

# Analiza električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju

---

Lovas, Antun

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:200:653032>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA ELEKTRIČNIH I MAGNETSKIH POLJA U  
VISOKONAPONSKOM ELEKTROENERGETSKOM  
POSTROJENJU**

**Diplomski rad**

**Antun Lovas**

**Osijek, 2020. godina**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 18.09.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Ime i prezime studenta:	Antun Lovas
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1183, 19.09.2019.
OIB studenta:	76748614332
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
Član Povjerenstva 1:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 2:	Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Naslov diplomskog rada:	Analiza električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju
Znanstvena grana rada:	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je objasniti utjecaj i djelovanje električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju. Nadalje, potrebno je definirati najveće dopuštene vrijednosti električnih i magnetskih polja u elektroenergetskom postrojenju. Također, potrebno je izraditi računalni model visokonaponskog elektroenergetskog postrojenja te odrediti iznose i raspodjelu električnog i magnetskog polja u promatranom postrojenju. (Tema rezervirana za: Antun Lovas)
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	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
Datum prijedloga ocjene mentora:	18.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis: Datum:

Field Code Changed

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**Osijek, 29.09.2020.

<u>Ime i prezime studenta:</u>	<u>Antun Lovas</u>
<u>Studij:</u>	<u>Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika</u>
<u>Mat. br. studenta, godina upisa:</u>	<u>D-1183, 19.09.2019.</u>
<u>Turnitin podudaranje [%]:</u>	<u>10</u>

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju**

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

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
2. PREGLED LITERATURE .....	2
3. ELEKTROSTATIKA I MAGNETIZAM .....	3
3.1. Električni naboj .....	3
3.2. Coulombov zakon .....	3
3.3. Električno polje .....	5
3.4. Magnetsko polje .....	9
4. PRAVILNICI I NORME .....	13
4.1. Profesionalna izloženost .....	13
4.2. Izloženost na javnom području i području povećane osjetljivosti .....	18
5. SIMULACIJA I REZULTATI .....	21
5.1. Opis modela postrojenja .....	21
5.2. Analiza električnog polja .....	26
5.3. Analiza magnetskog polja .....	38
6. ZAKLJUČAK .....	50
7. SAŽETAK .....	51
8. ABSTRACT .....	52
9. LITERATURA .....	53
10. ŽIVOTOPIS .....	54

## **1.UVOD**

Kako tehnologija sve brže napreduje, tako se pojavljuje sve veći broj različitih elektroničkih uređaja koji su izvori elektromagnetskog zračenja. Zbog svakodnevnog povećanja potražnje za električnom energijom, potrebno je graditi nova postrojenja koja su također izvor elektromagnetskog zračenja. Iako smo i kod kuće izloženi tim poljima, njihov utjecaj najviše dolazi do izražaja kod ljudi koji su im svakodnevno izloženi, kao što su radnici u visokonaponskim postrojenjima. Različiti zakoni i pravilnici propisuju određene vrijednosti kojima ljudi mogu biti izloženi bez ikakvih posljedica, ali u slučaju određenih pogonskih stanja visokonaponskog postrojenja moraju im biti izloženi. Posljedice koje su povezane s izlaganjem elektromagnetskim poljima nije moguće otkriti u kratkom roku, stoga je potrebno redovito kontrolirati zdravlje kod ljudi koji su im svakodnevno izloženi. Električno polje nastaje oko vodiča koji je pod naponom, a magnetsko polje nastaje oko vodiča kojim protječe struja. Veličina koja karakterizira električno polje je jakost električnog polja, a veličina koja karakterizira magnetsko polje je jakost magnetskog polja koja ovisi o iznosu struje koja protiče kroz vodič. U niskonaponskim postrojenjima iznosi jakosti električnog polja i gustoće magnetskog toka su mali, ali u visokonaponskim postrojenjima nisu zanemarivi. Zbog toga je potrebno mjerenjima ili simulacijama odrediti iznose i područja u postrojenjima koja imaju veći učinak na zdravlje radnika od propisanog.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

U diplomskom radu potrebno je objasniti utjecaj i djelovanje električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju. Nadalje, potrebno je definirati najveće dopuštene vrijednosti električnih i magnetskih polja u elektroenergetskom postrojenju. Također, potrebno je izraditi računalni model visokonaponskog elektroenergetskog postrojenja te odrediti iznose i raspodjelu električnog i magnetskog polja u promatranom postrojenju.

## **2. PREGLED LITERATURE**

Autor Branislav Kuzmanović u literaturi [1] opisuje elementarne pojave i zakone na kojima se temelji daljnje istraživanje. Osim opisa osnovnih pojmova i zakona poput električnog naboja i Coulombovog zakona, u ovoj literaturi se opisuju pojave električnog, magnetskog i elektromagnetskog polja koje su nam bitne za izradu računalnog modela i simulacije određenih događaja u postrojenju. Za opis teorijskih pojmova te slikovni opis određenih pojmova korištena je i literatura [2]–[4]. U literaturi [5]–[7] opisan je utjecaj elektromagnetskog polja na ljudsko tijelo i definirani su svi pojmovi vezani za izloženost elektromagnetskom zračenju. Osim toga, u danoj literaturi su definirane i različite granične vrijednosti i vrijednosti upozorenja. Koristeći literaturu [8] izrađen je model visokonaponskog elektroenergetskog postrojenja u programu XGSLab te su izvršene simulacije pomoću kojih su dobivene brojčane vrijednosti električnog i magnetskog polja u postrojenju, ali i grafički prikazi raspodjele tih polja.

### 3. ELEKTROSTATIKA I MAGNETIZAM

#### 3.1. Električni naboj

Svako tijelo posjeduje određenu naelektriziranost koja ovisi o atomskoj i molekulskoj građi predmeta, a posljedično o kemijskim i fizičkim svojstvima materijala izrade predmeta. Iako ne postoji pozitivnost i negativnost naboja, definiraju se kao takvi radi lakšeg matematičkog opisivanja pojma. Naelektriziranost tijela ovisi o količini električnog naboja. Između dvaju naboja se pojavljuju određene sile. Tako se između dvaju suprotnih naboja pojavljuje privlačna sila, a između dvaju istoimenih naboja pojavljuje odbojna sila. Najmanja količina elektriciteta se nalazi u elementarnom naboju. Najmanja količina elektriciteta se naziva kvant elektriciteta. [1] Neovisno o predznaku, kvant elektriciteta se označava  $e_0$  i iznosi:

$$e_0 = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (3-1)$$

Ovisno o količini određene vrste naboja na nekom tijelu, raspoznaju se pozitivno i negativno naelektrizirana tijela. Svaki izolirani zatvoreni sustav je jedinstven po ukupnom naboju koji se nalazi u njemu i koji je konstantan. Iako su moguće promjene unutar toga sustava, količina naboja će biti nepromijenjena dok god određena količina naboja iz toga sustava ne bude unešena ili iznešena. Ta zakonitost je opisana zakonom o očuvanju električnog naboja: „Ukupan električni naboj izoliranog zatvorenog sustava ne mijenja se s vremenom.“ [1]

#### 3.2. Coulombov zakon

Charles Augustin Coulomb je bio francuski fizičar koji je 1785. godine proveo istraživanje sila koje su se pojavljivale među dvama naelektriziranim tijelima. Proučavajući je došao do zakonitosti koja je izražena na sljedeći način: „Dva se mirna električna naboja odbijaju ili privlače silom koja je razmjerna umnošku njihovih naboja, a obrnuto je razmjerna kvadratu udaljenosti između njih.“ [1] Matematički zapis Coulombovog zakona glasi:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \text{ N} \quad (3-2)$$

Naboji  $Q_1$  i  $Q_2$  su naboji na tijelima,  $r$  je razmak između danih naboja, a  $k$  je konstanta čija vrijednost u vakumu iznosi :

$$k = 8.98755 \cdot 10^9 \text{ (N} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{C}^2 \quad (3-3)$$



Ovisno o sredstvu u kojemu se nalaze naboji, konstanta  $k$  ovisi o relativnoj permitivnosti  $\epsilon_r$  koja je različita za sve vrste materijala. [2]

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} (\text{N} \cdot \text{m}^2) / \text{C}^2 \quad (3-4)$$

