

# Analiza električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice

---

Đaković, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*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:200:715220>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-02**

*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**

**ANALIZA ELEKTRIČNIH I MAGNETSKIH POLJA  
DISTRIBUCIJSKE TRAFOSTANICE**

**Diplomski rad**

**Karlo Đaković**

**Osijek, 2023. godina**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 19.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Karlo Đaković
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1397, 07.10.2021.
<b>OIB studenta:</b>	34791416185
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Sumentor:</b>	Heidi Adrić, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Analiza električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U diplomskom radu potrebno je objasniti utjecaj i djelovanje električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice. Nadalje, potrebno je definirati najveće dopuštene vrijednosti električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice. Uz to, potrebno je izraditi računalni model distribucijske trafostanice te odrediti iznose i raspodjelu električnog i magnetskog polja. Tema je rezervirana za studenta: Karlo Đaković.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	19.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 06.10.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Karlo Đaković

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1397, 07.10.2021.

**Turnitin podudaranje [%]:**

3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora Heidi Adrić, mag. ing. el.

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 studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. ELEKTRIČNO POLJE</b> .....	<b>4</b>
3.1. Električno polje točkastog naboja .....	5
3.2. Silnice električnog polja.....	6
<b>4. MAGNETSKO POLJE</b> .....	<b>8</b>
4.1. Silnice magnetskog polja .....	8
4.2. Magnetska indukcija.....	10
<b>5. ZAKONSKA REGULATIVA</b> .....	<b>12</b>
<b>6. SIMULACIJE I REZULTATI MJERENJA</b> .....	<b>17</b>
6.1. Opis transformatorske stanice .....	17
6.2. Model transformatorske stanice .....	19
6.3. Simulacija slučaja kada TS radi pod maksimalnim opterećenjem .....	21
6.3.1. Analiza električnog polja.....	22
6.3.2. Analiza magnetskog polja.....	26
6.4. Simulacija slučaja kada TS radi pod opterećenjem 80 %.....	31
6.4.1. Analiza električnog polja .....	32
6.4.2. Analiza magnetskog polja.....	33
6.5. Mjerenje električnog i magnetskog polja KTS 220 Osijek 10/0,4 kV .....	37
6.6. Simulacija slučaja kada TS radi pod stvarnim opterećenjem .....	45
6.6.1. Analiza električnog polja .....	45
6.6.2. Analiza magnetskog polja.....	46
6.7. Usporedba rezultata simulacija .....	50
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>51</b>
<b>8. LITERATURA</b> .....	<b>52</b>
<b>9. SAŽETAK</b> .....	<b>53</b>
<b>10. ABSTRACT</b> .....	<b>54</b>

11. ŽIVOTOPIS.....	55
--------------------	----

# 1. UVOD

Danas smo svjedoci kako dolazi do značajnog povećanja broja električnih instalacija i uređaja u našem okruženju, a samim time raste i potreba za električnom energijom. Proizvedena električna energija iz elektrana se pomoću transformatora podiže na vrlo visoki napon zbog učinkovitijeg prijenosa električne energije (manji gubici). Prijenos električne energije odvija se visokonaponskim vodovima do transformatorskih stanica gdje se napon snižava na odgovarajuću razinu i distribuira se električna energija krajnjim korisnicima. Poznato je da vodič koji je pod naponom stvara električno polje te da vodič kroz koji protječe struja nastaje magnetsko polje oko vodiča. Prema tome, zaključuje se da su ljudi svakodnevno izloženi električnom i magnetskom polju u kućanstvu zbog svih električnih instalacija i uređaja. U kućanstvu su ti izvori zanemarivi, no npr. u nekim visokonaponskim postrojenjima, distributivnim trafostanicama, dalekovodima, iznos električnog i magnetskog polja može biti značajan ljudima koji se nađu u blizini i na taj način budu izloženi. Zbog toga postoje zakoni i pravilnici koji propisuju granične razine elektromagnetskih polja. Posljedice koje su povezane izlaganjem elektromagnetskom polju nisu odmah vidljive, stoga je važno redovito pratiti zdravlje ljudi koji su svakodnevno izloženi elektromagnetskim poljima (npr. radnici koji svakodnevno obavljaju poslove vezane uz izvore elektromagnetskih polja). Zbog brige za ljudsko zdravlje, potrebno je obaviti mjerenja ili simulacije kako bi se odredili iznosi elektromagnetskog polja i područja povećanog polja koji mogu imati veći utjecaj na zdravlje radnika od propisanih vrijednosti.

U drugom poglavlju diplomskog rada je prikazan pregled područja istraživanja u kojima drugi autori istražuju utjecaj električnog i magnetskog polja u različitim primjerima. Teorijske osnove i zakonitosti o električnom i magnetskom polju se nalaze u trećem i četvrtom poglavlju. Peto poglavlje obuhvaća zakonsku regulativu i njime su obuhvaćeni zakoni i pravilnici koji su na snazi u RH, a govore o utjecaju elektromagnetskih polja. Simulacije izrađene u računalnom programu i realni primjer mjerenja se nalazi u šestom poglavlju.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je objasniti utjecaj i djelovanje električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice. Nadalje, potrebno je definirati najveće dopuštene vrijednosti električnih i magnetskih polja distribucijske trafostanice. Uz to, potrebno je izraditi računalni model distribucijske trafostanice te odrediti iznose i raspodjelu električnog i magnetskog polja.

## 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

U literaturi [1] autor Branislav Kuzmanović iznosi temeljne zakone, metode i pojave na kojima se temelji elektrotehnika, a samim time daje i teorijsku osnovu na kojoj se temelji daljnje istraživanje diplomskog rada. Autor je knjigu podijelio na tri dijela, prvi dio knjige obrađuje elektrostatiku, drugi dio knjige obrađuje strujne krugove i treći dio knjige je posvećen elektromagnetizmu. Za izradu računalnog modela i izvođenje simulacija potrebno je poznavati pojave električnog, magnetskog i elektromagnetskog polja koje je opisao autor u knjizi. Autori u znanstvenom časopisu [2] proučavaju utjecaj električnog i magnetskog polja u trafostanici zatvorenog tipa 132/11,5 kV koja se nalazi na Cipru. Na ovo istraživanje potakla ih je briga opće populacije o navodnoj vezi između izloženosti elektromagnetskog zračenja pri izuzetno niskim frekvencijama i povećanog rizika od raka, te nedostatak literature koja se bavi mjerenjima elektromagnetskog polja. Različiti istraživači prije su se više detaljno bavili mjerenjima i razradom modela za određivanje električnih i magnetskih polja oko prijenosnih vodova, posebno onih koji prolaze kroz stambeno područje. Proučavana zgrada transformatorske stanice je podijeljena na dva dijela, kontrolni dio i dio gdje su instalirani transformatori te GIS postrojenje. U trafostanici su instalirana tri identična transformatora nominalne snage 31,5 MVA i prijenosnog omjera 132/11,5 kV. Tijekom mjerenja transformator 1 je bio izvan pogona, a transformatori 2 i 3 su radili na trećini svoje nominalne snage. Mjerenje električnog i magnetskog polja su radili s EFA-3 analizatorom. Mjerenja su izvodili u visini glave (1,80 m od površine poda), u visini struka (1 m od površine poda) i na samoj površini poda. Rezultati mjerenja su pokazali da su vrijednosti jakosti električnog polja koje su izmjerene unutar svih prostorija daleko ispod referentne razine za sigurno izlaganje. Vrijednosti jakosti magnetskog polja su bile visoke u prostorijama gdje se nalaze transformator 2 i transformator 3 (oko sigurne granice za profesionalnu izloženost), ali kada se svedu na nominalnu snagu transformatora onda prelaze i tu granicu. Zaposlenici koji rade u kontrolnim sobama su izloženi vrlo niskoj jakosti magnetskog polja. Autori su zaključili da nema razloga za brigu za zdravlje zaposlenika jer izmjerene vrijednosti nisu opasne prema smjernicama, a tijekom popravaka ili planiranih održavanja transformatori su isključeni i stoga ne mogu radnici biti izloženi visokim vrijednostima magnetskog polja. U literaturi [3] autori se bave mjerenjima srednje frekvencijskih električnih i magnetskih polja u kućanstvima. Povijesno gledano, istraživanja su se više fokusirala na izloženost ljudi električnim i magnetskim poljima izuzetno niske frekvencije (1 Hz do 300 Hz) i radio frekvencije (3 kHz do 300 GHz). Zbog povećanja korištenja kućanskih uređaja s električnim komponentama koje rade u srednje frekvencijskom području (300 Hz do 1 MHz) i nedostatka istraživanja kakvi su potencijalni učinci na ljudsko tijelo



u tome području, autori odlučuju više istražiti to područje. Istraživanje se odvijalo u 42 domaćinstva koja se nalaze u Belgiji, Sloveniji i Velikoj Britaniji. Mjerenja su se izvodila u prostorijama u kojima stanari najviše borave i to na način da se polje mjeri kada nitko nije kod kuće te kada su stanari kod kuće i koriste sve uređaje (svjetla, kuhinjski uređaji, televizori, itd.). Mjerenja na udaljenostima 1 m ili više od kućanskog uređaja koji radi na srednje frekvencijskom području ukazuju na to da su razine polja općenito niske. Korištenje određenih kućanskih uređaja (indukcijski štednjaci, LCD zasloni, mikrovalne pećnice, kompaktne fluorescentne svjetiljke ) na malim udaljenostima (20 cm i manje) može rezultirati izloženosti iznad 5 % referentne razine prema Međunarodnoj komisiji za zaštitu od neionizirajućeg zračenja (2010) koristeći IEC ili ICNIRP pravila zbrajanja. Autori iz literature [4] se bave mjerenjima i predviđanjima električnih i magnetskih polja iz prijenosnih i distribucijskih vodova. Mjerenja su obavljena na različitim visinama ljudskog tijela u blizini prijenosnih i distribucijskih vodova koji rade na frekvenciji od 50 Hz pri različitim strujama i pri tri različita napona od 11, 66 i 132 kV. Cilj ovih mjerenja je da potvrda zadovoljavaju li se smjernice za izloženost električnom i magnetskom polju koje je 1998. godine objavila Međunarodna komisija za zaštitu od neionizirajućeg zračenja. Ova mjerenja su također korištena za razvoj modela koji može predvidjeti magnetsko polje proizvedeno u nadzemnim, podzemnim prijenosnim i distribucijskim dalekovodima pomoću SCADA sustava u preopterećenim razdobljima. Rezultati mjerenja električnih i magnetskih polja u mreži dalekovoda zadovoljavaju smjernice Međunarodne komisije za zaštitu od neionizirajućeg zračenja, te se zaključuje da su javnost i radno osoblje sigurni od električnih i magnetskih polja koja proizvode dalekovodi. Skupina autora iz literature [5] bavi se eksperimentalnim mjerenjima, analizom i predviđanjem električnih i magnetskih polja u trafostanicama otvorenog tipa. Analiziraju vrijednosti električnog i magnetskog polja unutar sedam trafostanica 132/11 kV otvorenog tipa. Potaknuti zabrinutosti javnosti zbog mogućih zdravstvenih učinaka koja ova polja mogu izazvati, primjerice sve veći broj slučajeva raka u Republici Cipru posljednjih nekoliko godina. Rezultatima mjerenja je utvrđeno da su maksimalne vrijednosti gustoće električnog i magnetskog toka u vanjskim jedinicama ispod sigurnosnih smjernica Međunarodne komisije za zaštitu od neionizirajućeg zračenja. U jednoj prostoriji u blizini kontrolne sobe je izmjereno da gustoća magnetskog toka prelazi sigurnosnu granicu za čak 6,26 puta za profesionalnu izloženost.

### 3. ELEKTRIČNO POLJE

Električno polje je prisutno oko svih naelektriziranih tijela te je odgovorno za prenošenje sila međusobnog djelovanja između tih tijela. To znači da naboj  $Q_1$  djeluje na naboj  $Q_2$  putem fizičkog prijenosa koji se odvija u tom prostoru. Izolirani naboj  $Q_1$  stvara u cijelom prostoru oko sebe električno polje i vidljivo se manifestira kao mehanička sila koja djeluje na uneseni naboj  $Q_2$  u taj prostor. U elektrostatici se koristi standardna definicija električnog polja : „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.“ [1] Na temelju standardne definicije zaključuje se da je električno polje vektorska veličina koja se računa prema sljedećem izrazu :

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

gdje je  $\vec{E}$  - vektor jakosti električnog polja,  $\vec{F}_0$  - vektor sile na probni naboj,  $Q_0$  - probni naboj .

Pri tome treba napomenuti da probni naboj  $Q_0$  treba biti dovoljno mali da ne može uzrokovati na pomake naboje izvan polja i na taj način da promjeni električno polje.

Jakost ili intenzitet električnog polja je jedna karakteristična veličina električnog polja i definira se kao omjer mehaničke sile  $F$  i naboja  $Q$ . [1]

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{\text{njutn}}{\text{kulon}} = 1 \frac{N}{C} \quad (3-2)$$

Češće se upotrebljava sljedeća mjerna jedinica :

$$E = \frac{\text{volt}}{\text{metar}} = 1 \frac{V}{m} \quad (3-3)$$

Mehanička sila koja se javlja samo u prisustvu pokusnog naboja nije dovoljan dokaz da električno polje postoji kao fizička pojava, već kao matematički pojam koji omogućuje jednostavniji opis međudjelovanja između električnih naboja. No, kada se naboji gibaju, uz električno polje javlja se i magnetsko polje, tj. stvara se elektromagnetsko polje koje se širi nekom konačnom brzinom u obliku elektromagnetskih valova.

### 3.1. Električno polje točkastog naboja

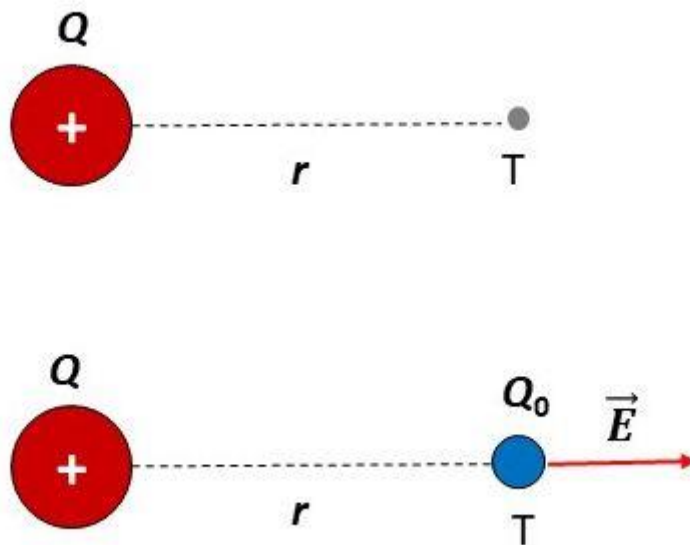
Jakost električnog polja određuje se pomoću pokusnog naboja  $Q_0$ . Za pokusni naboj se uzima da je jako malen zbog razloga da ne utječe na električno polje tako da ne utječe na pomake naboja izvan polja. Sila koja djeluje na pokusni naboj  $Q_0$  određena je Coulombovim zakonom :

$$F = k_0 \frac{Q Q_0}{r^2} \quad (3-4)$$

gdje je  $F$  - sila koja djeluje na pokusni naboj,  $k_0$  - Coulombova konstanta čija je vrijednost u vakuumu  $k = 8.98755 \cdot 10^9 \text{ (N} \cdot \text{m}^2)/\text{C}^2$ ,  $r$  – razmak između danih naboja,  $Q$  – točkasti naboj,  $Q_0$  – pokusni naboj .

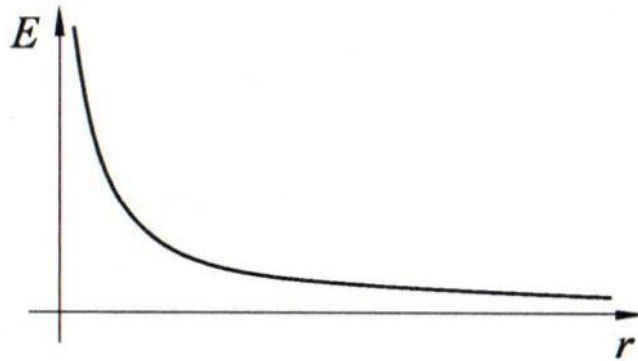
Uvrštavanjem izraza za silu koja djeluje na pokusni naboj (3-4) u izraz za jakost električnog polja (3-2) dobivamo da je jakost električnog polja točkastog naboja u promatranoj točki :

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2} \quad , \quad (r > 0) \quad (3-5)$$



**Slika 3.1.** Određivanje jakosti električnog polja točkastog naboja [6]

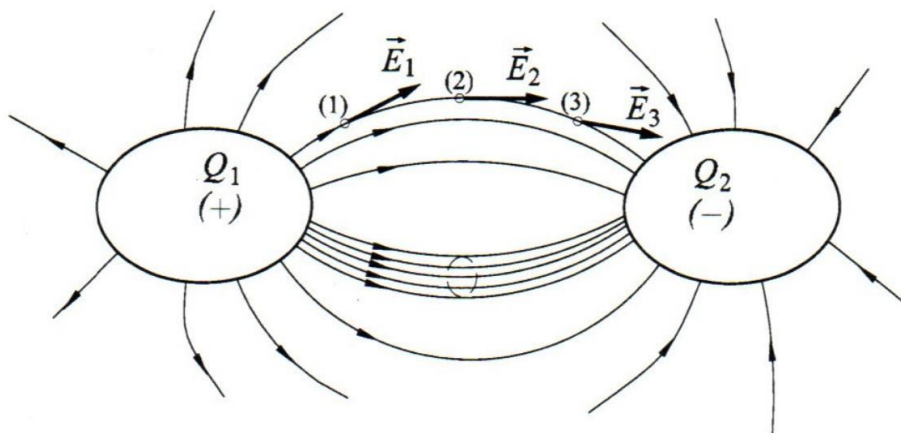
Jakost električnog polja ovisi o kvadratu udaljenosti između promatranih naboja. Prema tome zaključuje se da jakost električnog polja naglo raste kada se točka promatranja približava točkastom naboju. Na slici 3.2. je prikazana ovisnost jakosti električnog polja o udaljenosti.



