električno polje s lijeve i desne strane od najvećeg provjesa. Uspoređujući dobivene vrijednosti električnog i magnetskog polja cijele površine za 110 kV i 220 kV konfiguracije stupova dobivene su iste maksimalne i minimalne vrijednosti električnog polja, a one iznose 0,9286 V/m i 0,071 V/m dok se vrijednosti jakosti magnetskog polja razlikuju. Što se tiče 400 kV konfiguracija stupova njihove vrijednosti i električnog i magnetskog polja cijele površine su jednake. Iznos maksimalne vrijednosti jakosti električnog polja je 3,482 V/m, a iznos maksimalne vrijednosti jakosti magnetskog polja je 35,10  $\mu$ T. Gotovo sve izračunate vrijednosti električnog polja za sve stupove računane za različite visine prelaze dopuštene granice za javna područja, područja povećane osjetljivosti i područja profesionalne izloženosti. Vrijednost jakosti električnog polja koja ne prelazi dopuštenu granicu je na tlu za 110 kV stup i iznosi 4587 V/m. Što se tiče vrijednosti jakosti magnetskog polja za različite konfiguracije stupova one ne prelaze granice za javna područja kao i za područja povećane osjetljivosti, dok kod 400 kV stupova vrijednosti jakosti magnetskog polja za područje profesionalne izloženosti prelaze dopuštenu granicu niskog upozorenja koja iznosi 1000  $\mu$ T. Maksimalne izračunate vrijednosti jakosti kako električnog tako i magnetskog polja su dobivene na dvosistemsom 400 kV stupu i one iznose 363100 V/m i 1406  $\mu$ T.

## 8. SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisan je značaj električnog i magnetskog polja te zadatak ovog rada. U drugom poglavlju pregledavajući različitu literaturu opisani su štetni utjecaji elektromagnetskih polja kao i načini smanjenja štetnosti istih. Osnovna teorijska podloga o električnom i magnetskom polju opisana je u naredna dva poglavlja ovog rada. U petom poglavlju su opisane razne konfiguracije stupova, sastavni dijelovi svakog stupa kao i materijali od kojih se izrađuju. U narednom poglavlju opisani su parametri modela, granične vrijednosti jakosti elektromagnetskih polja, rezultati simulacija te njihova analiza. U sedmom poglavlju opisani su i uspoređeni rezultati simulacija za različite konfiguracije stupova dalekovoda.

**Ključne riječi:** električno polje, magnetsko polje, stupovi dalekovoda

## 9. ABSTRACT

The introductory part of the paper describes the importance of electric and magnetic fields and the task of this paper. In the second chapter, reviewing various literature, the harmful effects of electromagnetic fields are described, as well as ways to reduce their harmfulness. The basic theoretical background of electric and magnetic fields is described in the next two chapters of this paper. The fifth chapter describes various configurations of transmission line poles, their constituent parts, as well as the materials from which they are made. The next chapter describes the parameters of the models of transmission line poles, the limit values of the strength of electromagnetic fields, and the results of the simulations and their analysis. The seventh chapter describes and compares the results of simulations for different configurations of transmission line poles.

**Key words:** electric field, magnetic field, transmission line poles.

## LITERATURA

- [1] M. Kokoruš, S. Delić, M. Muratović „Analiza magnetskih polja oko zračnih prijenosnih linija i moguća rješenja smanjenja njihovih vrijednosti“
- [2] Electrostatic and electromagnetic effects of overhead transmission lines rural electrification administration 0 United States department of agriculture
- [3] M. Nafar, G. Solookinejad, M. Jabbari „Magnetic field calculation of 63kV transmission lines“  
url:[www.arpapress.com/Volumes/Vol17Issue2/IJRRAS\\_17\\_2\\_10.pdf](http://www.arpapress.com/Volumes/Vol17Issue2/IJRRAS_17_2_10.pdf)
- (Pristup ostvaren:19.3.2022.)
- [4] J. R. Stewart, „Magnetic Fields from Electric Power Lines: Theory and Comparison to Measurement,“ IEEE Trans. of Power Delivery, Vol. 3, pp. 2127-2136, April 1993.
- [5] Haubrich H-J. Magnetic field in the vicinity of three phase power lines. Elektrizita tswirtschaft 1974; 73:511–517
- [6] L. Jozsa: Parametri nadzemnih vodova, Elektrotehnički fakultet sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera, Osijek 2006.
- [7] S. Čaršimamović, Z. Bajramović, M. Raščić, „Experimental results of ELF electric and magnetic fields of electric power systems in Bosnia and Herzegovina“
- [8] B. Kuzmanović, Osnove elektrotehnike I, ELEMENT Zagreb, 2000., 4.izdanje
- [9] „Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti od elektroenergetskog polja,“ Narodne novine 31/2019
- [10] „Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja,“ Narodne novine 59/2016

## **ŽIVOTOPIS**

Nikola Budim rođen je 09.12.1998. godine u Zenici, Bosna i Hercegovina. Završio je Osnovnu školu „Fra Grga Martić“ u Ozimici, područna škola Lug-Brankovići te upisuje Opću gimnaziju u Katoličkom školskom centru „Don Bosco“ u Žepču. Nakon završene srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, te pohađa preddiplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Nakon završenog preddiplomskog studija upisuje diplomski studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetski sustavi.

---

Potpis autora