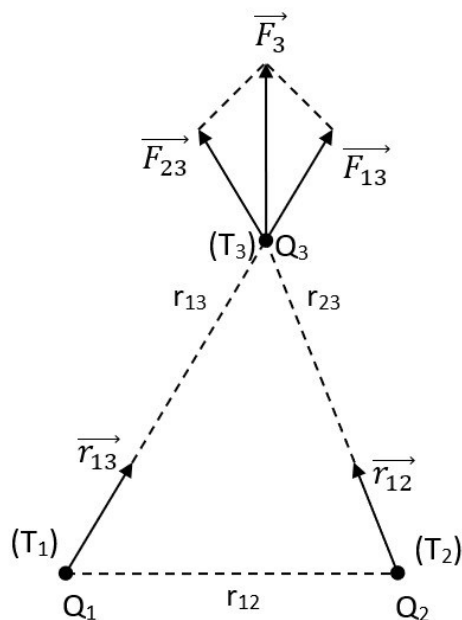
Dielektrična propustljivost vakuumu iznosi:

$$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (3-5)$$

Budući da su dimenzije tijela na kojima su naboji male u odnosu na njihovu međusobnu udaljenost, ti naboji se nazivaju točkastim nabojima jer se pretpostavlja da su naboji koncentrirani u jednu malu točku. Coulombov zakon se može prikazati i vektorski uvrštavanjem u jednadžbu jediničnog vektora koji je usmjeren od naboja koji se smatra izvorom djelovanja prema drugom naboju. [1]

$$\vec{F}_{12} = k_0 \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \cdot \vec{r}_{12}^0 \quad (3-6)$$

Ukoliko postoje više od dva naboja, sila se računa između svih parova naboja koji se nalaze u tom prostoru jer je poznato da se sila između dvaju naboja ne mijenja prisustvom trećeg naboja. Nakon određivanja svih sila, moguće je primijeniti pravilo superpozicije s ciljem određivanja rezultantne sile tih naboja. [1]



Slika 3.1. Coulombova sila u sustavu tri naboja [1]

### 3.3. Električno polje

Električno polje  $\vec{E}$  u određenoj poziciji je jakost i usmjerenje mehaničke sile  $\vec{F}$  koja djeluje na jedinični naboj  $q$  kada je on izložen tom električnom polju. Standardna definicija električnog polja je: „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  $Q_0$  unešen u električno polje.“ [2] Prema danoj definiciji zaključeno je da je električno polje vektorska veličina te se računa prema izrazu:

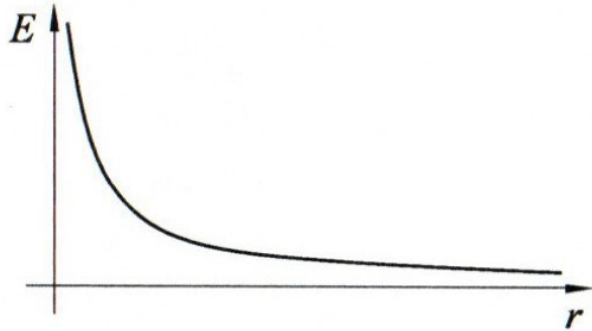
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{Q_0} \quad (3-7)$$

Električno polje ovisi o rasporedu naboja koji se nalaze izvan polja te se zbog toga mora paziti da probni naboj  $Q_0$  bude dovoljno mal kako nebi uzrokovao pomake naboja koji se nalaze izvan polja.

Jedna od veličina koja karakterizira električno polje je i njegova jakost, odnosno intenzitet. Definira se kao omjer mehaničke sile  $F$  i naboja  $Q$ . [3]

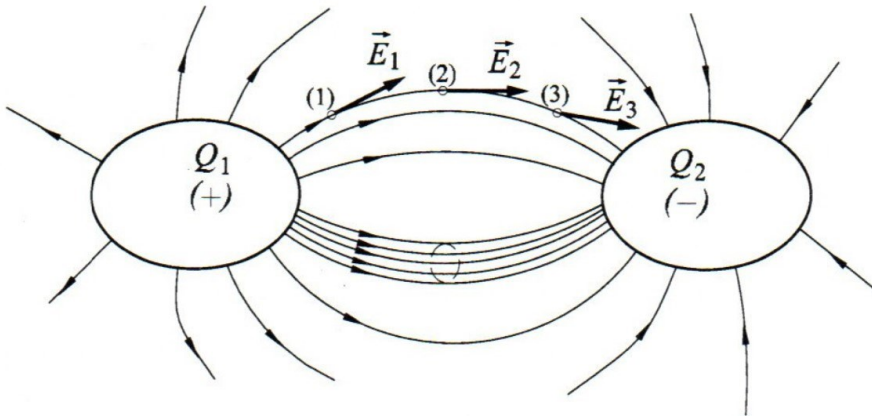
$$E = \frac{F}{Q} \text{ [N/C]} \quad (3-8)$$

Iako je prema fizikalnom zapisu mjerna jedinica električnog polja njutn po kulonu  $[\text{N/C}]$ , najčešće upotrebljavana mjerna jedinica je volt po metru  $[\text{V/m}]$ . Budući da jakost električnog polja ima kvadratnu povezanost s udaljenošću, približavanjem točkastom naboju jakost električnog polja se jako povećava. [1]



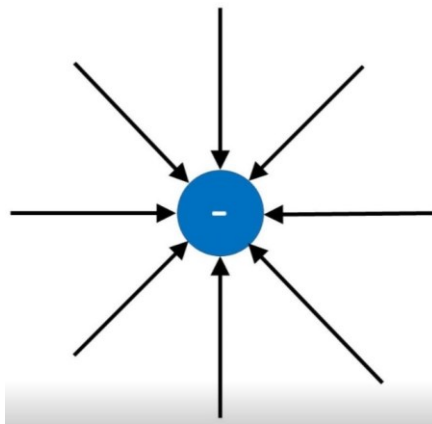
Slika 3.2. : Jakost električnog polja u ovisnosti o udaljenosti [1]

Svako električno polje se prikazuje pomoću električnih silnica ili linija električnog polja. Definicija silnica je: „Silnica se definira kao zamišljena linija kojoj je vektor polja u svakoj točki tangenta.“ [1]

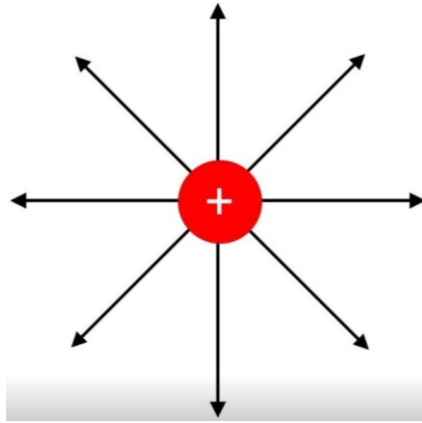


Slika 3.3. : Silnice električnog polja [1]

Elektrostatsko polje nazvano je izvornim poljem jer silnice ulaze u negativne naboje, a iz pozitivnih naboja izlaze. [3]

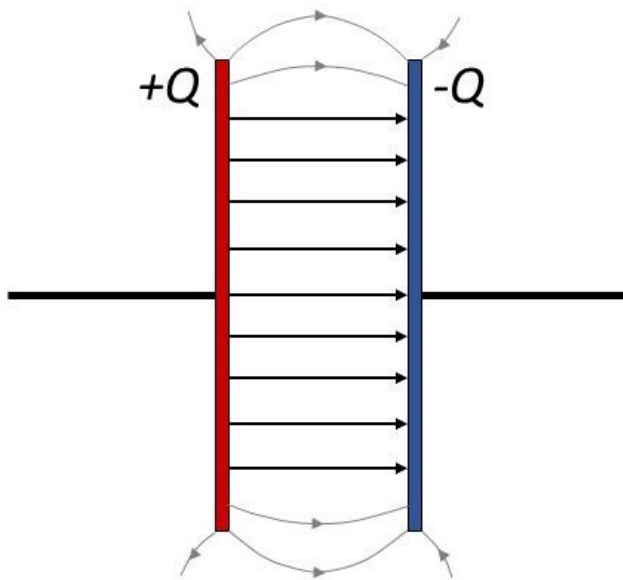


Slika 3.4. : Električno polje negativnog točkastog naboja [3]