**Slika 3.2.** Jakost električnog polja u ovisnosti o udaljenosti [1]

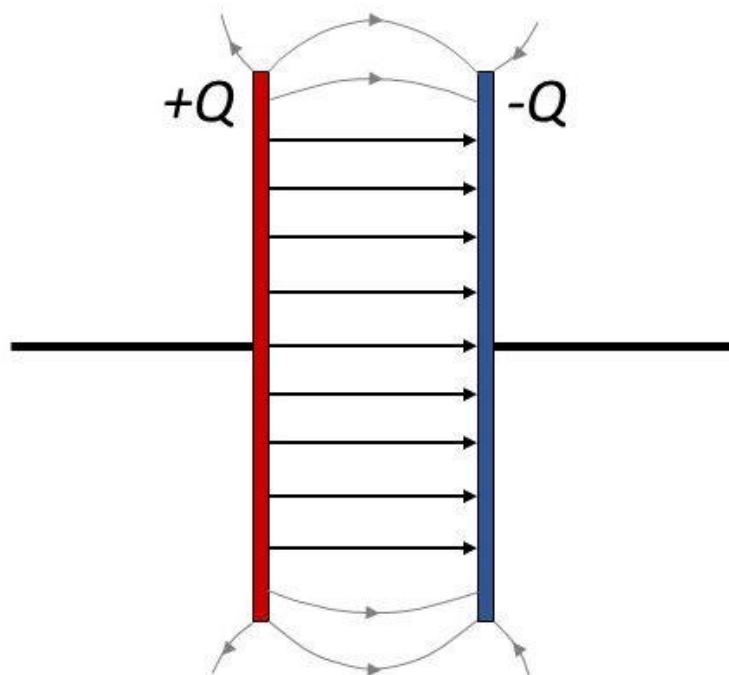
### 3.2. Silnice električnog polja

Zahvaljujući M. Faradeyu koji prvi uvodi pojam linije sila i na taj način omogućava prikazivanje i lakše shvaćanje vizualnog prikaza električnog i magnetskog polja. Pojam linije sila se često još nazivaju kao električne silnice te linije električnog polja. Definicija silnice : „Silnica se definira kao zamišljena linija kojoj je vektor polja u svakoj točki tangenta.“ [1] Na slici 3.3. je prikazan grafički prikaz silnica električnog polja.



**Slika 3.3.** Silnice električnog polja [1]

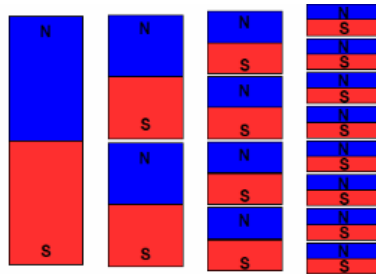
Prema slici 3.3. vidi se da su silnice električnog polja označene sa strelicom na vrhu i imaju svoj smjer koji se poklapa sa smjerom polja. Silnice električnog polja izlaze iz pozitivnog naboja i ulaze u negativni naboj te zbog toga se kaže za elektrostatsko polje da je izvorno polje. Također prema slici 3.3. vidi se da se silnice ne presijecaju. Broj silnica je konstantan, ali udaljavanjem od naboja njihova se gustoća smanjuje. Prema tome zaključuje se da je električno polje najjače na mjestu gdje su silnice najgušće. Za takvo električno polje u kojemu se mijenja gustoća silnica kaže se da je nehomogeno. Kod homogenog električnog polja je gustoća silnica ista u cijelom prostoru i jakost polja je ista u svim točkama. Na slici 3.4. je prikazano homogeno električno polje.



**Slika 3.4.** Homogeno električno polje [6]

## 4. MAGNETSKO POLJE

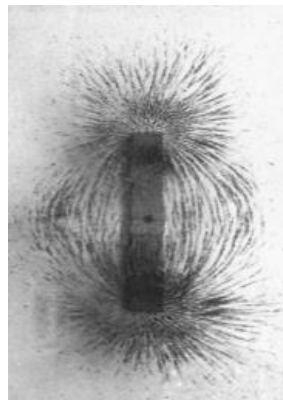
U povijesti su ljudi zapazili kako neke određene željezne rude privlače željezne predmete koji se nalaze u njihovoj blizini te se na taj način to željezo magnetizira i postaje umjetni magnet. Danas se umjetni magneti dobivaju protjecanjem struje vodičem. Za magnetsko polje može se reći da je to prostor u kojem možemo opaziti učinke magnetskog polja kao što je djelovanje magnetske sile na naboj u gibanju, na magnet te na meko željezo. Prirodni i umjetni magneti imaju magnetske polove, u svakom polu su najjače izražena svojstva privlačenja nemagnetiziranog željeza. Razlikuje se sjeverni i južni magnetski pol. Suprotni magnetski polovi se privlače, a istoimeni magnetski polovi se odbijaju. Magnetski polovi ne mogu se razdvojiti, ako se prepolovi magnet dobije se dva manja magnet a s oba pola.[1,8] Slika 4.1. prikazuje magnetske polove magnet a.



Slika 4.1. Prikaz magnetskih polova [7]

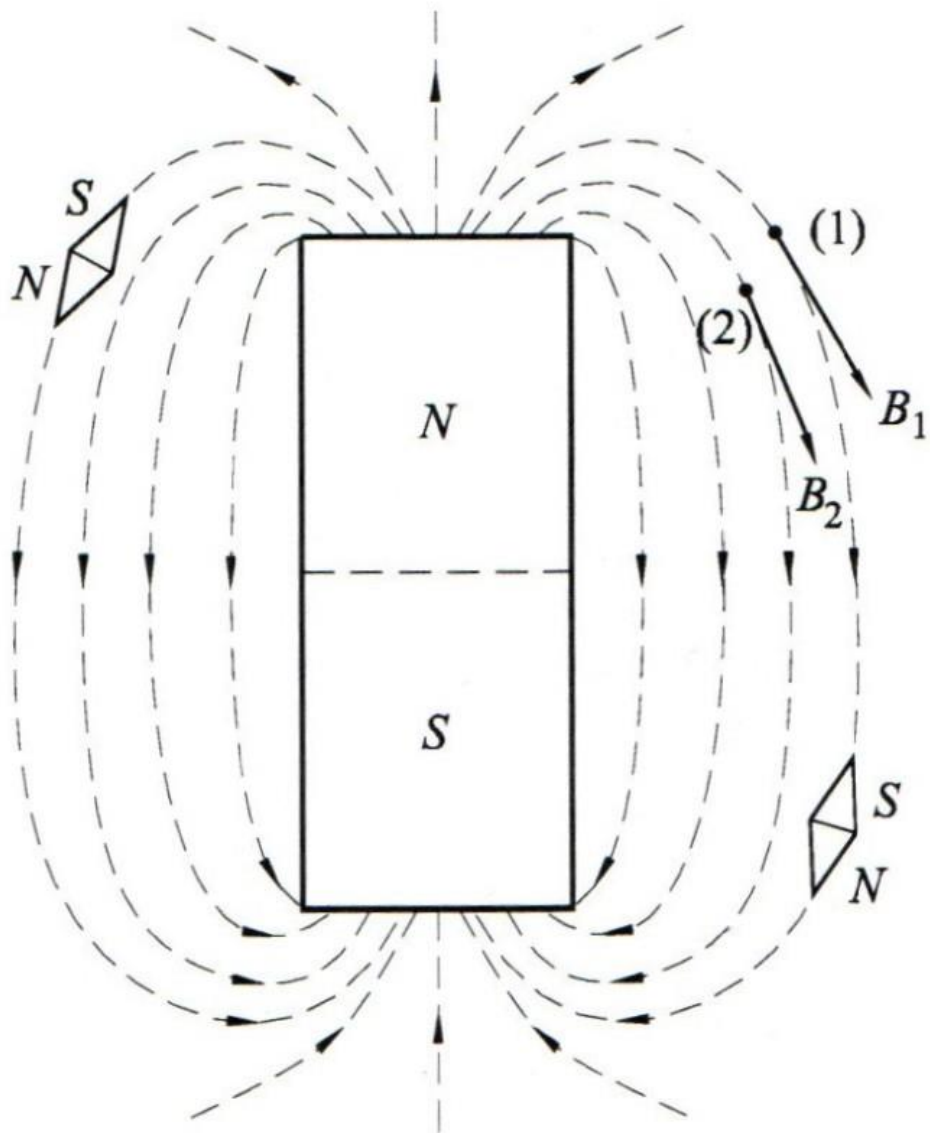
### 4.1. Silnice magnetskog polja

Silnice magnetskog polja se najjednostavnije mogu prikazati pomoću pokusa sa željeznom piljevinom i magnetom. Na ravnu glatku staklenu površinu iznad magnet a postavi se željezna piljevina i lagano se lupka. Željezna piljevina će izgledati kao na sljedećoj slici (Slika 4.2.).



Slika 4.2. Željezna piljevina iznad prirodnog magnet a [7]

Iz toga pokusa može se zaključiti da silnice magnetskog polja izlaze iz sjevernog pola i ulaze u južni pol. Također vidi se da je polje nehomogeno jer je polje najjače tamo gdje su silnice najgušće, a udaljavanjem se smanjuje gustoća silnica. Na slici 4.3. su prikazane silnice nehomogenog magnetskog polja prirodnog magneta.

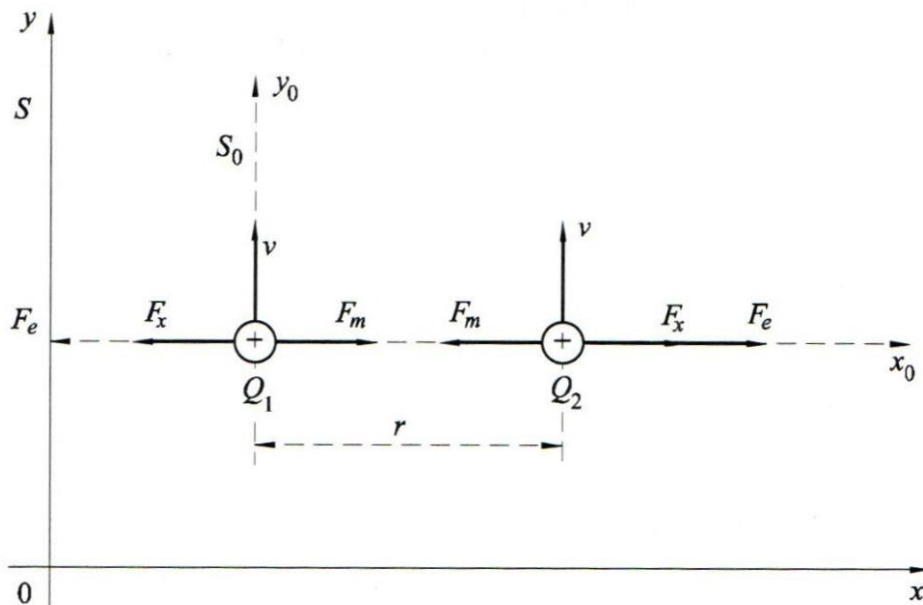


**Slika 4.3.** Silnice magnetskog polja prirodnog magneta [1]

## 4.2. Magnetska indukcija

Postojanje magnetskog polja može se objasniti u primjeru u kojem se dva naboja gibaju te se javlja dodatna sila između njih. Naboji  $Q_1$  i  $Q_2$  miruju u inercijalnom sustavu  $S_0$  koji se giba brzinom  $v$  u odnosu na mirni inercijalni sustav  $S$ . Ako se u inercijalnom sustavu  $S_0$  vlada sila  $F_0$  između naboja tada na temelju teorije relativnosti može se zaključiti da se smanjila sila koja je okomita na smjer gibanja. [1] Iznos te sile jednak je :

$$F_x = F_{0x} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (4-1)$$



**Slika 4.4.** Sila između dvaju mirnih naboja u inercijalnom sustavu  $S_0$  koji se giba brzinom  $v$  u odnosu na mirni inercijalni sustav  $S$  [1]

S obzirom da je  $F_{0x}$  Coulombova sila , jednadžbu raspisujemo :

$$F_x = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2 \cdot c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (4-2)$$



Iznad prikazana jednađba (4-2) raščlanjuje se na dva dijela, gdje prvi dio jednađbe predstavlja komponentu električne sile, a drugi dio jednađbe predstavlja komponentu magnetske sile. Komponenta magnetske sile :

$$F_m = \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2 \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = Q_2 \cdot v \cdot B \text{ [N]} \quad (4-3)$$

Druga komponenta sile, prikazana jednađbom (4-3) pojavljuje se uslijed djelovanja magnetskog polja. Magnetska indukcija  $B$  je veličina koja karakterizira magnetsko polje. U jednađbi (4-3) gibajući naboj  $Q_1$  na mjesto naboja  $Q_2$  je stvorio magnetsku indukciju koja ima iznos :

$$B = \mu_0 \cdot \frac{Q_1 \cdot v}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ [T]} \quad (4-4)$$

Permeabilnost vakuuma je konstantna i njena oznaka je  $\mu_0$  te iznosi:

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ [V} \cdot \text{s/A} \cdot \text{m]} \quad (4-5)$$

Mjerna jedinica za magnetsku indukciju je tesla (T) i dobila je ime po velikom izumitelju Nikoli Tesli koji je rođen u Hrvatskoj. Magnetska indukcija je vektorska veličina ( $\vec{B}$ ). Budući da su sila i brzina iz jednađbe (4-3) vektorske veličine, magnetska brzina se može zapisati na sljedeći način :

$$\vec{F}_m = Q_2(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (4-6)$$

Vrijednosti magnetske indukcije koje postoje u današnjem svijetu imaju široke granice. Tako imaju primjeri gdje horizontalna komponenta magnetske indukcije Zemlje u našim krajevima iznosi oko  $0,2 \cdot 10^{-4}$  T, kod električnih strojeva 1,6 T ovisno o vrsti materijala i kod supervodljivih magneta čak preko 30 T. [1]

## 5. ZAKONSKA REGULATIVA

Zbog sumnji utjecaja elektromagnetskih polja na ljudsko zdravlje postoje zakoni, pravilnici i norme kojima su definirane dopuštene vrijednosti izloženosti elektromagnetskom polju. Zbog toga su u Republici Hrvatskoj na snazi Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja (N.N., br. 91/10.), Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja (N.N., br. 146/14), Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja (N.N., br. 31/19) te Pravilnik o zdravstvenim uvjetima koji moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja (N.N., br. 59/16.). Također Republika Hrvatska preuzima smjernice Direktive 2013/35/EU, koje se odnose na zaštitu radnika od rizika izloženosti elektromagnetskim poljima. Prema svemu tome poslodavci imaju propisane obveze te su dužni napraviti procjenu rizika i odrediti izloženost elektromagnetskom polju, pokušati izbjeći ili smanjiti rizik izloženosti elektromagnetskom polju, trebaju informirati radnike i osposobiti ih za rad pod utjecajem elektromagnetskog polja. Zakonom o zaštiti od neionizirajućeg zračenja se uređuje zaštita od neionizirajućeg zračenja u cilju da se smanji opasnost za zdravlje ljudi koji su izloženi neionizirajućim zračenjem. Utvrđuju se gornje dopuštene granice izloženosti ljudi neionizirajućem zračenju te se daju mjere za zaštitu od neionizirajućeg zračenja. Postrojenja, građevine i uređaji koji sadrže izvore elektromagnetskih polja se smiju upotrebljavati i staviti u pogon samo ako zadovoljavaju propisane zahtjeve. Zaposlenici koji su izloženi zračenju iznad granica propisanih pravilnikom moraju zadovoljavati posebne zdravstvene uvjete. [8] Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja se propisuju granične vrijednosti elektromagnetskih polja, postupci provjeravanja graničnih vrijednosti, dobivanje ovlasti za mjerenja tih graničnih vrijednosti. Definirane su granične vrijednosti elektromagnetskih polja, propisana je zaštita ljudi na javnim područjima i područjima povećane osjetljivosti. Pravilnikom o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja se brišu „Granične razine na području profesionalne izloženosti“ koje su se odnosile na zaposlenike koji obavljaju 40 sati tjedno poslove pri kojima su izloženi elektromagnetskom polju. Umjesto profesionalne izloženosti se koriste izrazi „Vrijednosti upozorenja (ALs) za izloženost električnim i magnetskim poljima“ preuzete iz Pravilnika o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja.

Prema tablici 5.1. se izračunavaju granične vrijednosti za javna područja.

**Tablica 5.1.** Granične razine referentnih veličina za javna područja [10]

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

Frekvencija sustava iznosi 50 Hz i prema tome se dobije iznos za jakost električnog polja :

$$E = 2,5 \cdot \frac{10^5}{f} = 2,5 \cdot \frac{10^5}{50} = 5000 \text{ V/m} \quad (5-1)$$

Gustoća magnetskog toka kod javnog područja iznosi :

$$B = 5 \cdot \frac{10^3}{f} = 5 \cdot \frac{10^3}{50} = 100 \text{ μT} \quad (5-2)$$

Prema tablici 5.2. se izračunavaju granične vrijednosti za područja povećane osjetljivosti.

**Tablica 5.2.** Granične razine referentnih veličina za područja povećane osjetljivosti [10]

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

Frekvencija sustava iznosi 50 Hz i prema tome se dobije iznos za jakost električnog polja :

$$E = \frac{10^5}{f} = \frac{10^5}{50} = 2000 \text{ V/m} \quad (5-3)$$

Gustoća magnetskog toka kod područja povećane osjetljivosti iznosi :

$$B = 2 \cdot \frac{10^3}{f} = 2 \cdot \frac{10^3}{50} = 40 \text{ μT} \quad (5-4)$$

Na tablicama 5.3. i 5.4. su dane vrijednosti upozorenja za izloženost električnim i magnetskim poljima.