**Slika 3.5.** : Električno polje pozitivnog točkastog naboja [3]

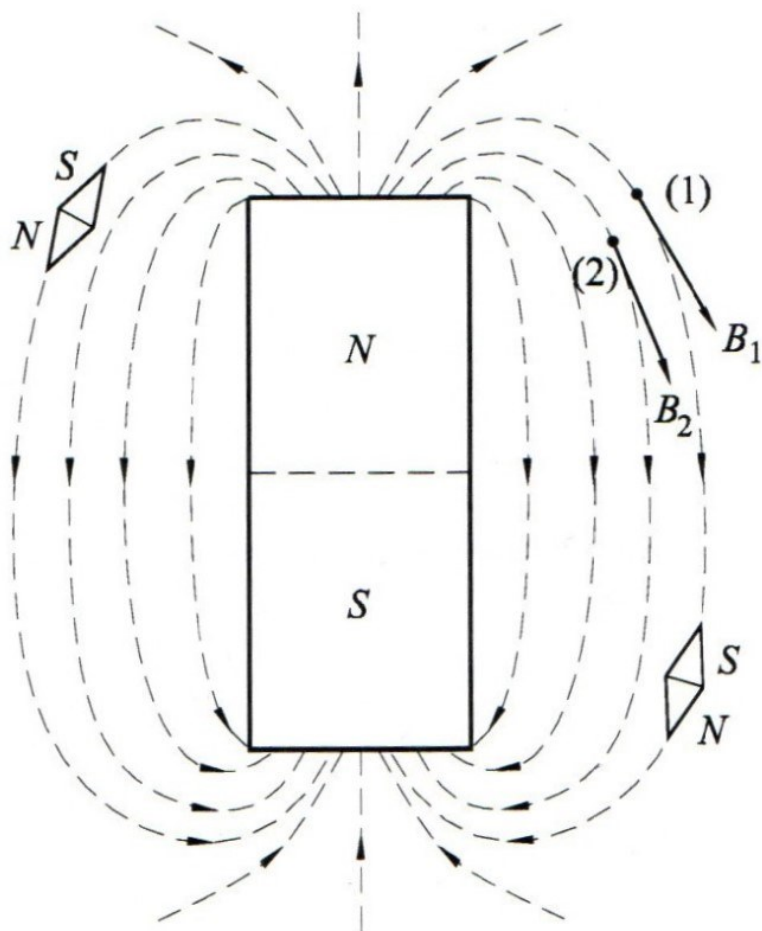
Sve silnice stvaraju prikaz električnog polja i točno prikazuju pravac i smjer vektora električnog polja  $\vec{E}$  u svim točkama prostora u kojemu se nalazi električno polje. Zbog pojednostavljenja prikaza električnog polja ne koriste se sve silnice nego samo određeni broj jer bi u suprotnom cijeli prikaz bio ispunjen silnicama. Što je veća udaljenost od naboja, gustoća silnica se smanjuje što utječe i na jakost električnog polja naboja. Ovisno o gustoći silnica električnog polja razlikuju se homogeno i nehomogeno električno polje. Homogeno električno polje je polje u kojem su sve silnice polja paralelne te se njihova gustoća ne mijenja, konstantna je. U nehomogenom električnom polju se gustoća linija električnog polja mijenja u prostoru. [1]



Slika 3.6. Homogeno električno polje [3]

### 3.4. Magnetsko polje

Magnetsko polje je prostor oko magneta u kojemu se očituje djelovanje magnetskih sila. Postoje prirodni i umjetni magneti. Određeni materijali postaju umjetni magneti djelovanjem struje. I prirodni i umjetni magneti imaju određena područja na sebi na kojima su izraženija magnetska svojstva. Ta područja se nazivaju magnetskim polovima. Kao i kod naboja, istoimeni magnetski polovi se odbijaju, dok se suprotni magnetski polovi privlače. Svaki magnet posjeduje dva magnetska pola, sjeverni i južni. Ukoliko dođe do razdvajanja jednoga magneta, svaki od novonastalih dijelova će također imati dva magnetska pola. [1], [4]



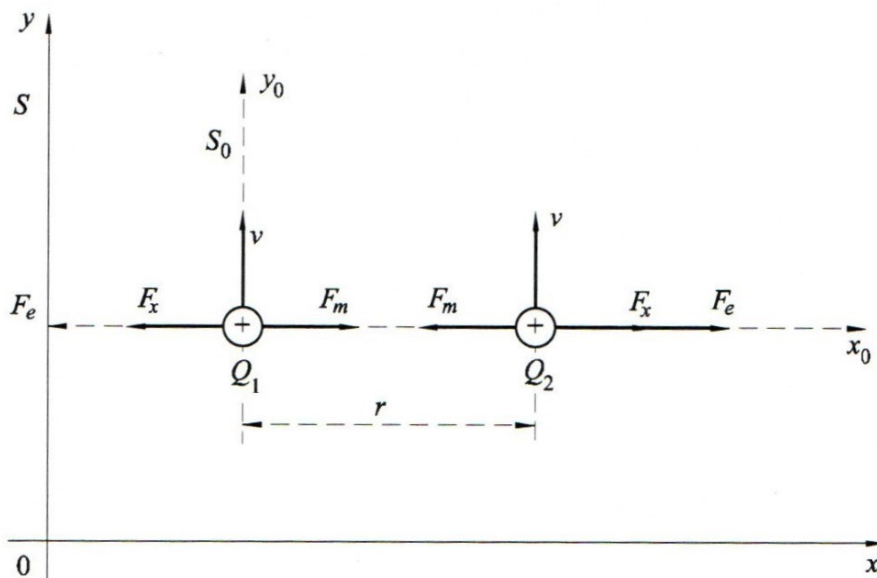
Slika 3.7. Silnice magnetskog polja [1]

Kako bi se objasnilo postojanje magnetskog polja, biti će korišten slučaj u kojemu se dva naboja gibaju te se javlja sila između njih. Postoje dva koordinatna sustava od kojih u  $S_0$  naboji  $Q_1$  i  $Q_2$  miruju, ali se gibaju određenom brzinom  $v$  u odnosu na drugi koordinatni sustav  $S$ . Oba koordinatna sustava su inercijalni svaki za sebe. Ako smo postavljeni kao promatrač u sustavu  $S$ , tada na se temelju teorije relativnosti dolazi do zaključka da se sila koja je okomita na smjer gibanja smanjila. [1] Izraz za silu  $F_x$  je :

$$F_x = F_{0x} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (3-9)$$

Konstanta c koja se pojavljuje u formuli je brzina svjetlosti te iznosi:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]} \quad (3-10)$$



**Slika 3.8.** Sila između dvaju mirnih naboja u inercijalnom sustavu \$S\_0\$ koji se giba brzinom \$v\$ u odnosu na mirni inercijalni sustav \$S\$ [1]

Budući da je sila \$F\_{0x}\$ Coulombova sila, jednadžbu možemo raspisati na sljedeći način:

$$F_x = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2 \cdot c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (3-11)$$



Jednadžbu (3-11) je potrebno raščlaniti na dva dijela, prvi dio jednadžbe je dio koji predstavlja električnu silu, a drugi dio jednadžbe je dio koji se odnosi na magnetsku silu.

$$F_m = \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot v^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot c^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = Q_2 \cdot v \cdot B \text{ [N]} \quad (3-12)$$

Jednadžba (3-12) se pojavljuje kao posljedica djelovanja magnetskog polja. Magnetsko polje je okarakterizirano magnetskom indukcijom  $B$ . Magnetska indukcija  $B$  prema slici 3.8. promatrana je kao rezultat djelovanja naboja  $Q_1$  koji se giba u točki pozicioniranja naboja  $Q_2$ . Računa se prema izrazu:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{Q_1 \cdot v}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \text{ [T]} \quad (3-13)$$

Veličina  $\mu_0$  je konstanta i naziva se permeabilnost vakuma te iznosi:

$$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot c^2} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ [V} \cdot \text{s/A} \cdot \text{m]} \quad (3-14)$$

Magnetska permeabilnost  $\mu$  je svojstvo materijala da propušta veći ili manji broj magnetskih silnica. Ovisi o relativnoj permeabilnosti  $\mu_r$  te o permeabilnosti vakuma  $\mu_0$ . [4]

## 4. PRAVILNICI I NORME

### 4.1. Profesionalna izloženost

Na temelju Zakona o zaštiti od neionizirajućeg zračenja koji je na snazi od 2010. godine potrebno je definirati i profesionalnu izloženost radnika koji obavljaju poslove u prisustvu izvora neionizirajućeg zračenja. Stoga je 29.6.2016. godine u Narodnim novinama izdan Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja. Područjima profesionalne izloženosti se smatraju područja u kojima radnik obavlja sve poslove vezane za izvore elektromagnetskih polja 40 sati tjedno. Iako normalno obavlja sve poslove u kontroliranim uvjetima, radnik je upoznat s rizicima i opasnostima kojima je izložen. U ovome pravilniku utvrđeni su zdravstveni uvjeti kojima moraju udovoljavati rukovatelji koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, učestalost zdravstvenih pregleda i sadržaj, način i rokovi čuvanja podataka o tim pregledima. Osim toga, ovim pravilnikom se propisuju minimalni zahtjevi za zaštitu radnika od rizika za njihovo zdravlje i sigurnost, koji su posljedica ili bi mogli biti posljedica izloženosti elektromagnetskim poljima tijekom rada. Nadalje, Odredbama ovog Pravilnika obuhvaćeni su svi poznati izravni biofizikalni učinci i neizravni učinci uzrokovani elektromagnetskim poljima, ali ipak ne obuhvaćaju moguće dugoročne učinke i rizike uzrokovane kontaktom s aktivnim vodičima. Razlikuju se izravni biofizikalni učinci na ljudsko tijelo i neizravni učinci. [6] Izravni biofizikalni učinci se dijele na:

- fotopsiju i mučnine zbog magnetskih polja koja su najčešće statička
- učinci na organe osjeta, mišiće i živce zbog frekvencijskih polja frekvencije do 100 kHz
- grijanje dijela ili cijelog tijela zbog frekvencijskih polja frekvencije više od 10 MHz
- učinci na mišiće i živce te grijanje tijela zbog frekvencija od 100 kHz do 10 MHz

Neizravni učinci se definiraju kao učinci prouzročeni izloženošću predmeta elektromagnetskom polju, a mogu postati uzroci štetnog učinka na sigurnost ili zdravlje. Dije se na:

- interferencija s medicinskim elektroničkim uređajima i drugim proizvodima
- interferencija s aktivnim ugrađenim medicinskim proizvodima ili uređajima, kao što su elektronički srčani stimulatori ili defibrilatori
- interferencija s medicinskim proizvodima koji se nose na tijelu, kao što su inzulinske pumpe
- interferencija s umjetnim zglobovima, klinovima, žicama ili pločama izrađenima od metala
- učinci na šrapnel, piercing, tetovaže i umjetnost tijela
- rizik od projektila feromagnetskih predmeta u statičkim magnetskim poljima

- nenamjerno paljenje detonatora
- požari ili eksplozije uzrokovani zapaljenjem zapaljivih ili eksplozivnih materijala iskrama koje uzrokuju inducirana polja, dodirne struje ili pražnjenja iskrom

Osim vrsta učinaka, definirane su i različite kategorije vrijednosti prema kojima se različito postupa ukoliko dođe do veće vrijednosti od propisane. Prva od tih kategorija su granične vrijednosti izloženosti. One su utvrđene na temelju biofizičkih i bioloških saznanja, na temelju toplinskih učinaka i električne stimulacije tkiva. [6]

Tablica 4.1. Granična vrijednost izloženosti za gustoću magnetskog toka  $B$  od 0 do 1 Hz [6]

	Granične vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila
Uobičajeni radni uvjeti	2 T
Lokalizirana izloženost ekstremiteta	8 T
	Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje
Kontrolirani radni uvjeti	8 T

Tablica 4.2. Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje za unutarnju jakost električnog polja od 1 Hz do 10 MHz [6]

Raspon frekvencije	Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje
$1 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$1,1 \text{ V/m}$ (vršna vrijednost)
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$3,8 \cdot 10^{-4} \cdot f \text{ V/m}$ (vršna vrijednost)

Tablica 4.3. Granične vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila za unutarnju jakost električnog polja od 1 do 400 Hz [6]

Raspon frekvencije	Granične vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila
$1 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ Hz}$	$0,7/f \text{ V/m}$ (vršna vrijednost)
$10 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$0,07 \text{ V/m}$ (vršna vrijednost)
$25 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$	$0,0028 \cdot f \text{ V/m}$ (vršna vrijednost)

Sljedeća kategorija su vrijednosti upozorenja. Fizikalne veličine koje se koriste za utvrđivanje danih vrijednosti su jakost izmjeničnih električnih polja, gustoća magnetskog toka izmjeničnih električnih polja, dodirna struja te gustoća magnetskog toka statičkih magnetskih polja. Navedene fizikalne veličine odgovaraju vrijednostima proračunatih ili izmjerenih vrijednosti električnog i magnetskog polja na radnom mjestu, ali se pri mjerenju radnik ne nalazi na njemu. [6]

Tablica 4.4. Vrijednosti upozorenja za izloženost električnim poljima od 1 Hz do 10 MHz [6]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja [V/m]	Visoke vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja [V/m]
$1 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2.0 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^4$
$25 \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$2.0 \cdot 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1.64 \text{ kHz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$1.0 \cdot 10^6 / f$
$1.64 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$6.1 \cdot 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1.7 \cdot 10^2$	$6.1 \cdot 10^2$

Tablica 4.5. Vrijednosti upozorenja izloženosti magnetskim poljima od 1 Hz do 10 MHz [6]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu\text{T}$ ]	Visoke vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu\text{T}$ ]	Vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka za izloženost ekstremiteta lokaliziranom magnetskom polju [ $\mu\text{T}$ ]
$1 \text{ Hz} \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2.0 \cdot 10^5 / f^2$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$8 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2.5 \cdot 10^4 / f$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1.0 \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^2$

Tablica 4.6. Vrijednosti upozorenja za dodirnu struju [6]

Frekvencija	Vrijednosti upozorenja za stalnu dodirnu struju [mA]
Do 2.5 kHz	1.0
$2.5 \text{ kHz} \leq f < 100 \text{ kHz}$	$0.4 \cdot f$
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10000 \text{ kHz}$	40

Tablica 4.7. Vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka statičkih magnetskih polja [6]

Opasnosti	Vrijednosti upozorenja
Interferencija s aktivnim ugrađenim pomagalima, npr. Elektroničkim srčanim stimulatorima	0.5 mT
Privlačenje i rizik od projektila u graničnom polju izvora polja visoke jakosti (>100 mT)	3 mT

Potrebno je definirati i granične vrijednosti učinka na zdravlje ovisno o iznosu frekvencije. Uzrok ovih utjecaja su energija i snaga koji se apsorbiraju po jedinici mase tkiva, a posljedica su izloženost električnom i magnetskom polju. Osim toga, za frekvencije iznad 6 GHz potrebno je definirati ograničenja za energiju i gustoću snage elektromagnetskih valova na površini ljudskog tijela. [6]

Tablica 4.8. Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje za elektromagnetska polja od 100 kHz do 6 GHz [6]

Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje	Vrijednosti specifične apsorbirane snage uprosječene kroz bilo koji 6-minutni interval
Granične vrijednosti izloženosti za toplinsko opterećenje cijelog tijela izražene kao specifična apsorbirana snaga uprosječena u tijelu	$0.4 \text{ W/kg}$
Granične vrijednosti izloženosti za toplinsko opterećenje glave i trupa izražene kao specifična apsorbirana snaga uprosječena u tijelu	$10 \text{ W/kg}$
Granične vrijednosti izloženosti za toplinsko opterećenje ekstremiteta izražene kao specifična apsorbirana snaga lokalizirana u ekstremitetima	$20 \text{ W/kg}$

Treba napomenuti kako masa za uprosječenje lokalne specifične apsorbirane snage iznosi 10g okolnog tkiva.