**Tablica 5.3.** Vrijednosti upozorenja za izloženost električnim poljima od 1 Hz do 10 MHz [11]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja E [V/m]	Visoke vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja E [V/m]
$1 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$
$25 \text{ Hz} \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5,0 \cdot \frac{10^5}{f}$	$2,0 \cdot 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64 \text{ kHz}$	$5,0 \cdot \frac{10^5}{f}$	$1,0 \cdot \frac{10^6}{f}$
$1,64 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5,0 \cdot \frac{10^5}{f}$	$6,1 \cdot 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,7 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$

Frekvencija sustava iznosi 50 Hz i prema tome se dobije iznos za jakost električnog polja :

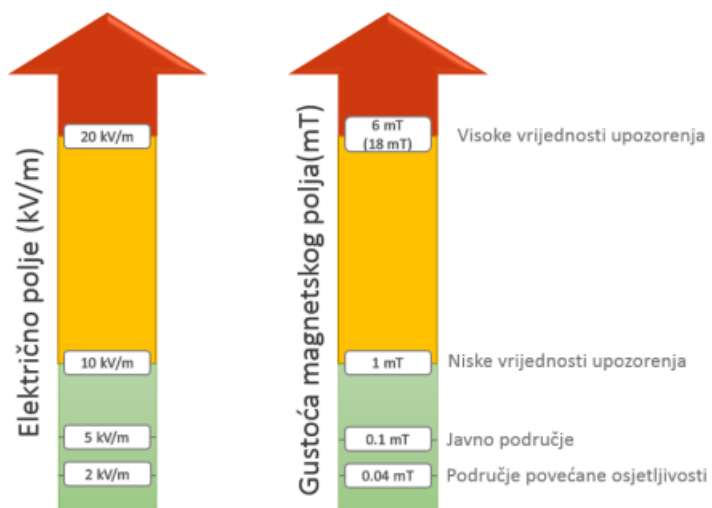
$$E = 5 \cdot \frac{10^5}{f} = 5 \cdot \frac{10^5}{50} = 10000 \text{ V/m} \quad (5-5)$$

**Tablica 5.4.** Vrijednosti upozorenja za izloženost magnetskim poljima od 1 Hz do 10 MHz [11]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu$ T]	Visoke vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu$ T]
$1 \text{ Hz} \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \cdot \frac{10^5}{f^2}$	$3,0 \cdot \frac{10^5}{f}$
$8 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \cdot \frac{10^4}{f}$	$3,0 \cdot \frac{10^5}{f}$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot \frac{10^5}{f}$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \cdot \frac{10^5}{f}$	$3,0 \cdot \frac{10^5}{f}$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$

Gustoća magnetskog toka za niske vrijednosti upozorenja izloženosti magnetskim poljima iznosi  $1000 \mu\text{T}$ .

Na sljedećoj slici (Slika 5.1.) je prikazan grafički prikaz graničnih razina za električna polja i gustoću magnetskog toka :



**Slika 5.1.** Granične razine električnog polja i gustoće magnetskog polja [12]

## 6. SIMULACIJE I REZULTATI MJERENJA

### 6.1. Opis transformatorske stanice

Transformatorska stanica naziva KTS 220 Osijek 10/0,4 kV nalazi se u naselju Uske Njive, 31000 Osijek na koordinatama 45°32'28.9"N 18°41'56.7"E. Na slici 6.1. vidljiva je odabrana transformatorska stanica koja se nalazi u blizini stambenih objekata, parkirališta, nogostupa i ceste.



Snimanje fotografija: stu 2014 © 2023 Google

**Slika 6.1.** Transformatorska stanica KTS 220 Osijek 10/0,4 kV [14]

Odabrana transformatorska stanica prikladna je za mjerenje električnog i magnetskog polja zbog toga što se u blizini transformatorske stanice nalaze stambeni objekti te su stanovnici svakodnevno izloženi električnom i magnetskom polju i to područje naziva se područje povećane osjetljivosti. U blizini transformatorske stanice se nalazi nogostup, parkiralište i transformatorska stanica se nalazi jednim dijelom u dvorištu stambenog objekta te je zbog tog razloga prikladno provesti mjerenja električnog i magnetskog polja jer osobe koje prolaze u blizini transformatorske stanice su izložene električnom i magnetskom polju i to područje naziva se javno područje. Ulaz u transformatorsku stanicu je dopušten samo radnicima koji obavljaju poslove unutar transformatorske stanice i upoznati su s mogućnošću izlaganja polju.

Odabrana transformatorska stanica je distributivni elektroenergetski objekt koji služi za distribuciju električne energije na naponskom nivou 10 kV i transformaciji 10/0,4 kV. Transformatorska stanica je izvedena kao tipska armiranobetonska montažna transformatorska stanica, sastoji se od tipskog betonskog kućišta tlocrtnih dimenzija 498x478 m. Nazivna snaga transformatora transformatorske stanice 630 kVA, grupa spoja Dyn 5. Priključni vodovi KTS 174 Osijek i KTS 203 Osijek izvedeni su podzemno kabelom XHE 49A, 3x(1x150)mm<sup>2</sup>. Vodovi na NN strani su izvedeni podzemno kabelom XP 00A 4x150 mm<sup>2</sup>. Prema prikupljenoj dokumentaciji iz 2021. godine na NN strani je bilo izvedeno 13 kabela. Na slici 6.2. prikazana je transformatorska stanica oko koje je potrebno izmjeriti vrijednosti električnog i magnetskog polja.

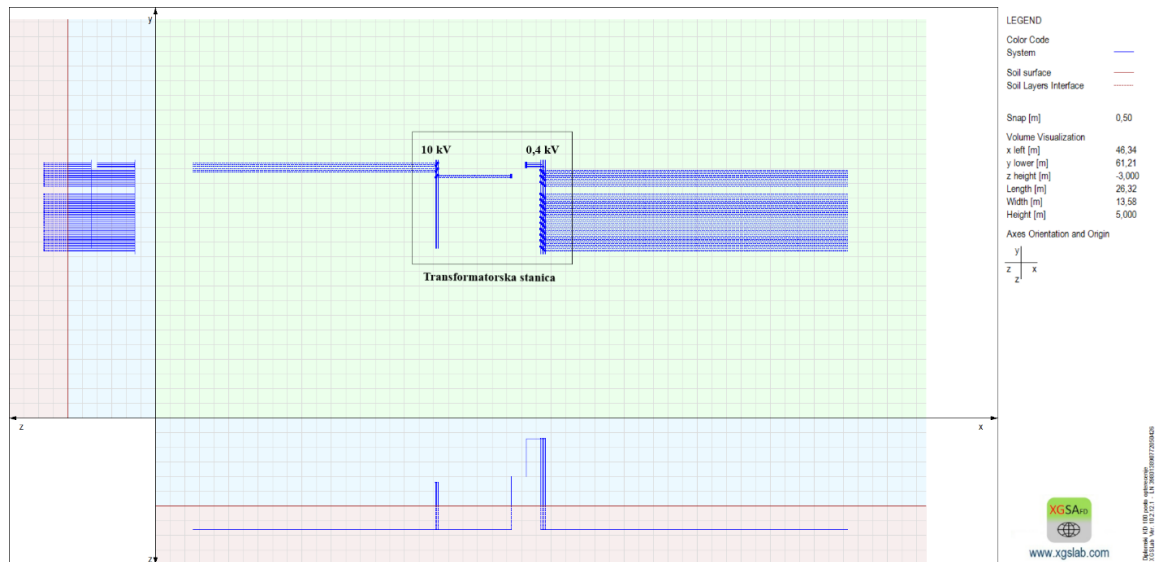


**Slika 6.2.** Transformatorska stanica KTS 220 Osijek 10/0,4 kV

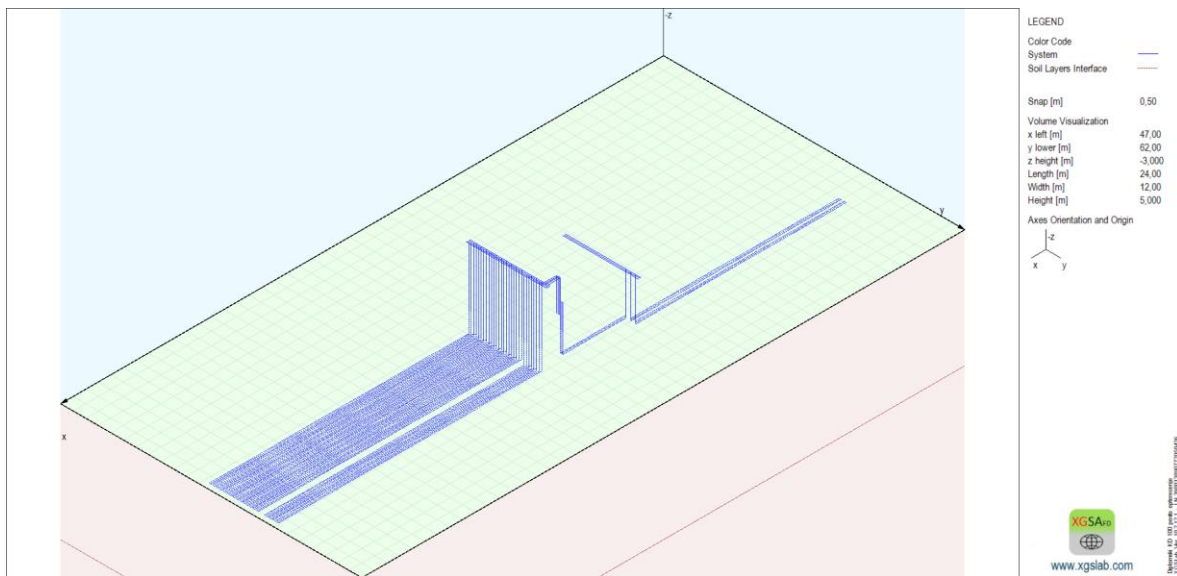


## 6.2. Model transformatorske stanice

Model transformatorske stanice izrađen je u programu naziva XGSLab u modulu programa XGSA FD. Prema prikupljenoj dokumentaciji za transformatorsku stanicu 10/0,4 kV nacrtan je model na kojem su izvršene simulacije za tri slučaja. Model transformatorske stanice prikazan je na slikama 6.3. i 6.4. Model transformatorske stanice se sastoji od 2 kabela na SN strani koja su spojena na SN sabirnicu, 13 kabela na NN strani koji su spojeni na NN sabirnicu i kabela od sabirnica do transformatora. Prema prikupljenoj dokumentaciji koja je izrađena 2021. godine na NN strani spojeno je 13 kabela i tako je nacrtano u modelu. Postoji mogućnost da danas postoji više spojenih kabela na NN strani s obzirom da prema dokumentaciji na NN strani ima predviđenih mjesta za nove kabele.



**Slika 6.3.** 2D prikaz modela transformatorske stanice 10/0,4 kV



**Slika 6.4.** 3D prikaz modela transformatorske stanice 10/0,4 kV

Promatrana transformatorska stanica se sastoji od SN i NN dijela, te je na taj način potrebno odrediti iznose napona za dijelove transformatorske stanice koji se nalaze u SN i NN dijelu. Napon u SN dijelu transformatorske stanice iznosi 10 kV, a u NN dijelu transformatorske stanice iznosi 0,4 kV. Prilikom unosa iznosa napona treba pripaziti i na kut napona svake pojedine faze. U programu se za svaku pojedinu fazu unosi napon u polarnom ili kompleksnom obliku kako je prikazano u tablicama 6.1. i 6.2.

**Tablica 6.1.** Iznosi linijskih napona SN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
10000 V	$-5000 + j8660,254 \text{ V}$	$-5000 - j8660,254 \text{ V}$

**Tablica 6.2.** Iznosi linijskih napona NN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
400 V	$-200 + j346,410 \text{ V}$	$-200 - j346,410 \text{ V}$

### 6.3. Simulacija slučaja kada TS radi pod maksimalnim opterećenjem

Prema izrađenom modelu koji je prethodno opisan, izvršena je simulacija na način da transformatorska stanica radi pod maksimalnim opterećenjem. Pod maksimalnim opterećenjem u ovom slučaju podrazumijeva se da su maksimalne struje ravnomjerno podijeljene po kabelima na SN i NN strani.

Za SN stranu na sljedeći način izračunava se maksimalna struja :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 10000} = 36,37 \text{ A} \quad (6-1)$$

Na SN strani nalaze se 2 kabela, prema tome :

$$\frac{36,37}{2} = 18,19 \text{ A / kabele} \quad (6-2)$$

Za NN stranu na sljedeći način izračunava se maksimalna struja :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 909,33 \text{ A} \quad (6-3)$$

Na NN strani nalazi se 13 kabela, prema tome :

$$\frac{909,33}{13} = 69,95 \text{ A / kabele} \quad (6-4)$$

Nakon proračuna struja za maksimalno opterećenje, potrebno ih je unijeti u program kako je prikazano u idućim tablicama (Tablica 6.3. i 6.4.). Isto kao i kod napona, potrebno je pripaziti na pomak između različitih faza.

**Tablica 6.3.** Iznosi struja SN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
18,19 A	$-9,095 + j15,753 \text{ A}$	$-9,095 - j15,753 \text{ A}$

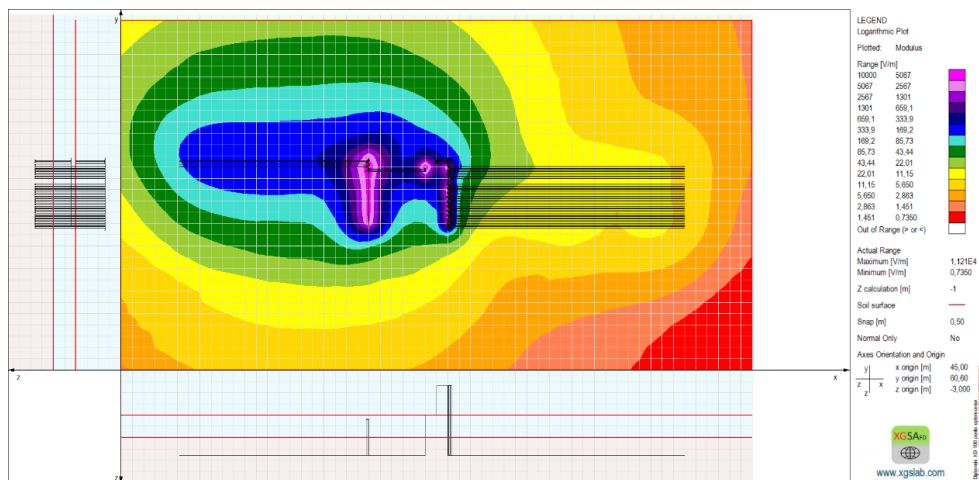
**Tablica 6.4.** Iznosi struja pojedinih faza NN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
69,95 A	$-34,975 + j60,5785 \text{ A}$	$-34,975 - j60,5785 \text{ A}$

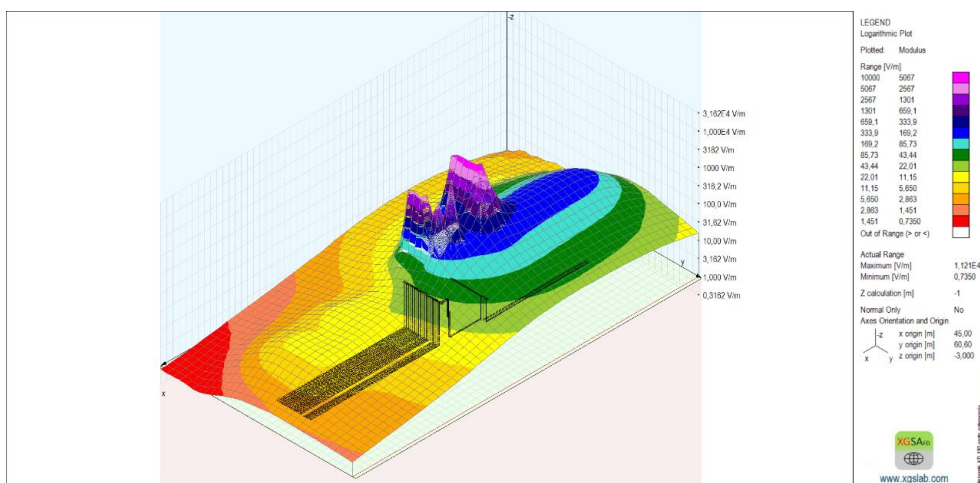
### 6.3.1. Analiza električnog polja

Nakon unosa struja i napona za pojedine dijelove SN i NN transformatorske stanice, pokreće se simulacija analize električnog polja. Prije pokretanja simulacije postavljeno je da se mjeri električno polje na visini od 1 m i postavljene su niske vrijednosti upozorenja (ALs) za jakost električnog polja prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, te vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Nakon provedene simulacije, rezultati raspodjele električnog polja u promatranoj TS mogu se različito grafički prikazati kako je predočeno i idućim slikama (Slika 6.5. i 6.6.).



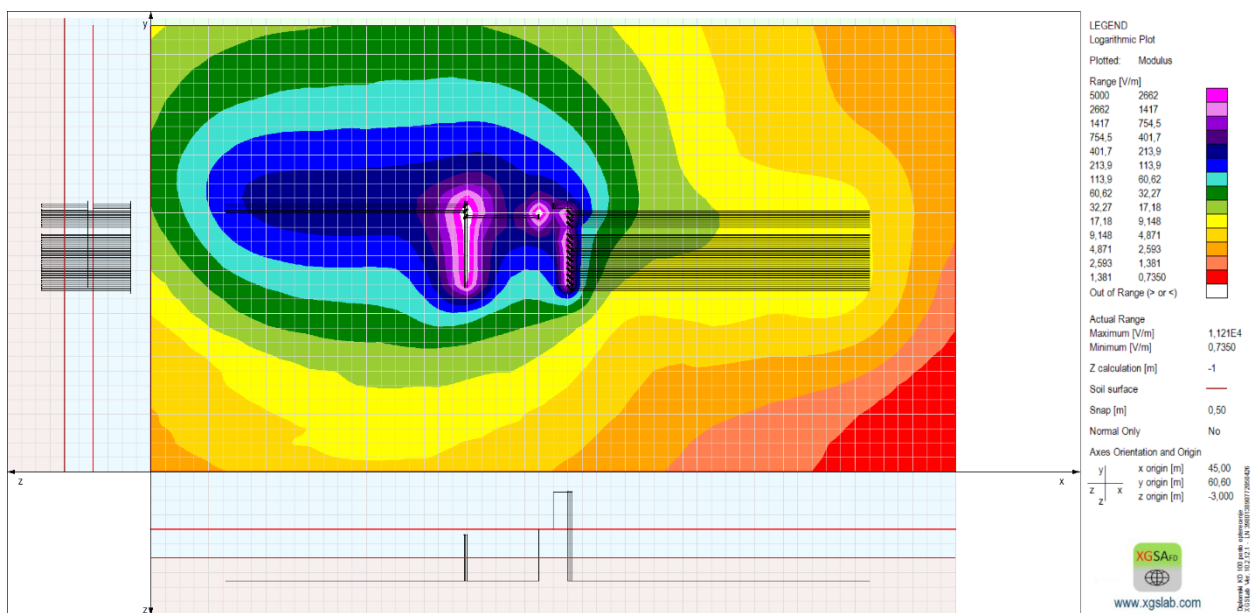
Slika 6.5. 2D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)