Tablica 4.9. Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje za elektromagnetska polja od 0.3 GHz do 6 GHz [6]

Raspon frekvencije	Lokalizirana specifična apsorbirana snaga
$0.3 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	$10 \text{ mJ/kg}$

Tablica 4.10. Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje za elektromagnetska polja od 6 GHz do 300 GHz [6]

Raspon frekvencije	Granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje povezane s gustoćom toka snage
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	$50 \text{ W/m}^2$

Izloženo područje se smatra područje površine 20 cm<sup>2</sup> te se gustoća toka snage uprosječuje preko te površine. Ovim pravilnikom je propisano koje su skupine radnika posebno izložene ovim utjecajima te su za svaku vrstu električnih uređaja definirani zahtjevi za specifičnu procjenu električnih i magnetskih polja u odnosu na normalne radne uvjete (radna aktivnost, oprema, radno mjesto). [6]

#### **4.2. Izloženost na javnom području i području povećane osjetljivosti**

Dok su u prethodnom potpoglavlju obrazloženi svi bitni pojmovi i ograničenja vezana uz profesionalnu izloženost osoba koje se svakodnevno susreću s izvorima neionizirajućeg zračenja, u ovome potpoglavlju prikazati će se ograničenja na javnom području, ali i na područjima povećane osjetljivosti. Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja je izdan 10. prosinca 2014. godine i u njemu su navedena i opisana prethodno spomenuta ograničenja. Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja je izdan 27. ožujka 2019. godine i njime su usklađeni pojmovi i ograničenja koji su doživjeli određene promjene. Javnim područjima se smatraju sva mjesta u seoskim i gradskim sredinama u kojima nije ograničen pristup općoj populaciji. Osim toga, javna područja se ne nalaze u područjima povećane osjetljivosti i području profesionalne izloženosti. [5]

Tablica 4.11. Granične razine referentnih veličina za javna područja [7]

Frekvencijski opseg	Jakost električnog polja $E$ [ $V/m$ ]	Jakost magnetskog polja $H$ [ $A/m$ ]	Gustoća magnetskog toka $B$ [ $\mu T$ ]	Gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala [ $W/m^2$ ]
1 Hz-8 Hz	$10^4$	$3.2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 Hz-25 Hz	$10^4$	$4 \cdot 10^3 / f$	$5 \cdot 10^3 / f$	-
25 Hz-800 Hz	$2.5 \cdot \frac{10^5}{f}$	$4 \cdot 10^3 / f$	$5 \cdot 10^3 / f$	-
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	$0.73 / f$	$0.92 / f$	-
1 MHz-10 MHz	$83 / \sqrt{f}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	-
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

Gustoća snage ekvivalentnog vala se definira kao omjer snage i površine okomite na smjer kretanja vala, a mjerna jedinica joj je vat po metru kvadratnom [ $W/m^2$ ]. [5] Područja povećane osjetljivosti su stambene i poslovne zgrade, škole te ustanove za predškolski odgoj djece, bolnice i rodilišta, domovi za starije i nemoćne osobe, turistički objekti namijenjeni smještaju turista te dječja igrališta. Osim prethodno navedenih područja, u područja povećane osjetljivosti se ubrajaju i neizgrađene površine namijenjene gradnji spomenutih objekata prema urbanističkom planu. [5]



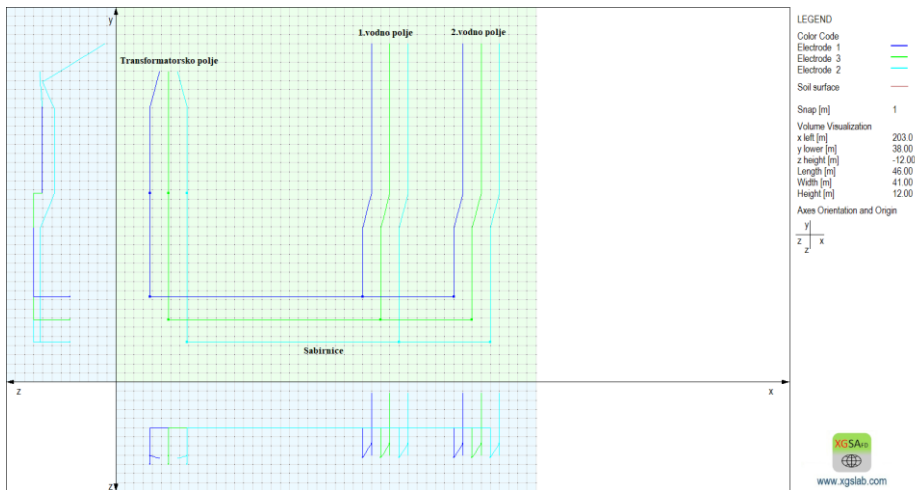
Tablica 4.12. Granične razine referentnih veličina za područja povećane osjetljivosti [7]

Frekvencijski opseg	Jakost električnog polja $E$ [ $V/m$ ]	Jakost magnetskog polja $H$ [ $A/m$ ]	Gustoća magnetskog toka $B$ [ $\mu T$ ]	Gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala [ $W/m^2$ ]
1 Hz-8 Hz	$4 \cdot 10^3$	$1.28 \cdot 10^4 / f^2$	$1.6 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 Hz-25 Hz	$4 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^3 / f$	$2 \cdot 10^3 / f$	-
25 Hz-800 Hz	$\frac{10^5}{f}$	$1.6 \cdot 10^3 / f$	$2 \cdot 10^3 / f$	-
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

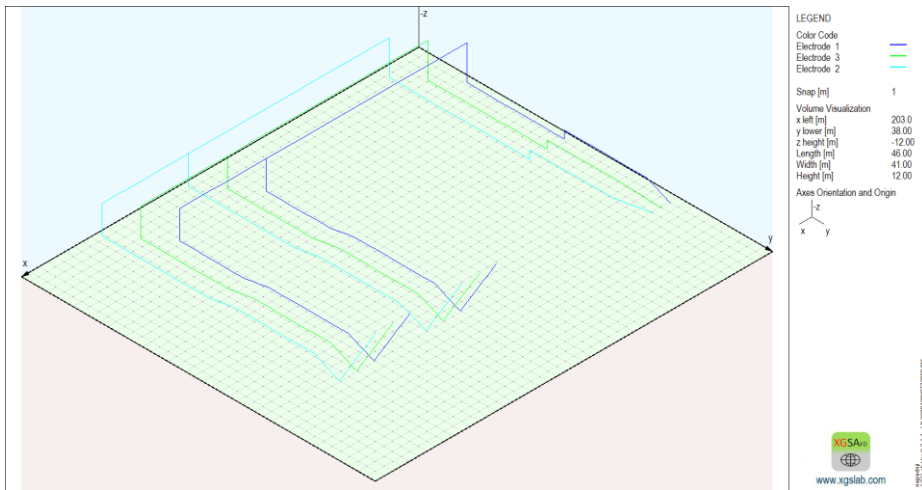
## 5. SIMULACIJA I REZULTATI

### 5.1. Opis modela postrojenja

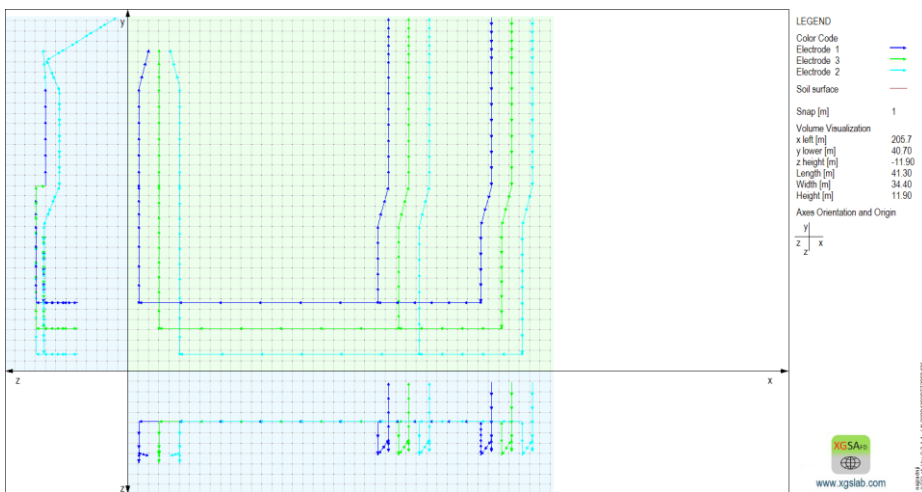
Simulacija je izvršena u programu XGSLab. Korištena je frekventijska domena jer granične vrijednosti te vrijednosti upozorenja električnog i magnetskog polja ovise o frekvenciji. Taj dio programa se zove XGSA FD. Prvo je nacrtano visokonaponsko postrojenje koje se sastoji od jednog transformatorskog polja te od dva vodna polja. Udaljenost između transformatorskog polja i vodnog polja iznosi 20 metara, dok je udaljenost između dva vodna polja bila 10 metara. Nazivni napon visokonaponskog postrojenja je 110 kV. Sabirnice se nalaze na visini od 7 metara, dok visine vodiča u vodnom i transformatorskom polju ovise o aparatima te njihovim visinama. U našem slučaju je korišten samo jedan sustav sabirnica. Udaljenost između faza u transformatorskom polju iznosi 2 m, a ukupna duljina transformatorskog polja je 27,125 m. Kraj transformatorskog polja je spojen na sabirnice. Vodna polja su izgledom jednaka. Razmak između faza u vodnom polju je također 2 m, ali je njihova dužina 27,550 m. Dok je jedna strana vodnih polja spojena na sabirnice, druga strana je spojena na portal dalekovoda koji se nalazi na visini od 10,8 m.



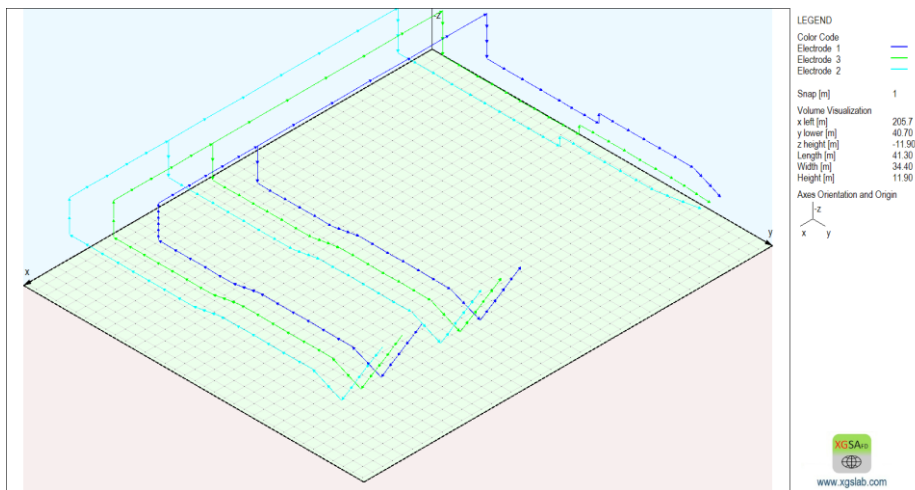
Slika 5.1. 2D prikaz postrojenja



Slika 5.2. 3D prikaz postrojenja



Slika 5.3. 2D prikaz postrojenja s prikazanim smjerovima struja

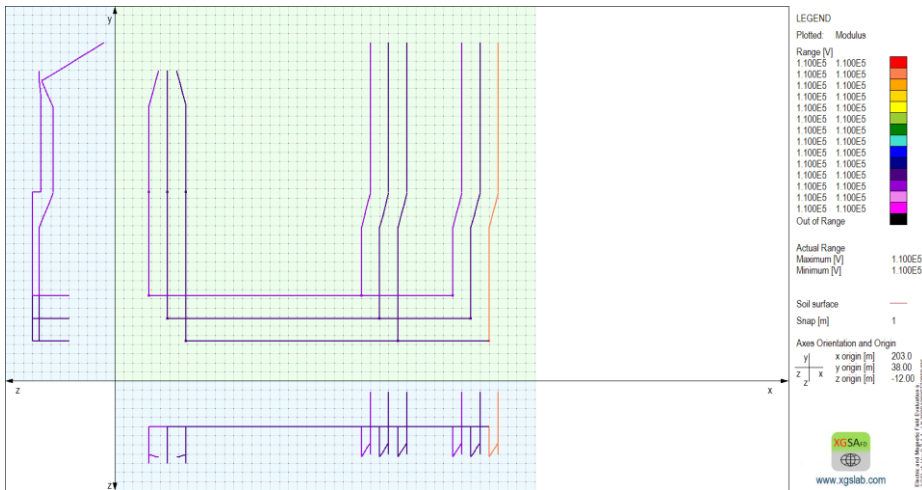


Slika 5.4. 3D prikaz postrojenja s prikazanim smjerovima struja

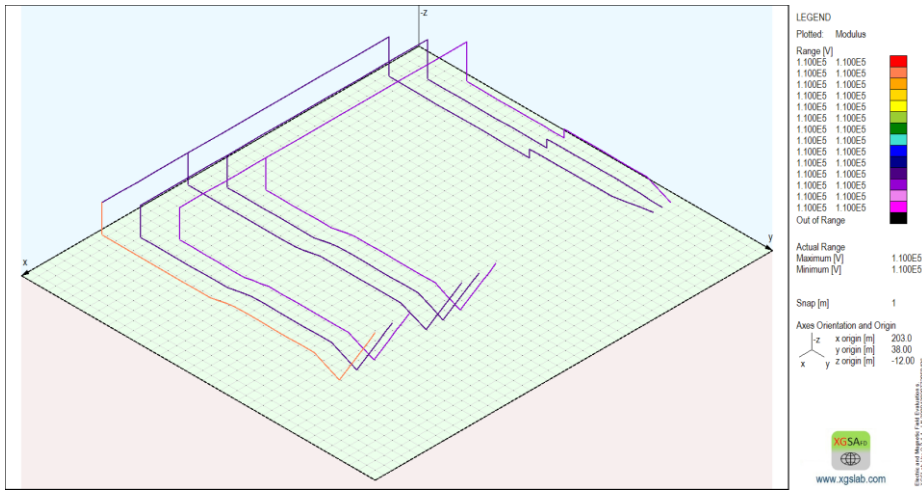
Iako je napon na svim dijelovima postrojenja 110 kV, različiti su kutovi napona svake pojedine faze. U programu se za svaku pojedinu fazu morao unositi napon u kompleksnom obliku.

Tablica 5.1. : Iznosi napona pojedinih faza

1.faza	2.faza	3.faza
110000 V	$-55000 + j95262,79 \text{ V}$	$-55000 - j95262,79 \text{ V}$

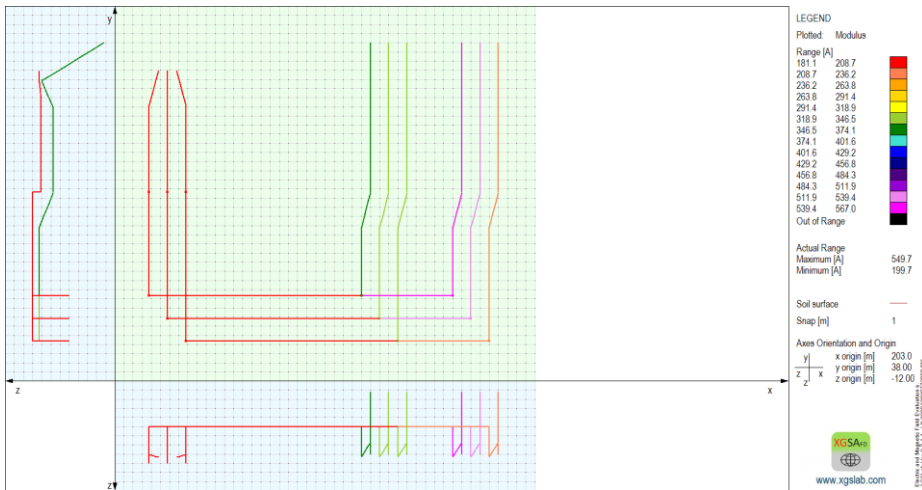


Slika 5.5. 2D prikaz postrojenja s naznačenim naponima različitim bojama

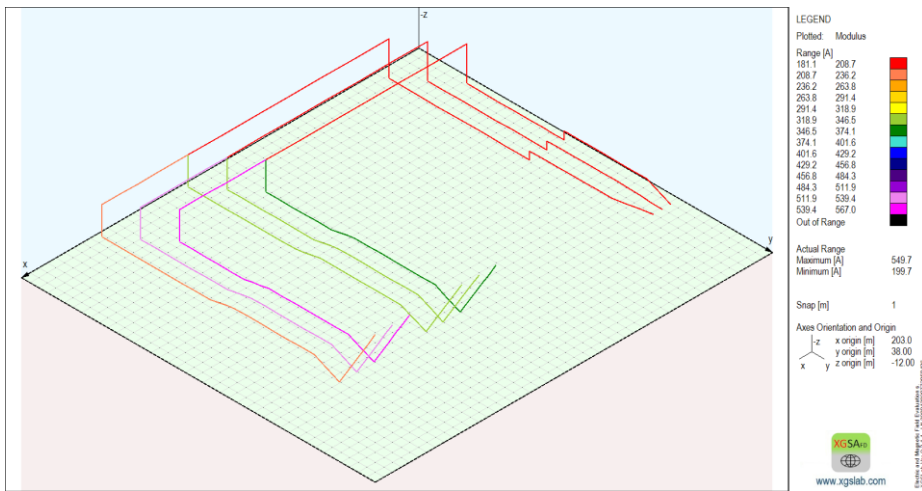


Slika 5.6. 3D prikaz postrojenja s naznačenim naponima različitim bojama

Na slici 5.5. i na slici 5.6. je vidljivo kako su određene faze prikazane istim bojama, iako nisu isti naponi po kutu, ali program prikazuje napone prema iznosu pa su zbog toga određeni dijelovi različitih faza prikazani istom bojom.