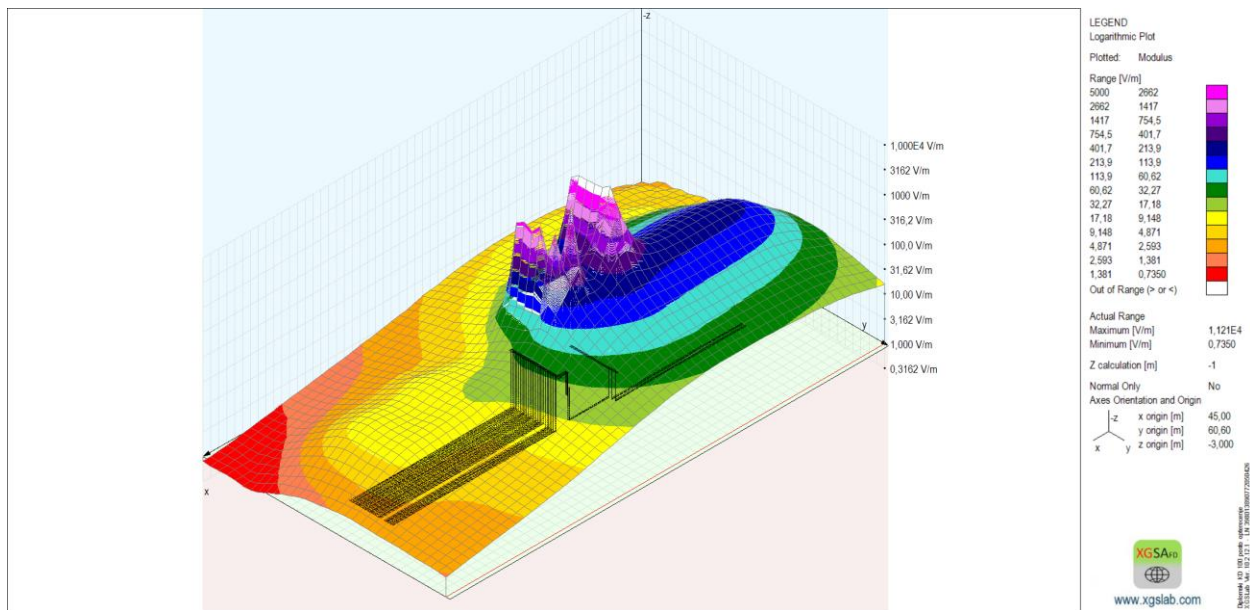
Slika 6.6. 3D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

Prije pokretanja simulacije za niske vrijednosti upozorenja (ALs), u postavkama je postavljena maksimalna vrijednost električnog polja 10000 V/m prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja. Prema dobivenim grafičkim prikazima raspodjele električnog polja, na slikama 6.5. i 6.6. može se očitati maksimalna vrijednost električnog polja koja se pojavljuje u simulaciji i iznosi 11210 V/m, nalazi se na samom transformatoru. Budući da je iznos za niske vrijednosti upozorenja 10000 V/m, može se zaključiti da bi u transformatorskoj stanici mogla postojati opasnost za radnike. No, ta se mogućnost može zanemariti jer se ta maksimalna vrijednost električnog polja nalazi na samom transformatoru. Prema dobivenim slikama 6.5. i 6.6. iz simulacija se vidi da su također veće vrijednosti električnog polja i na samim sabirnicama.

Na idućim slikama (Slika 6.7. i 6.8.) prikazana je raspodjela električnog polja za javna područja.



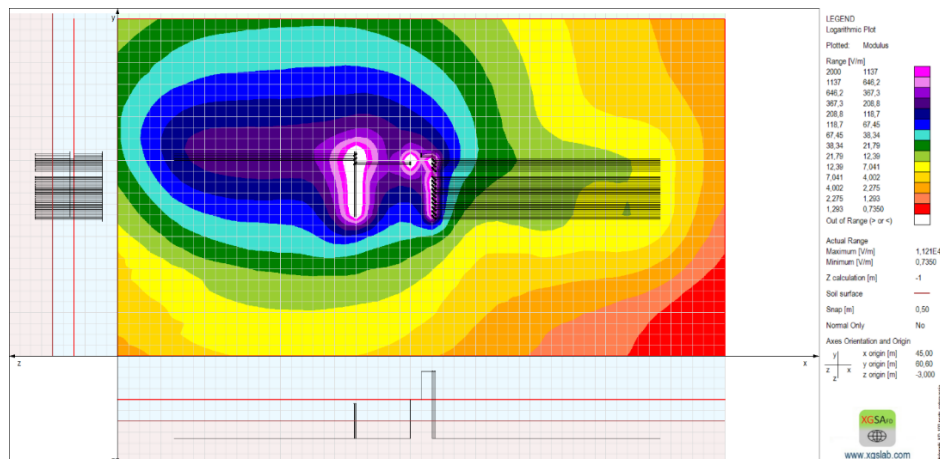
Slika 6.7. 2D prikaz raspodjele električnog polja – javno područje



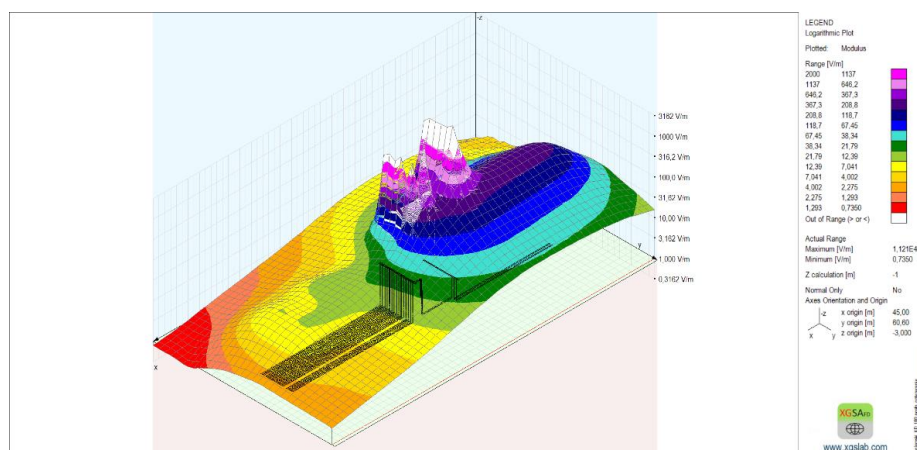
**Slika 6.8.** 3D prikaz raspodjele električnog polja – javno područje

Za simulaciju raspodjele električnog polja kod javnih područja postavljena je vrijednost u postavkama za maksimalno električno polje na 5000 V/m prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja. Prema dobivenim grafičkim prikazima raspodjele električnog polja na slikama 6.7. i 6.8. može se uočiti da je vrijednost električnog polja na samom transformatoru i SN sabirnicama veća od 5000 V/m i iznosi 9225 V/m. Budući da se radi o javnom području, to je manje važno jer se smatra da nitko od opće populacije nema pristup transformatorskoj stanici. Prema dobivenom raspodjelu električnog polja vidi se da je električno polje u okolici transformatorske stanice daleko ispod vrijednosti od 5000 V/m. Stoga se može zaključiti da osobe koje se nađu u blizini transformatorske stanice neće biti izložene značajnim vrijednostima električnog polja.

Na slikama 6.9. i 6.10. prikazana je raspodjela električnog polja za područje povećane osjetljivosti.



**Slika 6.9.** 2D prikaz raspodjele električnog polja – područje povećane osjetljivosti



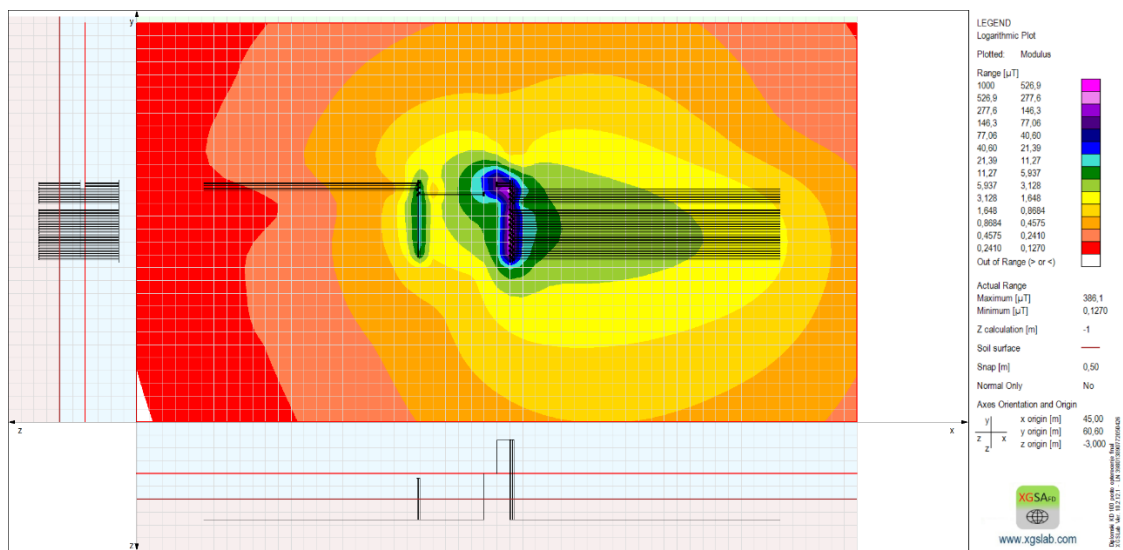
**Slika 6.10.** 3D prikaz raspodjele električnog polja – područje povećane osjetljivosti

Prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja, prije pokretanja simulacije u postavkama je postavljena maksimalna vrijednost električnog polja koja iznosi 2000 V/m. Prema slikama 6.9. i 6.10. raspodjele električnog polja može se uočiti da je vrijednost električnog polja na samom transformatoru i na sabirnicama veća od 2000 V/m. To se smatra manje važno jer je zabranjen ulaz u transformatorsku stanicu općoj populaciji. Prema dobivenom rezultatu raspodjele električnog polja vidi se da je električno polje u okolici transformatorske stanice daleko ispod vrijednosti od 2000 V/m, ono je u rasponu od 10 V/m do 450 V/m. Stoga se može zaključiti da osobe koje žive u stambenim objektima u blizini transformatorske stanice neće biti izložene značajnim vrijednostima električnog polja.

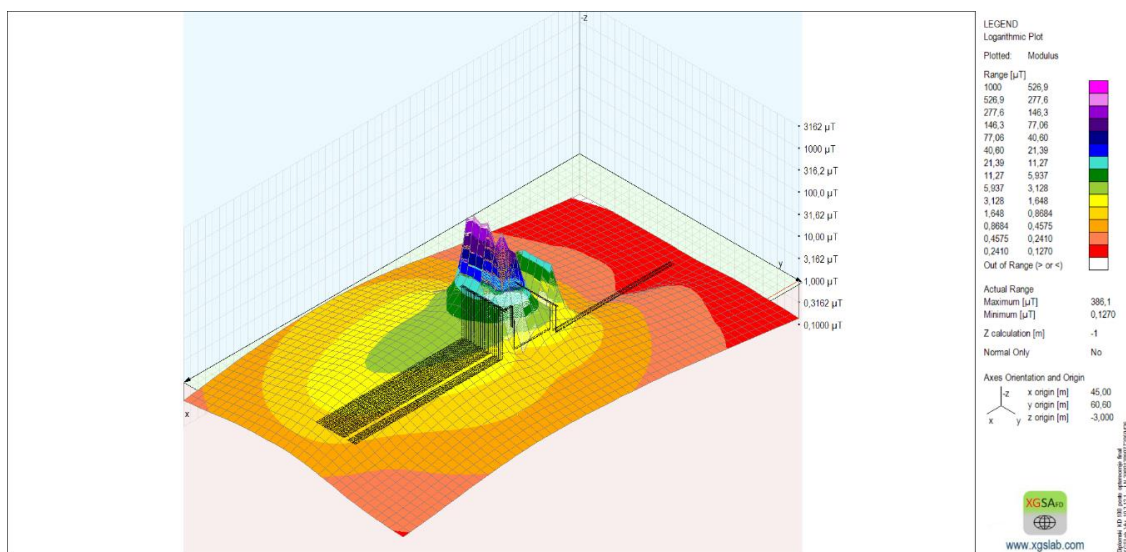
### 6.3.2. Analiza magnetskog polja

Prije pokretanja simulacije postavljeno je da se mjeri magnetsko polje na visini od 1 m i postavljene su niske vrijednosti upozorenja (ALs) za jakost magnetskog polja prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, te vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Nakon pokretanja simulacije dobiveni su rezultati te je raspodjela magnetskog polja prikazana na različite načine na idućim slikama (Slika 6.11 i 6.12.).



Slika 6.11. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

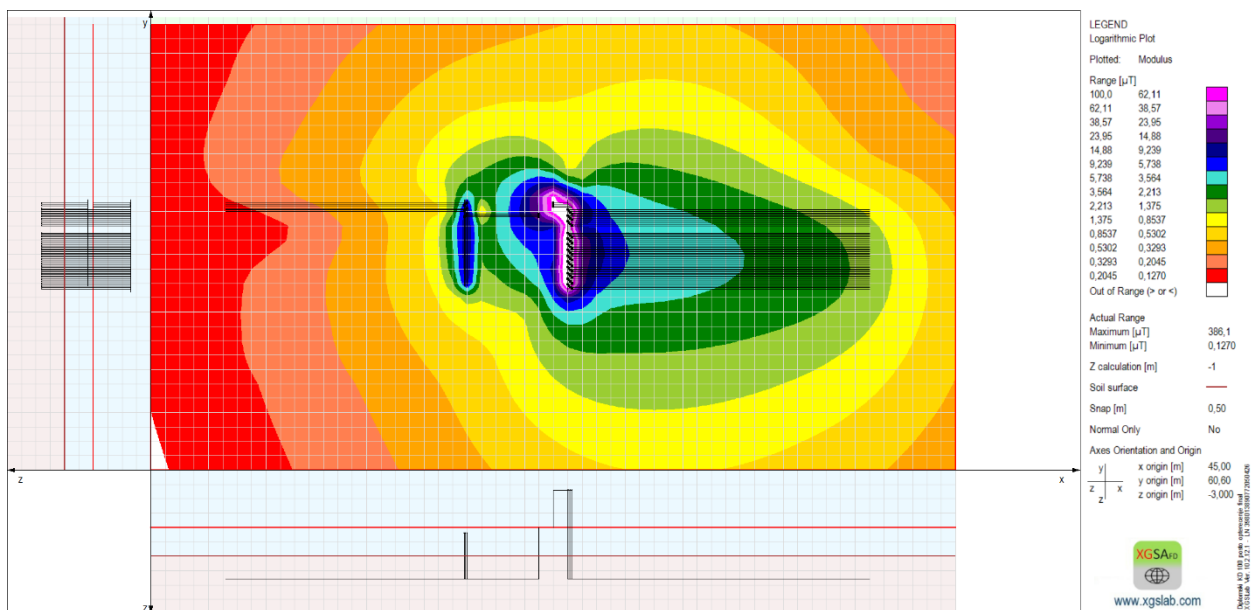


Slika 6.12. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

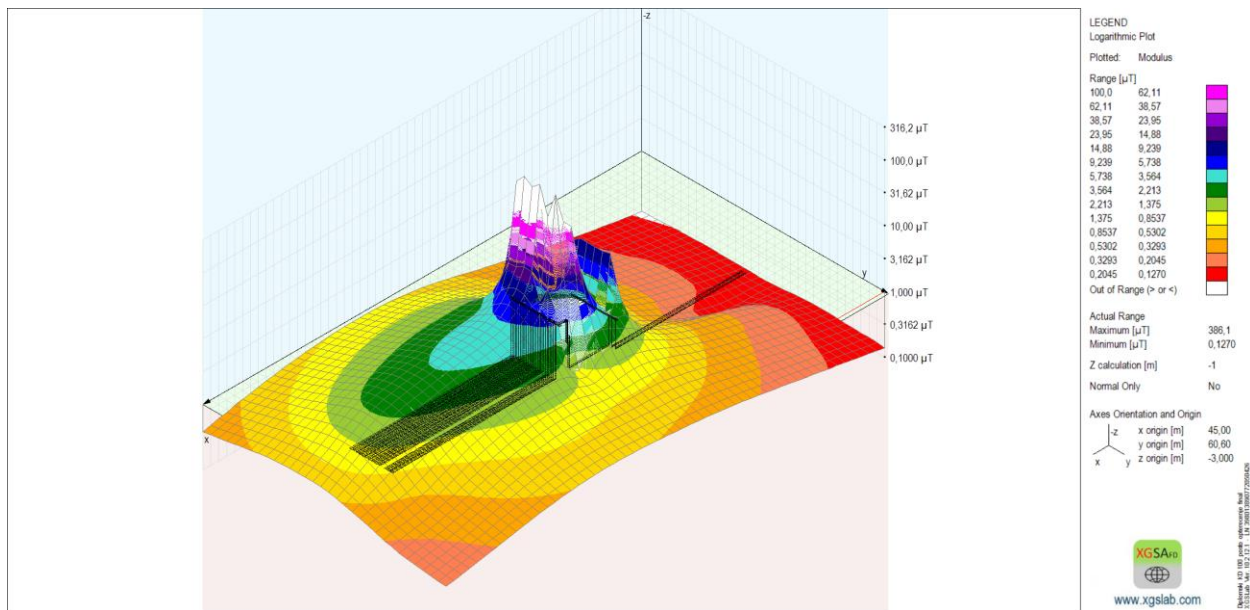


Niske vrijednosti upozorenja (ALs) za izloženost magnetskim poljima prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja iznosi 1000  $\mu\text{T}$ , stoga je u postavkama prije pokretanja simulacije postavljena ta vrijednost. Na slikama 6.11. i 6.12. raspodjele magnetskog polja se može očitati maksimalna vrijednost magnetskog polja koja iznosi 386,1  $\mu\text{T}$ . Budući da je iznos za niske vrijednosti upozorenja 1000  $\mu\text{T}$ , može se zaključiti da radnici nisu izloženi značajnim vrijednostima magnetskog polja. Prema dobivenim slikama 6.11. i 6.12. raspodjele magnetskog polja vidi se da su najviše vrijednosti magnetskog polja na NN sabirnicama i kabelima spojenim na NN sabirnice.

Raspodjela magnetskog polja za javno područje prikazana je na idućim slikama (Slika 6.13. i 6.14.).



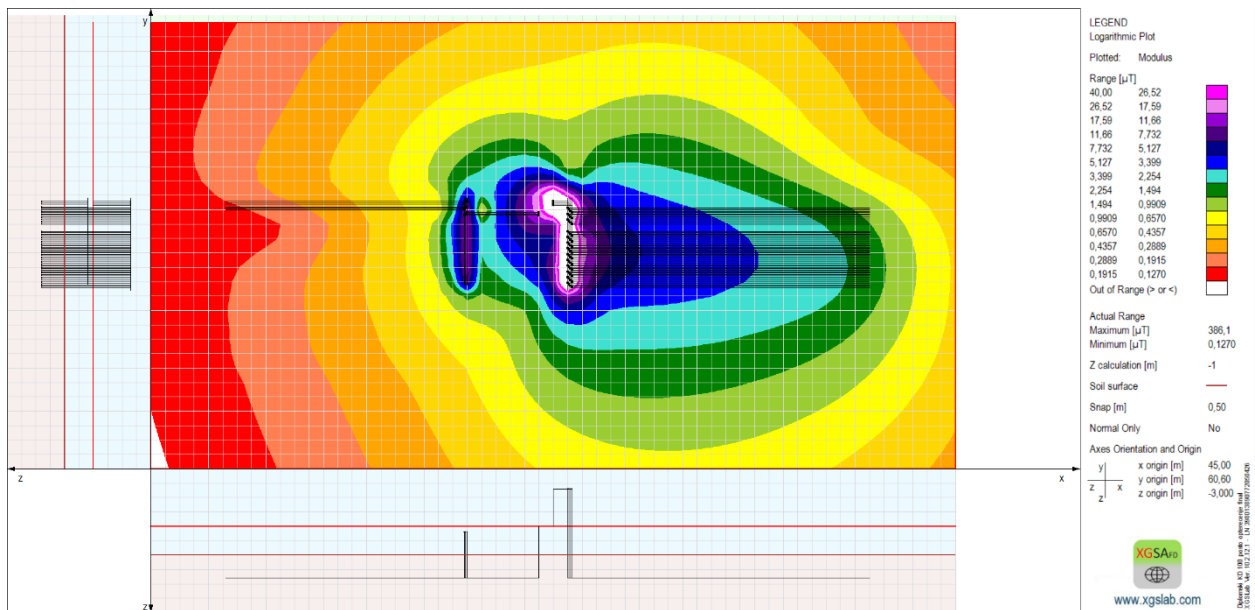
**Slika 6.13.** 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje



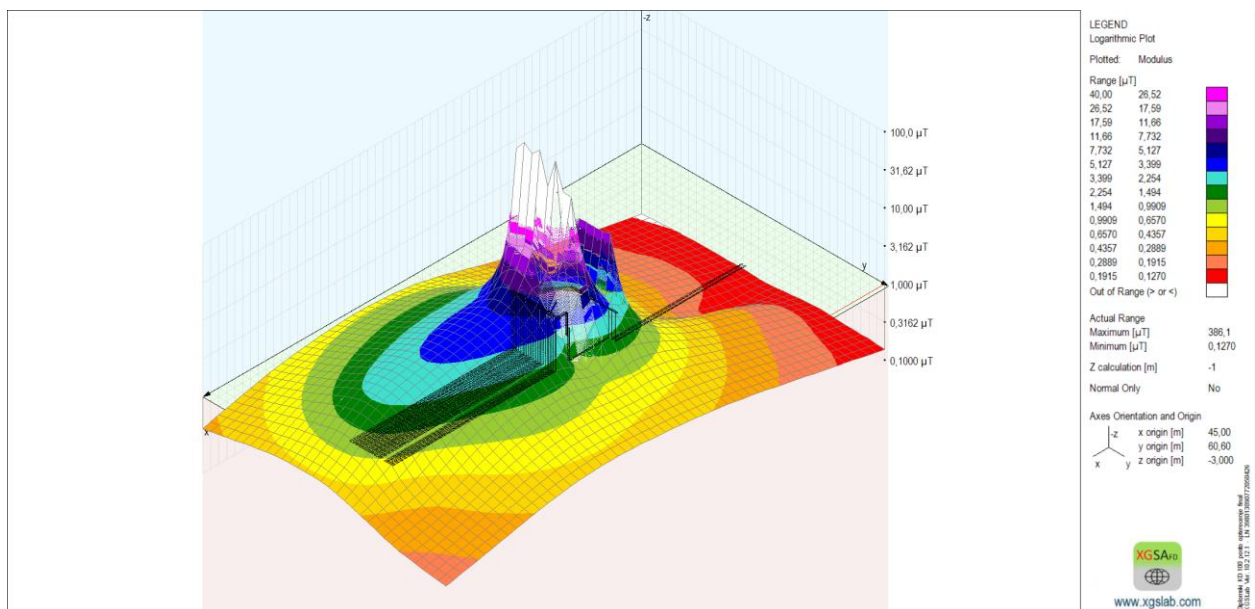
**Slika 6.14.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje

Prije pokretanja simulacije za javno područje, u postavkama je postavljena maksimalna vrijednost magnetskog polja  $100 \mu\text{T}$  prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja. Prema dobivenim slikama 6.13. i 6.14. raspodjele magnetskog polja vidi se da iznos magnetskog polja na samom transformatoru i na NN sabirnici prelazi vrijednost od  $100 \mu\text{T}$ , kreću se u rasponu od  $103,46 \mu\text{T}$  do  $386,1 \mu\text{T}$ . Budući da se radi o javnom području, to nije od velike važnosti jer se smatra da nitko od opće populacije neće biti u transformatorskoj stanici. Prema dobivenom raspodjelu magnetskog polja vidi se da je magnetsko polje u okolici transformatorske stanice daleko ispod vrijednosti od  $100 \mu\text{T}$ . Stoga se može zaključiti da osobe koje se nađu u blizini transformatorske stanice neće biti izložene značajnim vrijednostima magnetskog polja.

Na idućim slikama (Slika 6.15. i 6.16.) prikazana je raspodjela magnetskog polja za područje povećane osjetljivosti.



Slika 6.15. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti



Slika 6.16. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti

U postavkama prije pokretanje simulacije za područje povećane osjetljivosti postavljena je maksimalna vrijednost magnetskog polja iznosa  $40 \mu\text{T}$  prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja. Prema dobivenim slikama 6.15. i 6.16. raspodjele magnetskog polja se može uočiti da magnetsko polje u prostoru u blizini transformatora i NN sabirnica je veće od  $40 \mu\text{T}$ , kreću se u rasponu od  $46,34 \mu\text{T}$  do  $386,1 \mu\text{T}$ . S obzirom da nitko od opće populacije se ne smije nalaziti u transformatorskoj stanici, smatra se da to nije od velike važnosti. Također iz raspodjela magnetskog polja na slikama 6.15. i 6.16. se vidi da je magnetsko polje u okolini transformatorske stanice ispod  $40 \mu\text{T}$ , odnosno u rasponu od  $0,63 \mu\text{T}$  do  $7,7 \mu\text{T}$ , što je u granicama Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja. Prema tome se može zaključiti da ljudi koji žive u stambenim objektima u blizini transformatorske stanice nisu izloženi značajnim vrijednostima magnetskog polja.

#### 6.4. Simulacija slučaja kada TS radi pod opterećenjem 80 %

Prema izrađenom modelu transformatorske stanice izvršena je simulacija na način da transformatorska stanica radi pod opterećenjem od 80 %. Potrebno je preračunati maksimalne struje na struje pri opterećenju od 80 %, na način da se maksimalne struje pomnože s 0,8 :

Za SN stranu na sljedeći način izračunavaju se struje :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 10000} \cdot 0,8 = 29,1 \text{ A} \quad (6-5)$$

Na SN strani nalaze se 2 kabela, prema tome :

$$\frac{29,1}{2} = 14,55 \text{ A / kabelu} \quad (6-6)$$

Za NN stranu na sljedeći način izračunavaju se struje :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 400} \cdot 0,8 = 727,46 \text{ A} \quad (6-7)$$

Na NN strani nalazi se 13 kabela, prema tome :

$$\frac{727,46}{13} = 55,96 \text{ A / kabelu} \quad (6-8)$$

Nakon proračuna struja za opterećenje od 80 %, potrebno ih je unijeti u program ali je potrebno pripaziti na pomak između različitih faza prikazano u tablicama 6.5. i 6.6.

**Tablica 6.5.** Iznosi struja SN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
14,55 A	$-7,275 + j12,6 \text{ A}$	$-7,275 - j12,6 \text{ A}$

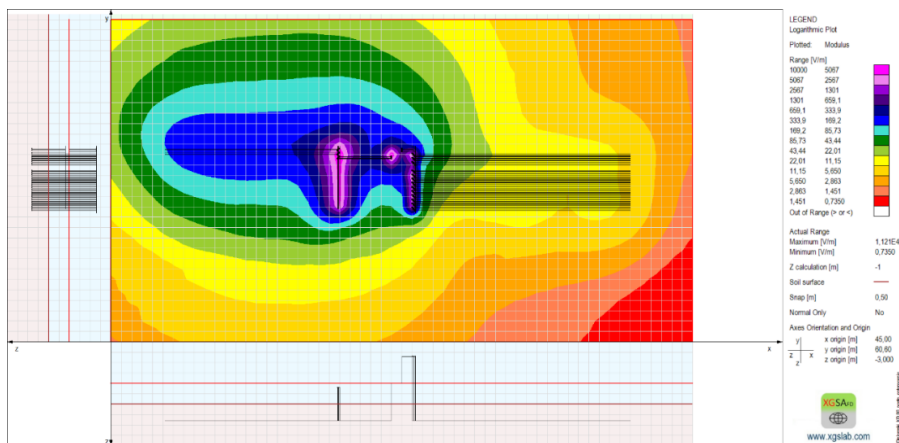
**Tablica 6.6.** Iznosi struja NN dijela transformatorske stanice

1.faza	2.faza	3.faza
55,96 A	$-27,98 + j48,4628 \text{ A}$	$-27,98 - j48,4628$

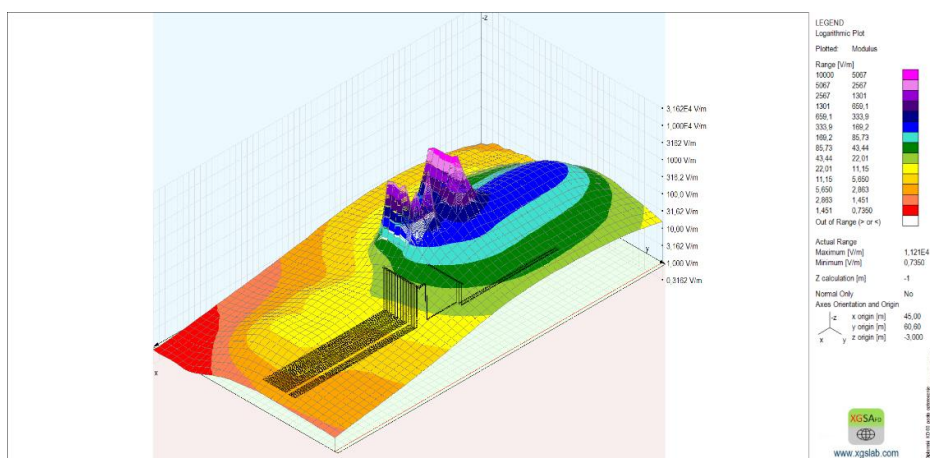
### 6.4.1. Analiza električnog polja

Prije pokretanja simulacije je potrebno postaviti proračunate struje za opterećenje od 80 % na pojedine SN i NN dijelove transformatorske stanice. Pri pokretanju simulacije potrebno je postaviti da se mjeri električno polje na visini od 1 m i postaviti niske vrijednosti upozorenja (ALs) za jakost električnog polja prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, te vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Nakon pokretanja simulacije dobije se grafički prikaz raspodjele električnog polja koji je isti kao i pri opterećenju 100 % TS jer električno polje ovisi o vrijednosti napona. Na slikama 6.17. i 6.18. prikazana je raspodjela električnog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs) te vidimo da je raspodjela električnog polja ista kao i na slikama 6.5. i 6.6. kod opterećenja 100% TS.



Slika 6.17. 2D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

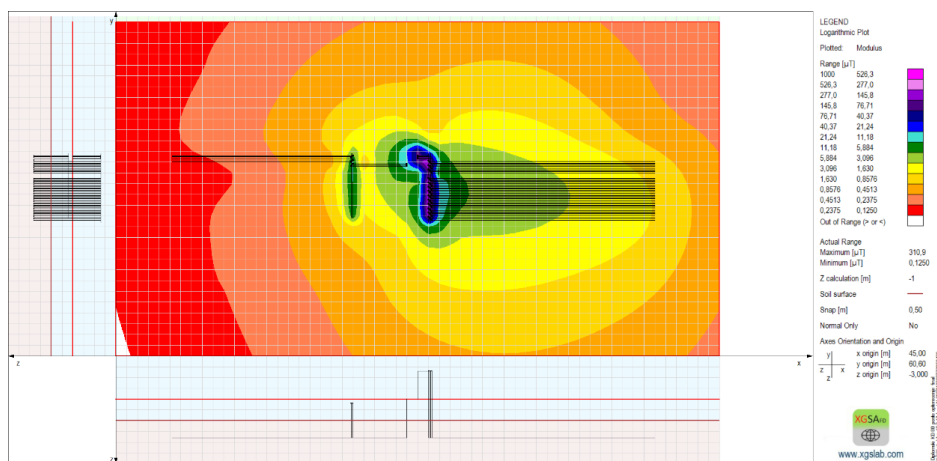


Slika 6.18. 3D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

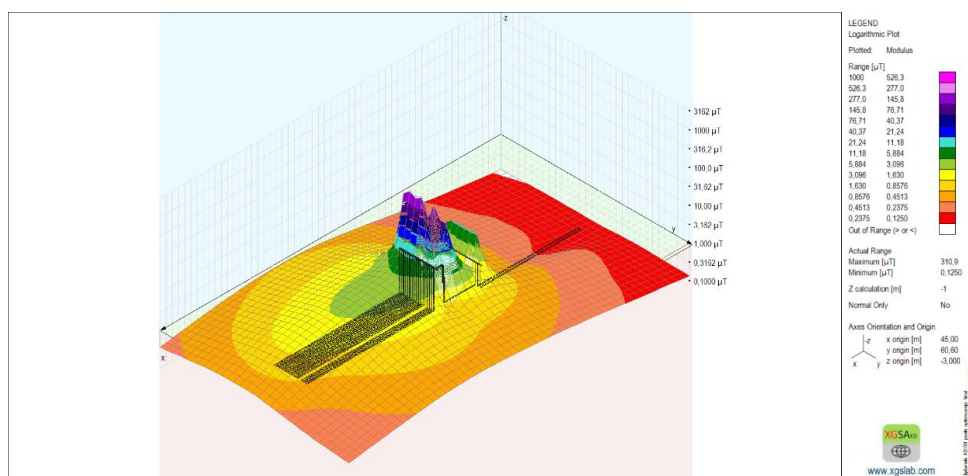
## 6.4.2. Analiza magnetskog polja

U postavkama mjerenja je potrebno postaviti da se magnetsko polje mjeri na visini od 1 m prije pokretanja simulacije. Također, potrebno je postaviti i iznose za niske vrijednosti upozorenja (ALs) za jakost magnetskog polja prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, te vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Nakon pokretanja simulacije dobiveni su rezultati raspodjele magnetskog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs) koji su prikazani na sljedećim slikama (Slika 6.19. i 6.20.).



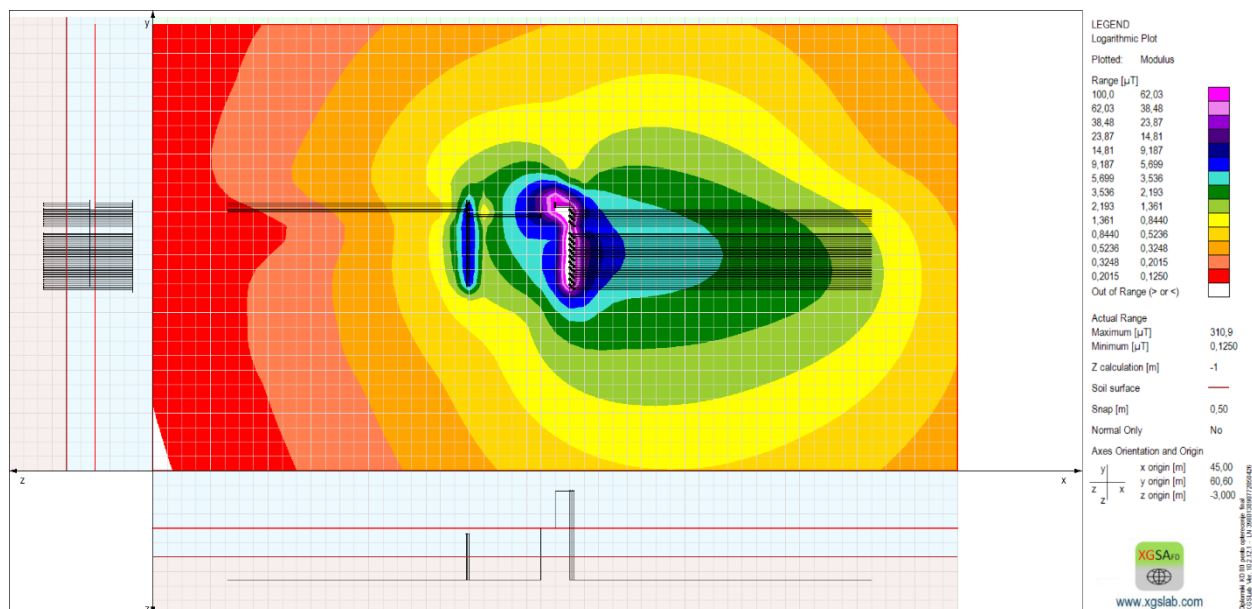
**Slika 6.19.** 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)



**Slika 6.20.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

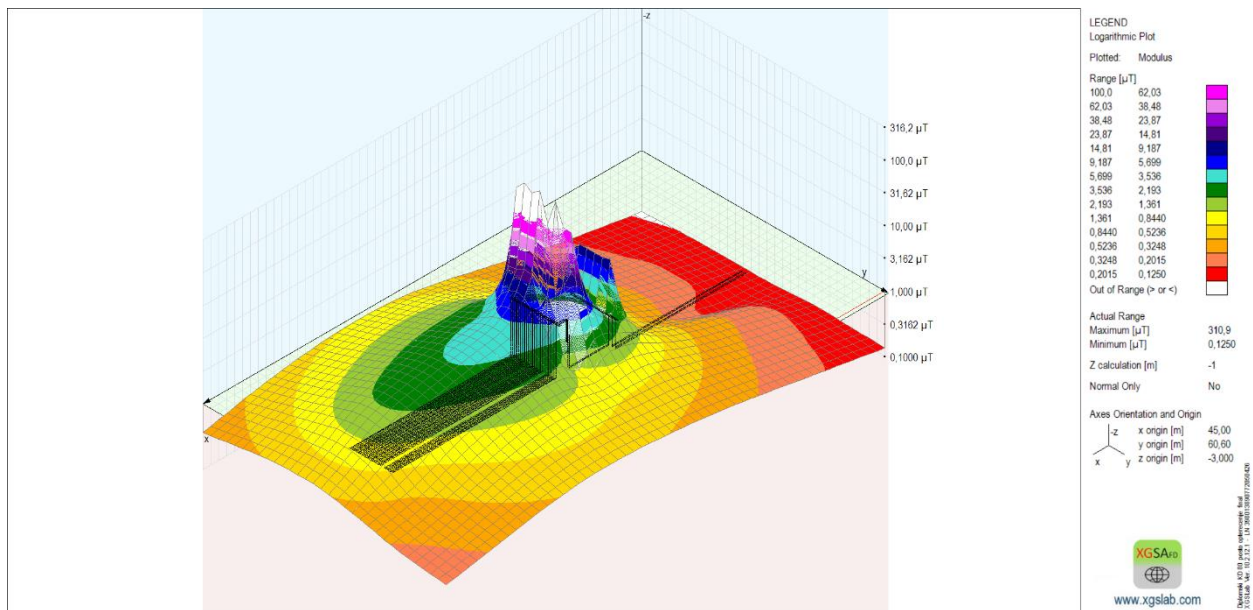
Prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, niske vrijednosti upozorenja (ALs) za izloženost magnetskim poljima iznosi 1000  $\mu\text{T}$ , stoga je potrebno u postavkama prije pokretanja simulacije podesiti tu vrijednost. Na slikama 6.19. i 6.20. može se očitati maksimalna vrijednost magnetskog polja transformatorske stanice pri opterećenju od 80 %, te iznosi 310,9  $\mu\text{T}$ . Magnetsko polje pri opterećenju od 100 % iznosi 386,1  $\mu\text{T}$ , što je veće od 310,9  $\mu\text{T}$ . Magnetsko polje u ovome slučaju je manje jer vodičima teku manje struje. S obzirom da vrijednosti magnetskog polja ne prelaze vrijednosti propisane Pravilnikom o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, zaključuje se da radnici koji obavljaju poslove unutar transformatorske stanice nisu izloženi značajnim vrijednostima magnetskog polja. Prema dobivenim slikama 6.19. i 6.20. raspodjele magnetskog polja može se uočiti da su najveće vrijednosti magnetskog polja na transformatoru, NN sabirnicama i kabelima spojenim na NN sabirnice.