Slika 5.7. 2D prikaz struja različitim bojama



Slika 5.8. 3D prikaz struja različitim bojama

Iako se struje razlikuju u svim poljima i fazama, zbog približno istih iznosa one su u programu prikazane istim bojama u određenim dijelovima postrojenja.

Tablica 5.2. Iznosi struja u transformatorskom polju

Transformatorsko polje		
1.faza	2.faza	3.faza
190 + j62 A	-149 + j133 A	-40 – j195.77 A

Tablica 5.3. Iznosi struja u 1.vodnom polju

1.vodno polje		
1.faza	2.faza	3.faza
339.49 + j85.09 A	-160.93 + j303,11 A	-160.93 – j303.11 A

Tablica 5.4. Iznosi struja u 2.vodnom polju

2.vodno polje		
1.faza	2.faza	3.faza
529,51 + j147,52 A	-309,93 + j436,11 A	-200,93 – j107,34 A

Proizvoljno su postavljeni smjerovi struja u postrojenju tako da struja u postrojenje dolazi kroz 2. vodno polje te je preko sabirnica struja podijeljena između 1. vodnog polja i transformatorskog polja.

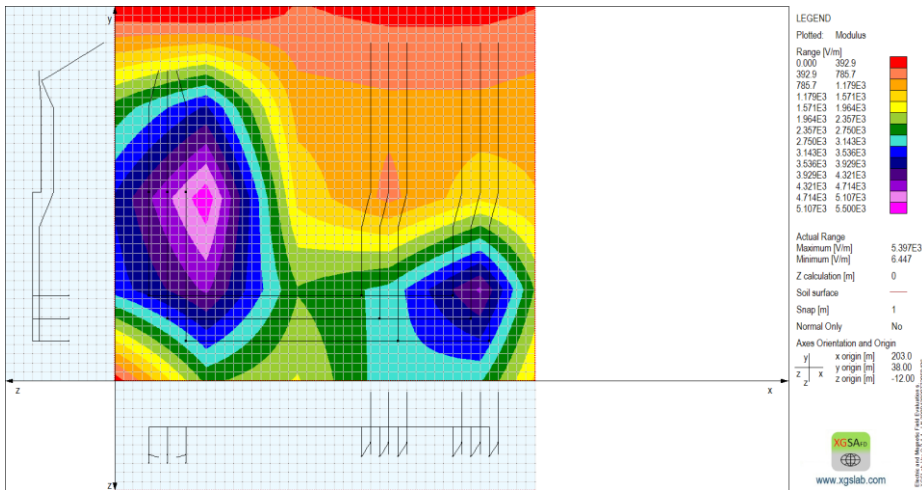
## 5.2. Analiza električnog polja

Prije nego je simulacija pokrenuta, prethodno su morale biti određene vrijednosti upozorenja te granične vrijednosti za jakost električnog polja. Uzeto je u obzir da se radi o visokonaponskom postrojenju te je prema (5-1) određena niska vrijednost upozorenja za jakost električnog polja, a prema (5-2) određena visoka vrijednost upozorenja za jakost električnog polja.

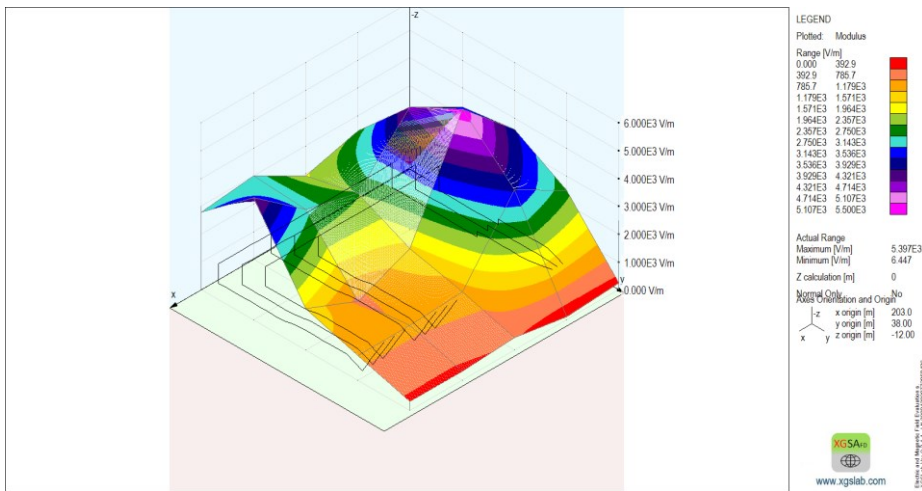
$$\frac{5 \cdot 10^5}{f} = \frac{5 \cdot 10^5}{50} = 10000 \text{ V/m} \quad (5-1)$$

$$\frac{1 \cdot 10^6}{f} = \frac{1 \cdot 10^6}{50} = 20000 \text{ V/m} \quad (5-2)$$

Nakon što su unesene tražene vrijednosti, pokretanjem simulacije je dobiven niz grafičkih prikaza raspodjele električnog polja u visokonaponskom postrojenju.

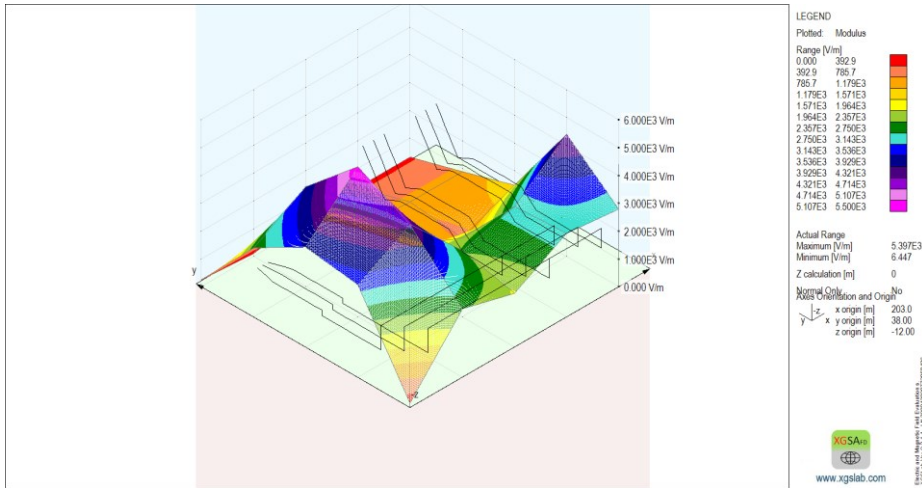


Slika 5.9. 2D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju

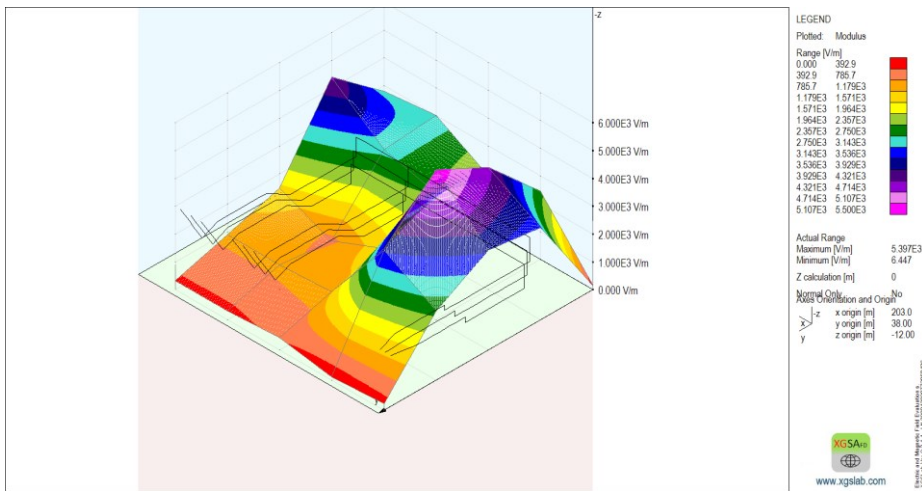


Slika 5.10. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa sjeverne strane