Na idućim slikama prikazana je raspodjela magnetskog polja za javno područje (Slika 6.21. i 6.22.).



**Slika 6.21.** 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje

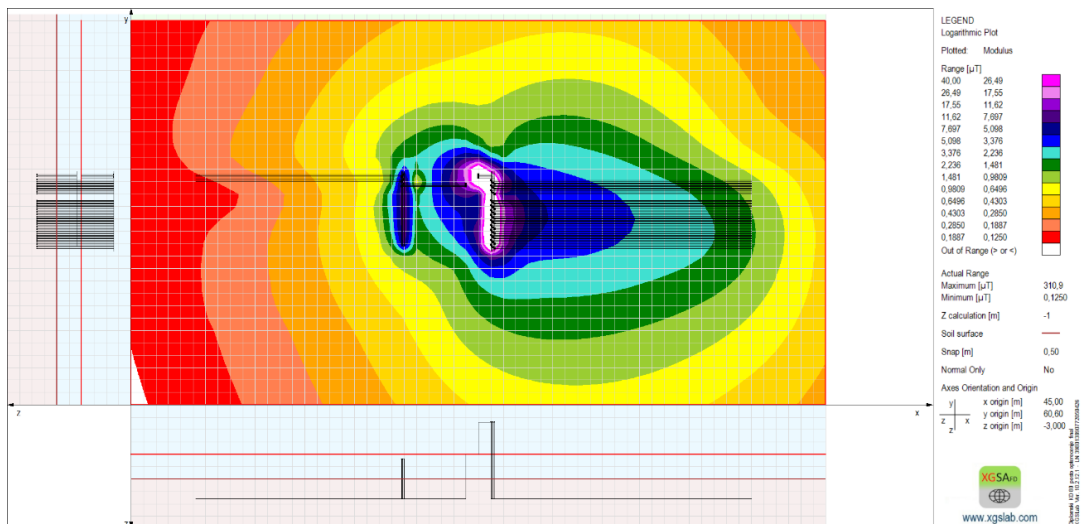




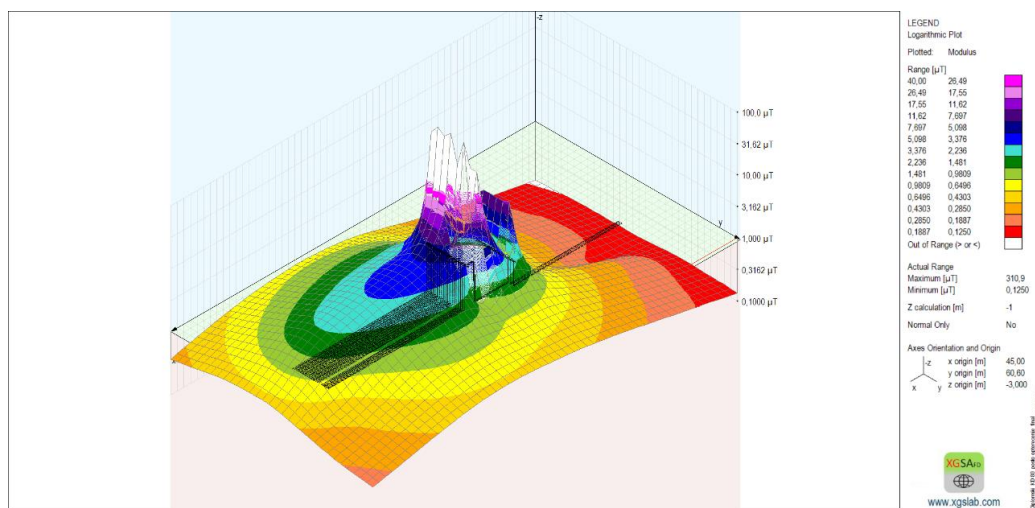
**Slika 6.22.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje

Maksimalna vrijednost magnetskog polja za javno područje prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja iznosi  $100 \mu\text{T}$ . Prema slikama 6.21. i 6.22. raspodjele magnetskog polja vidi se da je iznos magnetskog polja na NN sabirnicama i u blizini transformatora iznad  $100 \mu\text{T}$ , u rasponu od  $114 \mu\text{T}$  do  $310,9 \mu\text{T}$ . Međutim, to je manje važno s obzirom da se pretpostavlja da nitko od opće populacije nema pristup transformatorskoj stanici. Magnetsko polje u okolnom prostoru transformatorske stanice je unutar granica propisanih Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja. Prema tome se zaključuje da osobe koje se nađu u okolnom prostoru nisu izložene značajnim vrijednostima magnetskog polja.

Raspodjela magnetskog polja za područje povećane osjetljivosti prikazano je slikama (Slika 6.23. i 6.24.).



Slika 6.23. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti

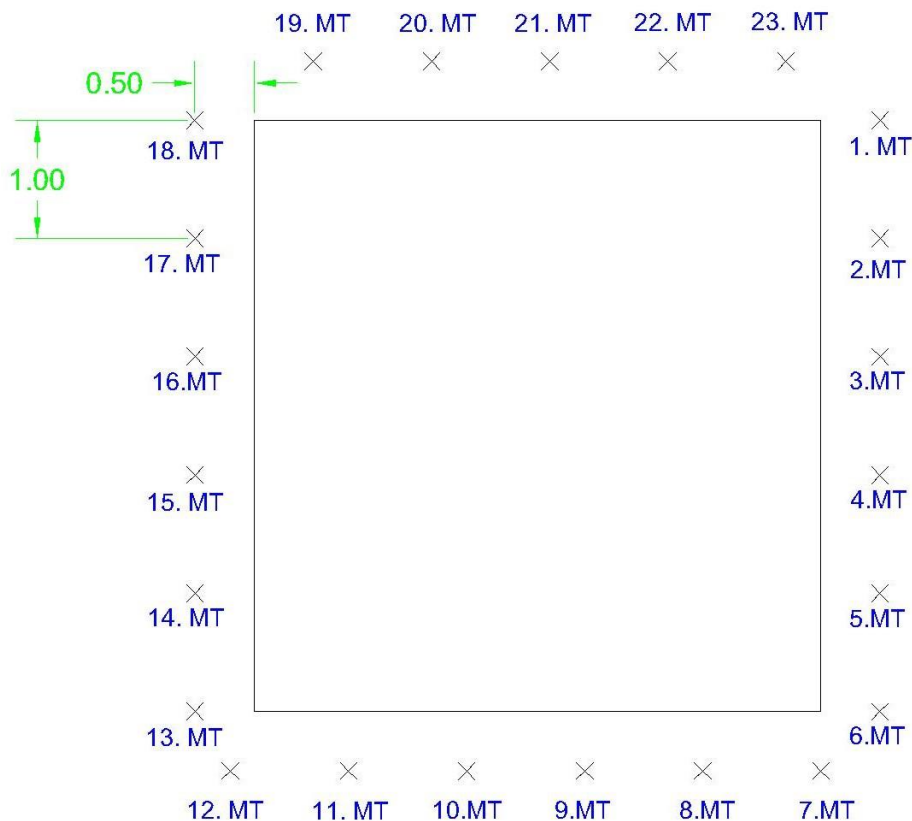


Slika 6.24. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti

Prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja, maksimalno magnetsko polje za područje povećane osjetljivosti iznosi  $40 \mu\text{T}$ . Na slikama 6.23. i 6.24. raspodjele magnetskog polja se vidi da magnetsko polje u blizini transformatora i NN sabirnica prelazi vrijednost od  $40 \mu\text{T}$ . Budući da je općoj populaciji zabranjen pristup transformatorskoj stanici to smatramo manje važno. Vrijednosti magnetskog polja u okolnom prostoru transformatorske stanice daleko su manje od  $40 \mu\text{T}$ , ono je u rasponu od  $0,6 \mu\text{T}$  do  $8 \mu\text{T}$ . Može se zaključiti da osobe koje žive u stambenim objektima u blizini transformatorske stanice nisu izložene značajnim vrijednostima magnetskog polja.

## 6.5. Mjerenje električnog i magnetskog polja KTS 220 Osijek 10/0,4 kV

Mjerenja niskofrekvencijskih (50 Hz) elektromagnetskih polja se izvodi prema normi HRN IEC 61786:2001. Mjerenje izvodi osoba koja je ovlaštena za to pomoću mjernog instrumenta MASCHEK ESM – 100. Mjerni uređaj MASCHEK ESM – 100 ima mogućnost istovremenog mjerenja električnog i magnetskog polja u jednoj točki. Mjerni instrument stoji na postolju na visini od 1 m i udaljen je od transformatorske stanice 0,5 m. Mjerne točke su međusobno udaljene 1 m. Na idućoj slici (Slika 6.25.) prikazana je skica mjerenja s mjernim točkama.



**Slika 6.25.** Točke mjerenja električnog i magnetskog polja

Mjerenje je započeto dana 5. rujna 2023. godine u 17:54 i završeno u 18:01 sati. Prema vremenskoj prognozi, temperatura zraka je iznosila 27°C i relativna vlažnost iznosila je 37 %. Prema skici mjerenja određene su 23 mjerne točke na kojima će se izvršiti mjerenje.

Na slici 6.26. prikazan je postupak mjerenja električnog i magnetskog polja oko transformatorske stanice. Vidljiva je transformatorska stanica s mjernim instrumentom. Mjerni instrument stoji na položaju 8. mjerne točke prema skici. Mjerni instrument stoji na visini od 1 m i udaljen je od transformatorske stanice za 0,5 m, a razmak između mjernih točki je 1 m.



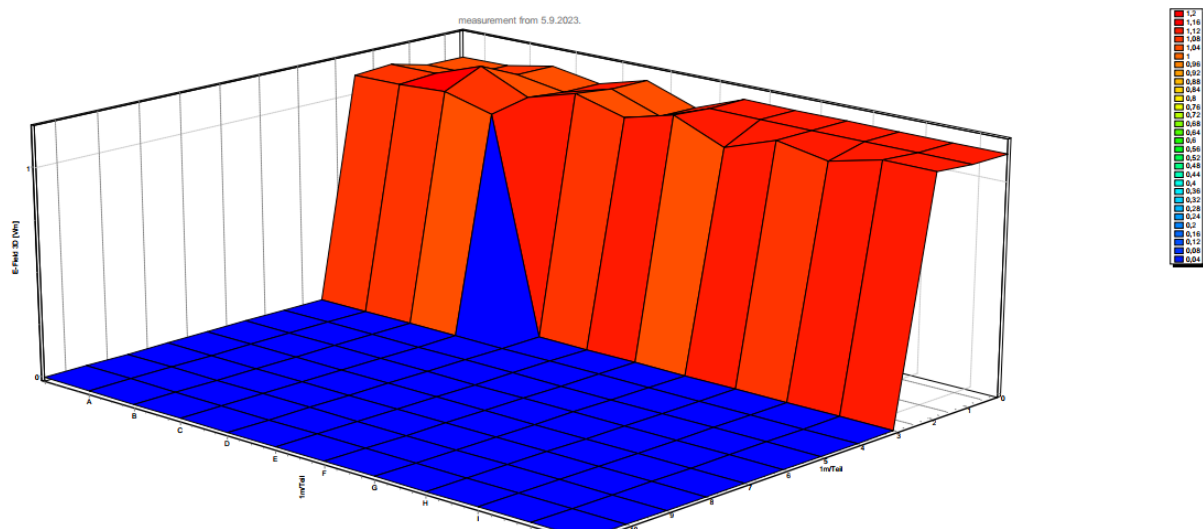
**Slika 6.26.** Provođenje mjerenja

Rezultati mjerenja električnog i magnetskog polja prikazani su u idućoj tablici (Tablica 6.7.).

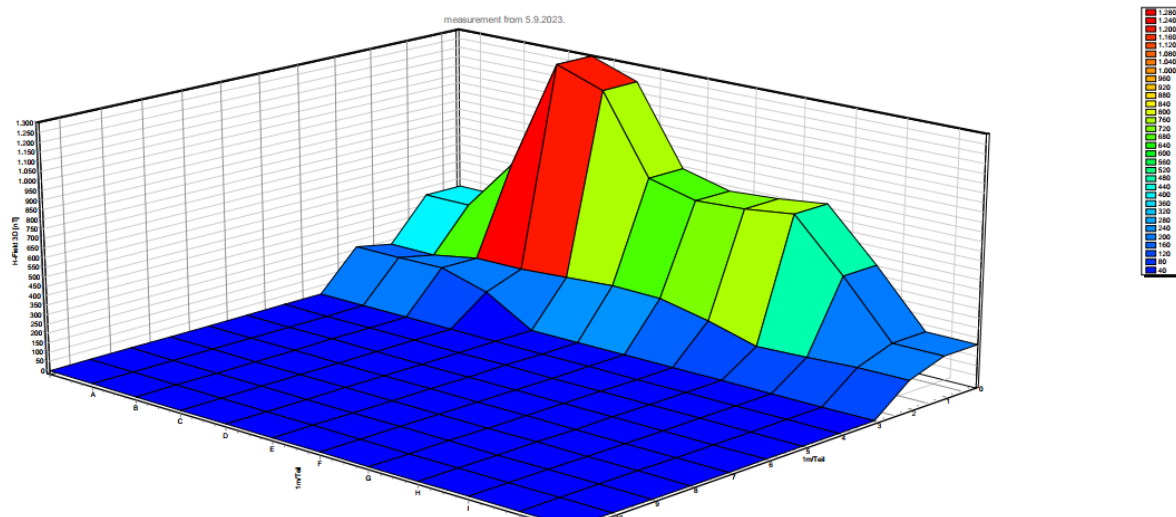
**Tablica 6.7.** Rezultati mjerenja električnog i magnetskog polja

Mjerna točka	Frekvencija f [Hz]	Električno polje E [V/m]	Magnetsko polje B [ $\mu$ T]
1	50	1,1	0,405
2	50	1,1	0,689
3	50	1,1	1,295
4	50	1,1	1,205
5	50	1,0	0,785
6	50	1,1	0,719
7	50	1,1	0,736
8	50	1,1	0,767
9	50	1,1	0,502
10	50	1,1	0,213
11	50	1,1	0,175
12	50	1,2	0,216
13	50	1,1	0,220
14	50	1,2	0,235
15	50	1,1	0,254
16	50	1,1	0,248
17	50	1,0	0,192
18	50	1,1	0,122
19	50	1,1	0,130
20	50	1,1	0,146
21	50	1,1	0,214
22	50	1,1	0,218
23	50	1,0	0,147

Na slici 6.27. i 6.28. prikazan je 3D prikaz raspodjele električnog i magnetskog polja prema rezultatima mjerenja iz tablice 6.7. Iz tablice se može očitati najveća vrijednost električnog polja koja iznosi 1,2 V/m, a najveća vrijednost magnetskog polja iznosi 1,295  $\mu\text{T}$  u mjernoj točki 3.

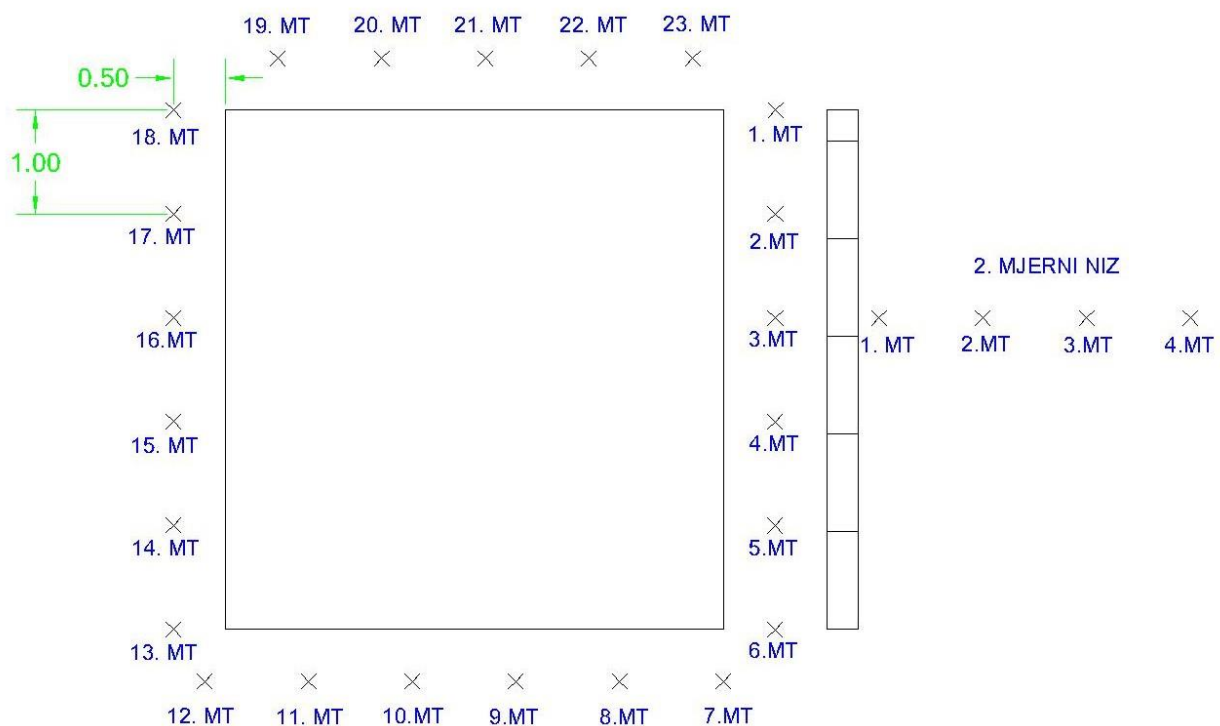


Slika 6.27. 3D prikaz raspodjele električnog polja



Slika 6.28. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja

S obzirom da se transformatorska stanica nalazi u neposrednoj blizini obiteljske kuće, izmjeren je još jedan niz mjerenja prema stambenom objektu na mjernoj točki gdje je bilo najveće magnetsko polje. Prema tablici 6.7. se vidi da najveće magnetsko polje iznosi  $1,295 \mu\text{T}$  i nalazi se na mjernoj točki 3. U ravnini mjerne točke 3. napravljen je još jedan niz mjerenja. Mjerenje se izvodi u dvorištu obiteljske kuće uz dopuštenje vlasnika. Transformatorsku stanicu i dvorište dijeli ogradni zid te se mjerenja izvode od zida prema stambenom objektu. Na slici 6.29. prikazan je 2. mjerni niz mjerenja električnog i magnetskog polja.



**Slika 6.29.** Raspored mjerenja električnog i magnetskog polja 2. mjerni niz

Mjerenje se izvelo istog dana s početkom u 18:04 i završetkom u 18:06 sati. Podaci vremenske prognoze su isti, temperatura zraka iznosi  $27^{\circ}\text{C}$  i relativna vlažnost iznosi 37 %. Kao što je pokazano na skici mjerenja za 2. mjerni niz, mjerenje se izvodi u 4 određene mjerne točke.

Na slici 6.30. prikazan je postupak mjerenja električnog i magnetskog polja za 2. mjerni niz od transformatorske stanice prema stambenom objektu. Vidljiva je transformatorska stanica i mjerni instrument između kojih se nalazi ogradni zid. Mjerni instrument stoji na položaju 2. mjerne točke prema skici za 2. mjerni niz.



**Slika 6.30.** Provođenje mjerenja 2. mjerni niz

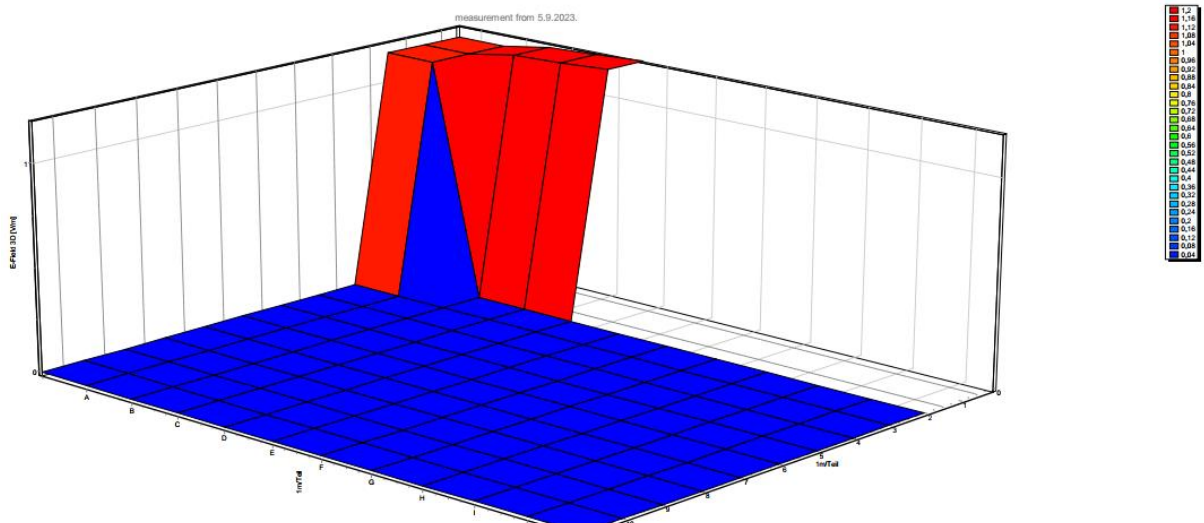


Rezultati mjerenja električnog i magnetskog polja za 2. mjerni niz prikazani su u idućoj tablici (Tablica 6.8.).

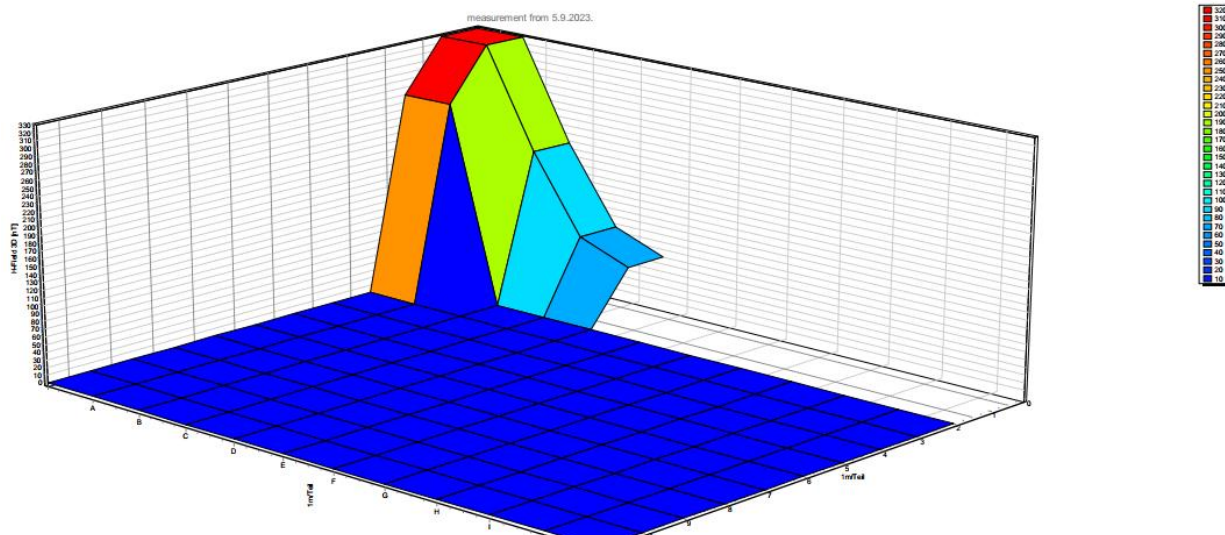
**Tablica 6.8.** Rezultati mjerenja električnog i magnetskog polja za 2. mjerni niz

Mjerna točka	Frekvencija f [Hz]	Električno polje E [V/m]	Magnetsko polje B [ $\mu$ T]
1	50	1,1	0,328
2	50	1,2	0,197
3	50	1,2	0,096
4	50	1,2	0,07

Na slici 6.31. i 6.32. prikazan je 3D prikaz raspodjele električnog i magnetskog polja za 2. mjerni niz prema rezultatima mjerenja iz tablice 6.8. Iz tablice se može očitati najveća vrijednost električnog polja koja iznosi 1,2 V/m, a najveća vrijednost magnetskog polja iznosi 0,328  $\mu$ T u mjernoj točki 1.



**Slika 6.31.** 3D prikaz raspodjele električnog polja 2. mjerni niz



**Slika 6.32.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja 2. mjerni niz

Prema tablicama s rezultatima mjerenja električnog i magnetskog polja za 1. i 2. mjerni niz (Tablica 6.7. i 6.8.) vidi se da je najviši iznos električnog polja iznosi 1,2 V/m koji se nalazi na više mjernih točki. Najviši iznos magnetskog polja u 1. mjernom nizu se nalazi na mjernoj točki 3. i iznosi 1,295  $\mu\text{T}$  te se prema toj točki odredio 2. mjerni niz mjerenja električnog i magnetskog polja u dvorištu stambenog objekta. U 2. mjernom nizu, na mjernoj točki 1. nalazi se najveća vrijednost magnetskog polja i iznosi 0,328  $\mu\text{T}$ . Vrijednosti magnetskog polja u 2. mjernom nizu su značajno manje jer se nalazi zid između transformatorske stanice i dvorišta stambenog objekta. Rezultati mjerenja u tablicama (Tablica 6.7. i 6.8.) su u skladu s propisanim granicama vrijednostima upozorenja za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

## 6.6. Simulacija slučaja kada TS radi pod stvarnim opterećenjem

Prema izrađenom modelu transformatorske stanice izvršena je simulacija na način da transformatorska stanica radi pod stvarnim opterećenjem. Prema dobivenim podacima za opterećenje transformatorske stanice za vrijeme mjerenja električnog i magnetskog polja, potrebno je unijeti u program iznose struja prikazane u sljedećim tablicama 6.9. i 6.10. :

**Tablica 6.9.** Iznosi struja SN dijela transformatorske stanice

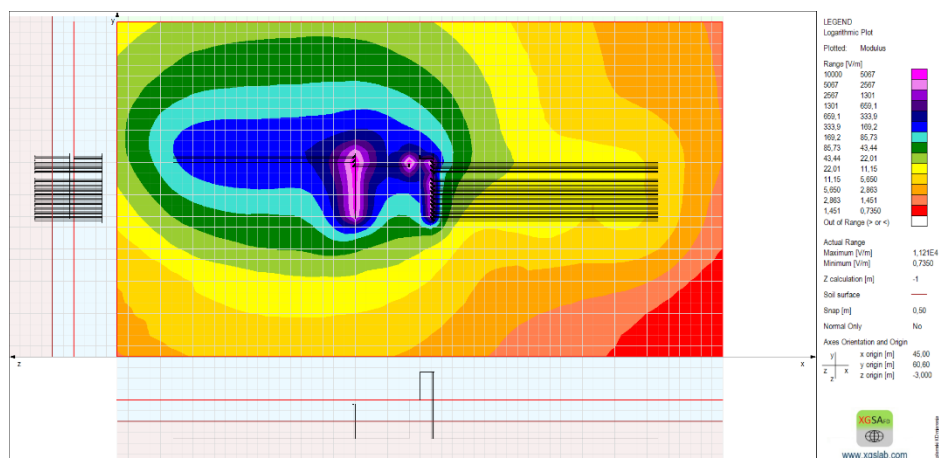
1.faza	2.faza	3.faza
3,637 A	$-1,8185 + j3,1497$ A	$-1,8185 - j3,1497$ A

**Tablica 6.10.** Iznosi struja NN dijela transformatorske stanice

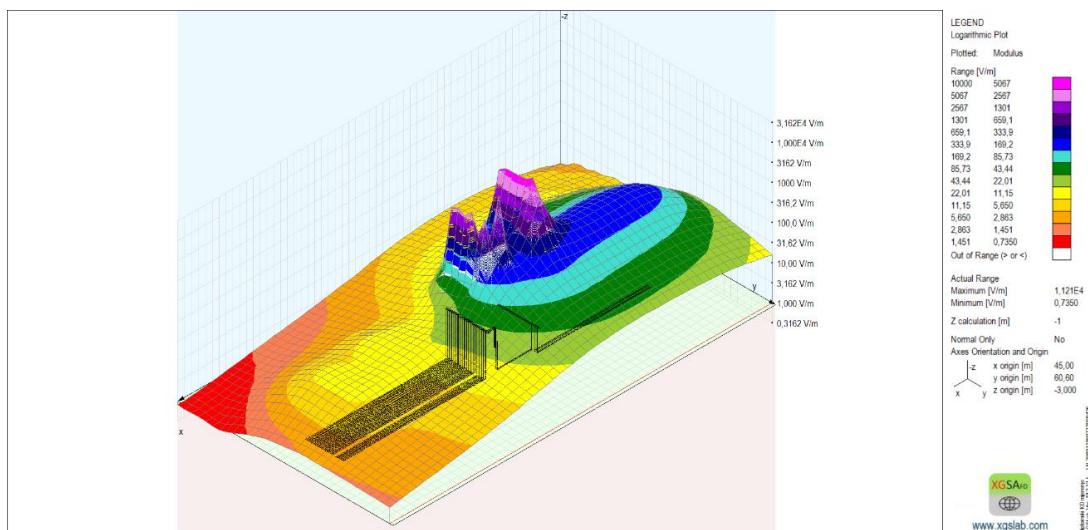
1.faza	2.faza	3.faza
94 A	$-55 + j95,2628$ A	$-50 - j86,6025$ A

### 6.6.1. Analiza električnog polja

Nakon pokretanja simulacije dobije se grafički prikaz raspodjele električnog polja prikazan na slikama 6.33. i 6.34. koji je isti kao pri opterećenju 100 % TS i pri opterećenju 80 % TS jer električno polje ovisi o vrijednosti napona. Na slikama 6.33. i 6.34. prikazana je raspodjela električnog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs) te se vidi da je raspodjela električnog polja ista kao na slikama 6.5. i 6.6. kod opterećenja 100 % TS i na slikama 6.17. i 6.18. kod opterećenja 80 % TS.



**Slika 6.33.** 2D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

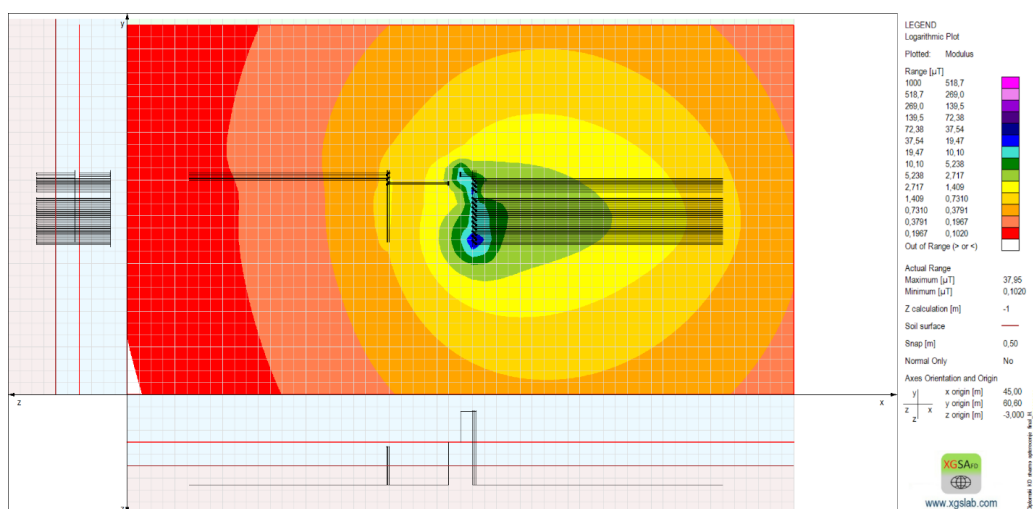


**Slika 6.34.** 3D prikaz raspodjele električnog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

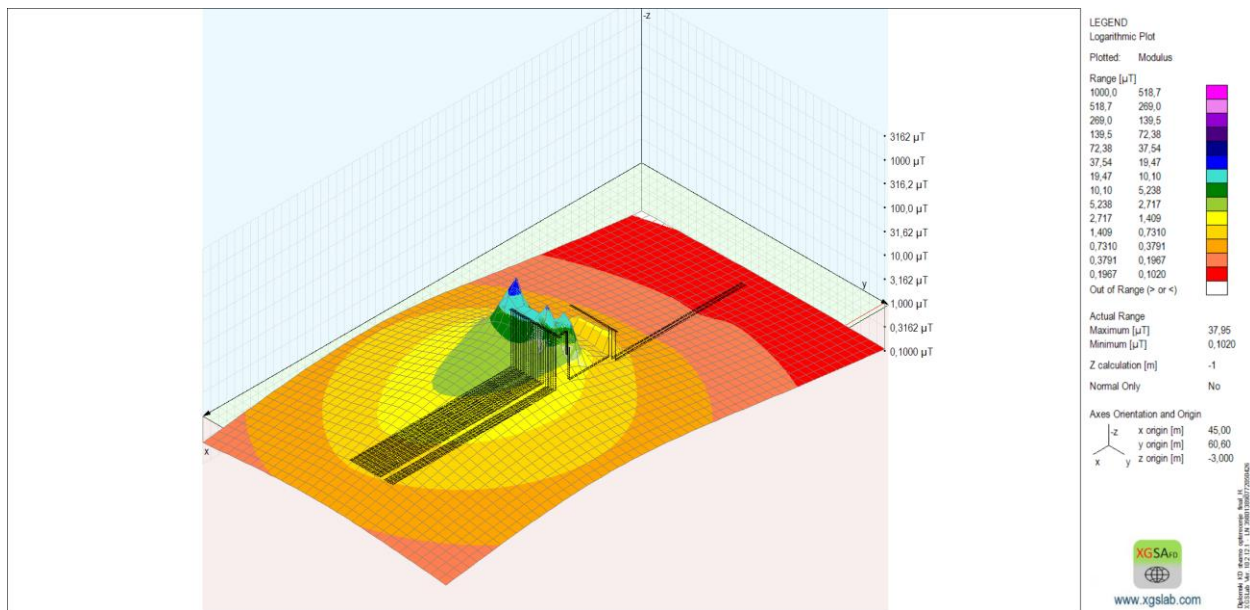
### 6.6.2. Analiza magnetskog polja

Analiza raspodjele magnetskog polja za stvarno opterećenje TS se izvodi kao i za prethodna opterećenja TS. U postavkama se postavi da se mjeri magnetsko polje na visini od 1 m prije pokretanja simulacije kao i niske vrijednosti upozorenja (ALs) za jakost magnetskog polja prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, te vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja.

Rezultati raspodjele magnetskog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs) prikazani su na sljedećim slikama (Slika 6.35. i 6.36.).



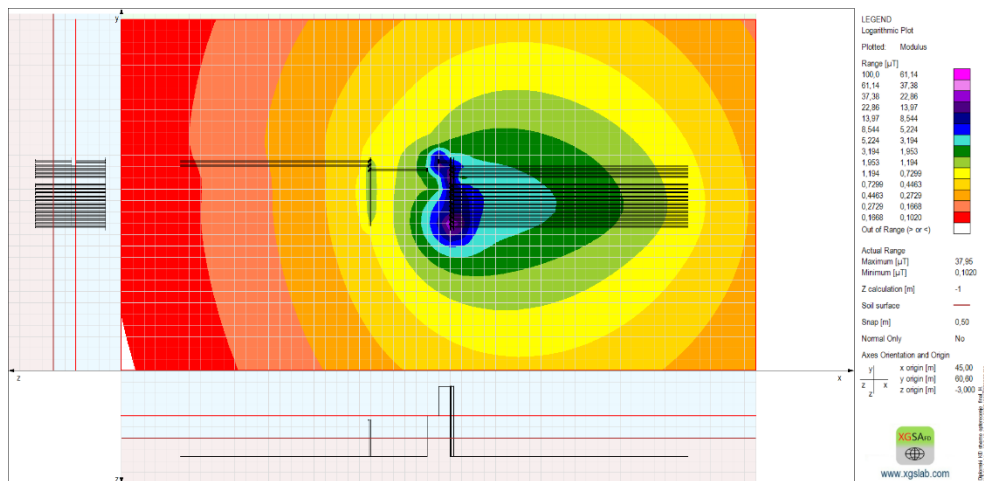
**Slika 6.35.** 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)



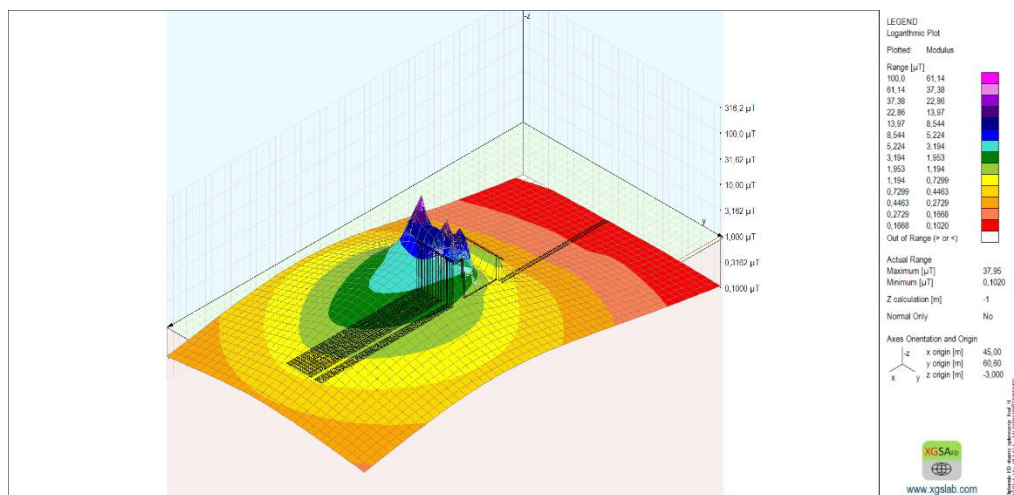
**Slika 6.36.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – niske vrijednosti upozorenja (ALs)

Maksimalna vrijednost magnetskog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs) prema Pravilniku zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja iznosi  $1000 \mu\text{T}$ . Prema dobivenim rezultatima simulacije raspodjele magnetskog polja pri stvarnom opterećenju se može očitati maksimalna vrijednost magnetskog polja transformatorske stanice koja iznosi  $37,95 \mu\text{T}$  i nalazi se na NN sabirnici. Usporedbom rezultata magnetskog polja pri opterećenju od 100 %, pri opterećenju od 80 % i pri stvarnom opterećenju može se zaključiti da je iznos magnetskog polja pri stvarnom opterećenju najmanji jer su i struje najmanje. Vrijednosti magnetskog polja pri stvarnom opterećenju ne prelaze niske vrijednosti upozorenja (ALs) propisane Pravilnikom o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja i prema tome se zaključuje da radnici koji obavljaju poslove unutar transformatorske stanice nisu izloženi većim vrijednostima magnetskog polja od dopuštenih.

Na slikama 6.37. i 6.38. prikazana je raspodjela magnetskog polja za javno područje.



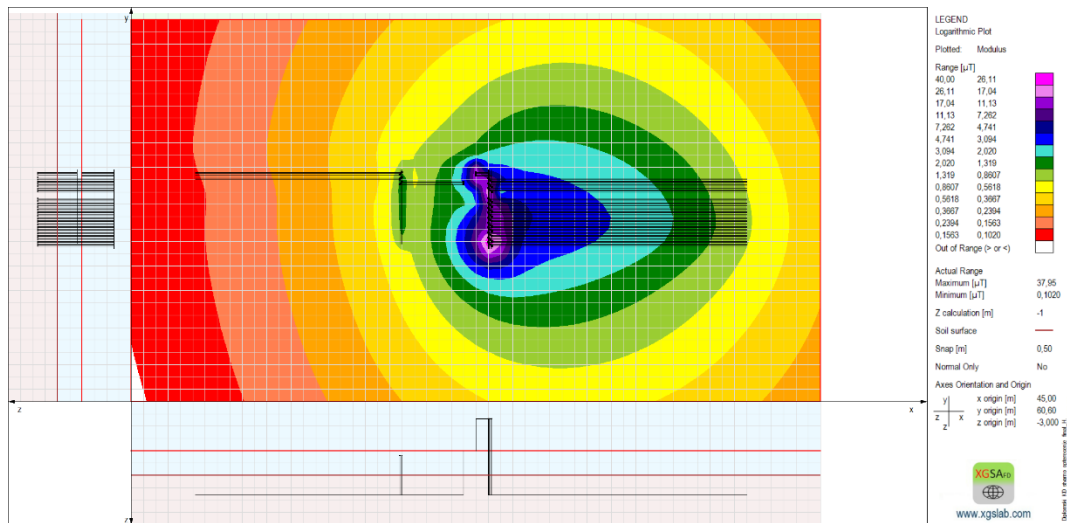
**Slika 6.37.** 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje



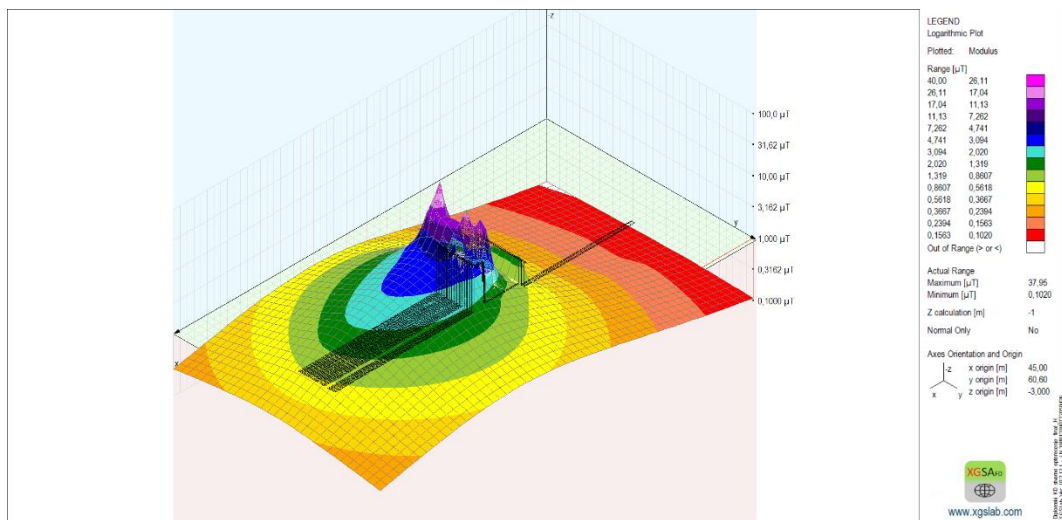
**Slika 6.38.** 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – javno područje

Maksimalna vrijednost magnetskog polja za javno područje prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja iznosi  $100 \mu\text{T}$ . Prema slikama dobivenim simulacijom raspodjele magnetskog polja za javno područje (Slika 6.37. i 6.38.) vidi se da vrijednosti magnetskog polja ne prekoračuju iznos propisan Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja. Najveći iznos magnetskog polja nalazi se na samom transformatoru i NN sabirnicama, te su iznosi u rasponu od  $10,89 \mu\text{T}$  do  $37,95 \mu\text{T}$ . Magnetsko polje u okolnom prostoru transformatorske stanice je unutar granica propisanih Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja te su iznosi magnetskog polja u rasponu od  $0,4 \mu\text{T}$  do  $5,22 \mu\text{T}$ .

Na slikama 6.39. i 6.40. prikazana je raspodjela magnetskog polja za područja povećane osjetljivosti.



Slika 6.39. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti



Slika 6.40. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja – područje povećane osjetljivosti

Prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja, maksimalno magnetsko polje za područje povećane osjetljivosti iznosi 40 µT. Vrijednosti magnetskog polja su unutar granica propisanih Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih zračenja. Magnetsko polje u okolnom prostoru transformatorske stanice je daleko manje od 40 µT i ima iznose u rasponu od 0,4 µT do 5,22 µT. Može se zaključiti da osobe koje žive u stambenim objektima u blizini transformatorske stanice nisu izložene značajnim vrijednostima magnetskog polja.

## 6.7. Usporedba rezultata simulacija

Nakon provedenih simulacija : opterećenje 100 % TS, opterećenje 80 % TS i stvarno opterećenje pri mjerenju transformatorske stanice dane su maksimalne vrijednosti električnog i magnetskog polja u tablici 6.11.

**Tablica 6.11.** Maksimalne vrijednosti električnog i magnetskog polja

Opterećenje TS	Električno polje E [V/m]	Magnetsko polje B [ $\mu$ T]
100 %	11210	386,1
80 %	11210	310,9
Stvarno opterećenje	11210	37,95

Prema tablici 6.11. se može zaključiti da je pri opterećenju transformatorske stanice od 100 % najveće magnetsko polje. Električno polje iznosi 11210 V/m i ono je isto za sva 3 slučaja jer električno polje ovisi o naponu. U sve 3 simulacije se nisu mijenjale naponske razine na SN i NN strani transformatorske stanice. Magnetsko polje je najveće pri opterećenju transformatorske stanice od 100 % i iznosi 386,1  $\mu$ T zato što pri opterećenju transformatorske stanice od 100 % teku najveće struje, a magnetsko polje ovisi o struji.



## 7. ZAKLJUČAK

Model transformatorske stanice 10/0,4 kV izrađen je u XGSLab programu te su na njemu provedene simulacije za tri slučaja: transformatorska stanica radi pod 100 % opterećenja, transformatorska stanica radi pod 80 % opterećenja i transformatorska stanica radi pri stvarnom opterećenju koje je bilo prilikom mjerenja električnog i magnetskog polja. Nakon izvršenja pojedinih simulacija dobiveni su rezultati raspodjele električnog i magnetskog polja za promatranu transformatorsku stanicu. Za analizu raspodjele električnog i magnetskog polja potrebno je poznavati teorijske osnove o električnom i magnetskom polju, kao i zakonske regulative koje se odnose na elektromagnetska polja. Za pojedini slučaj napravljena je simulacija gdje je analizirana raspodjela električnog i magnetskog polja za niske vrijednosti upozorenja (ALs), javno područje i područje povećane osjetljivosti. Da bi se usporedili rezultati dobiveni simulacijama, provodi se i mjerenje na transformatorskoj stanici. Prema rezultatima mjerenja, izmjerene vrijednosti ne prelaze granične vrijednosti definirane prema Pravilniku za zaštitu od elektromagnetskih polja za javna područja i područja povećane osjetljivosti. Prema rezultatima simulacija, sve vrijednosti za javno područje i područje povećane osjetljivosti su u definiranim granicama prema Pravilniku za zaštitu od elektromagnetskih polja. Pošto je zabranjen pristup transformatorskoj stanici općoj populaciji, ne može se izmjeriti električno i magnetsko polje unutar transformatorske stanice. Najviša vrijednost električnog polja dobivena simulacijom iznosi 11210 V/m i ona se nalazi na samom transformatoru. Prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja ta vrijednost je veća od dopuštene za niske vrijednosti upozorenja (ALs), no može se zanemariti jer se radnici ne bi trebali nalaziti u neposrednoj blizini transformatora u naponskom stanju. Najviša vrijednost magnetskog polja dobivena simulacijom iznosi 386,1  $\mu\text{T}$ , što je unutar granica za niske vrijednosti upozorenja (ALs) prema Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja. Prema svemu tome se može zaključiti da osobe koje svakodnevno žive u blizini u stambenim objektima, osobe koji prolaze u blizini transformatorske stanice i radnici koji rade unutar transformatorske stanice nisu izloženi električnom i magnetskom polju većem od propisanog prema Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih zračenja i Pravilniku o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja.

## 8. LITERATURA

- [1] B. Kuzmanović, Osnove elektrotehnike I, 4. ur., Zagreb: Element, 2012.
- [2] A. S. Safigianni i A. Kostopoulou, »Electric and magnetic field measurements in an indoor electric power substation,« *Journal of Materials Processing Technology*, br. 181, pp. 126-130, 2007.
- [3] S. Aerts, C. Calderon, B. Valič, M. Maslanyj, D. Addison, T. Mee, C. Goiceanu, L. Verloock, M. V. d. Bossche, P. Gajšek, R. Vermeulen, M. Roosli, E. Cardis, L. Martens i W. Joseph, »Measurements of intermediate-frequency electric and magnetic fields in households,« *Environmental Research*, br. 154, pp. 160-170, 2017.
- [4] C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou i J. N. Sahalos, »Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines,« *Electric Power Systems Research*, br. 81, pp. 1107-1116, 2011.
- [5] C. P. Nicolaou, A. P. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou i J. N. Sahalos, »Experimental measurement , analysis and prediction of electric and magnetic fields in open type air substations,« *Electric Power Systems Research*, br. 90, pp. 42-54, 2012.
- [6] E-skole, Električno polje, dostupno na: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/2525\\_Elektricno\\_polje.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abcb-6f535c3b5254/html/2525_Elektricno_polje.html), pristupljeno: 19. lipnja 2023.
- [7] Fakultet prometnih znanosti UNIZG, Magnetizam I, dostupno na: [https://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/et\\_predavanje\\_07\\_magnet\\_i\(1\).pdf](https://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/et_predavanje_07_magnet_i(1).pdf), pristupljeno: 22. lipnja 2023.
- [8] *Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja*, br. 91/10, Narodne Novine, 2010.
- [9] *Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja*, br. 146/14, Narodne Novine, 2014.
- [10] *Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja*, br. 31/19, Narodne Novine, 2019.
- [11] *Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja*, Ministarstvo zdravstva, 2016.
- [12] M. D. ., L. G. ., G. D. Čurin Mislav, *Procjena izloženosti elektromagnetskim poljima nazivne frekvencije 50 Hz u skladu s preporukama ENTSO-E*, 2017.
- [13] S. Srl, Računalni program X GS LAB tm.
- [14] Google maps, Google karte, dostupno na: <https://www.google.com/maps>, pristupljeno: 6. rujna 2023.

## 9. SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisane su teorijske osnove o električnom i magnetskom polju, kao i zakonska regulativa o elektromagnetskim zračenjima. Sve to navedeno je potrebno poznavati kako bi se uspješno napravila analiza električnog i magnetskog polja distribucijske trafostanice. Prikazan je pregled različitih istraživanja utjecaja električnog i magnetskog polja zbog brige za ljudsko zdravlje. Upravo zbog brige za zdravlje ljudi postoje zakoni i pravilnici prema kojima su definirane najveće dopuštene vrijednosti električnih i magnetskih polja kojima ljudi smiju biti izloženi. Prema tome je odabrana distribucijska trafostanica koja se nalazi u blizini stambenih objekata i prema njoj se radi daljnja analiza raspodjele električnog i magnetskog polja. Prema odabranoj distribucijskoj trafostanici napravljen je računalni model u programu XGSLab i napravljene su simulacije za analizu električnog i magnetskog polja, te je ovlaštena osoba napravila mjerenje na lokaciji distribucijske trafostanice. Iz rezultata simulacija i rezultata mjerenja električnog i magnetskog polja se vidi da su vrijednosti električnog i magnetskog polja za javno područje i područje povećane osjetljivosti unutar dopuštenih granica definiranih Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja, kao i niske vrijednosti upozorenja (ALs) definiranih Pravilnikom o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja.

Ključne riječi: distribucijska trafostanica, električno polje, magnetsko polje, procjena izloženosti.

## **10. ABSTRACT**

In this paper named as „Analysis of electric and magnetic fields in distribution substation“ theoretical foundations of electric and magnetic fields are described, as well as the legal regulations regarding electromagnetic radiation. All of this knowledge is necessary to successfully conduct an analysis of the electric and magnetic fields in distribution substation. A review of various studies on the impact of electric and magnetic fields on human health is also presented in this paper. Due to concerns for human health, there are laws and regulations that define the maximum allowable values of electric and magnetic fields to which people may be exposed. Consequently, a distribution substation located near residential buildings was selected for further analysis of the distribution of electric and magnetic fields. A computer model of distribution substation was created using the XGSLab software, and simulations were conducted to analyze the electric and magnetic fields. An authorized individual conducted measurements at the distribution substation site. The results of the simulations and measurements of the electric and magnetic fields show that the values of these fields for professional exposure, public areas and areas of increased sensitivity are within the limits defined by the Regulation on protection of electromagnetic fields.

Keywords: distribution substation, electric field, magnetic field, exposure assessment.

## 11. ŽIVOTOPIS

Karlo Đaković rođen je u Novoj Gradiški 18. travnja 1998. godine. Živi i odrasta u Batrini te pohađa Osnovnu školu „Antun Mihanović“ Nova Kapela, Batrina. Nakon završene osnovne škole odlučuje upisati zanimanje elektrotehničar te upisuje srednju Tehničku školu Slavonski Brod. Nakon stečenog zanimanja elektrotehničar, odnosno završetka srednjoškolskog obrazovanja odlučuje upisati se na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku na preddiplomski stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Završetkom preddiplomskog stručnog studija stječe naziv stručni prvostupnik inženjer elektrotehnike (bacc. ing. el.) te upisuje Program razlikovnih obveza za upis na diplomatske sveučilišne studije Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Program razlikovnih obveza uspješno savladava i 2021. godine upisuje Diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Elektroenergetski sustavi.

---

Potpis autora