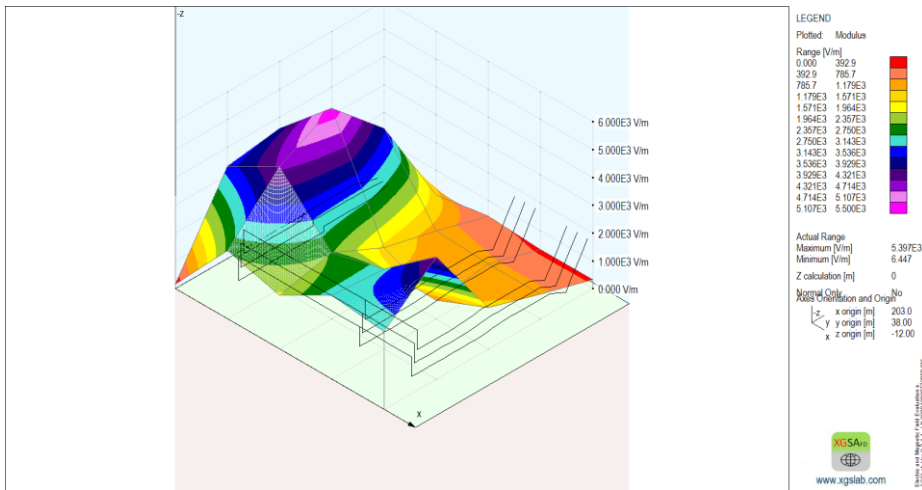




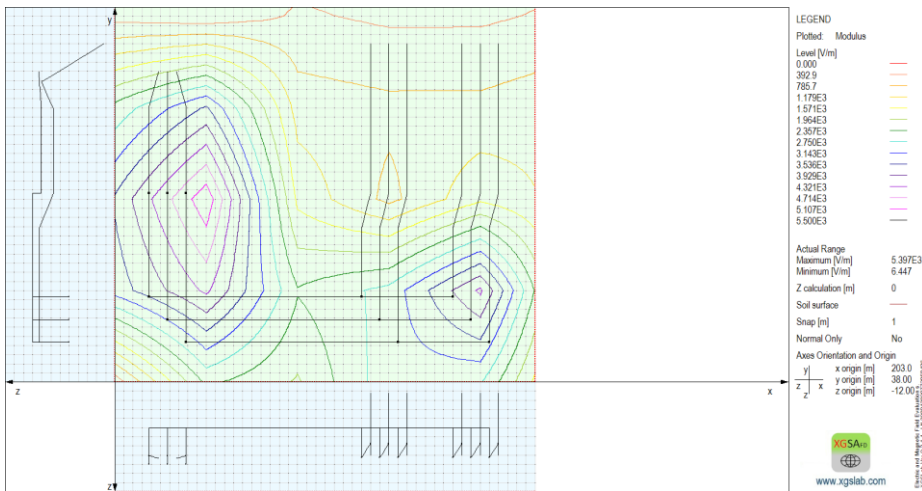
Slika 5.11. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju s južne strane



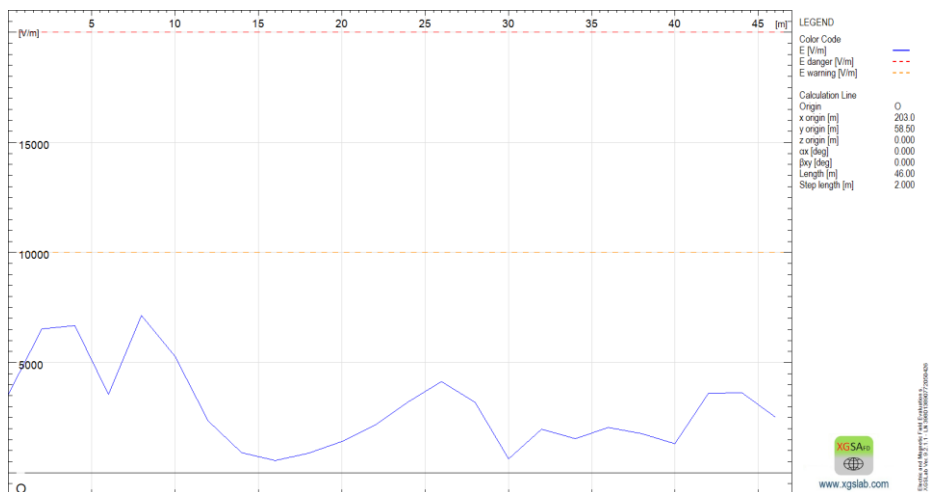
Slika 5.12. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa zapadne strane



Slika 5.13. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju s istočne strane

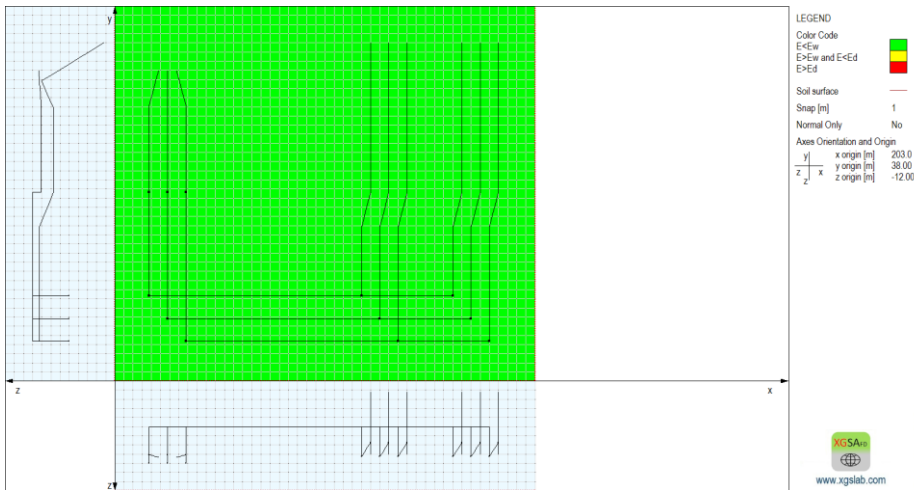


Slika 5.14. Konturni prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju



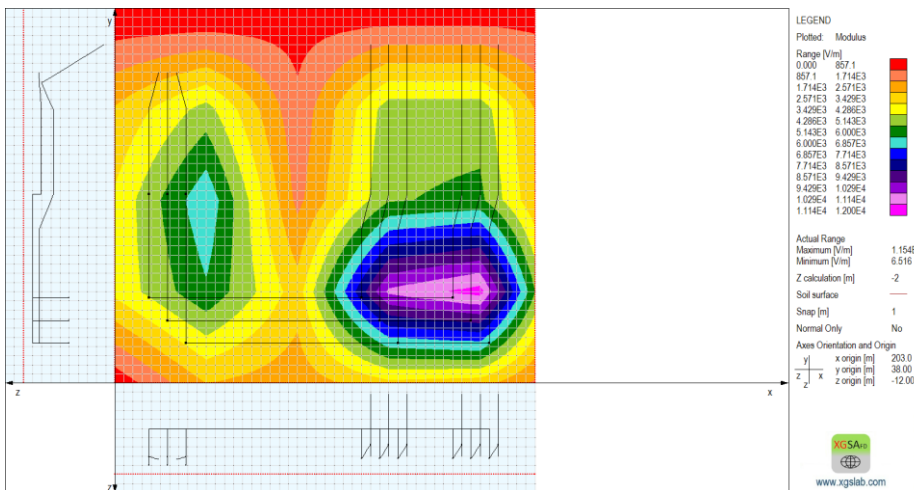
Slika 5.15. Linijski prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju

Kako je vidljivo iz prethodnih prikaza, maksimalna vrijednost električnog polja koja se pojavljuje u simulaciji je  $5397 \text{ V/m}$ . Budući da je niska vrijednost upozorenja za jakost električnog polja  $10000 \text{ V/m}$ , u postrojenju ne postoji opasnost za radnike pri tlu, odnosno visinski na visini od 0 m. Najveće vrijednosti su se pojavljivale iznad i oko transformatorskog polja jer je na tom dijelu visina postavljenih vodiča najmanja, a samim time i jakost električnog polja najveća. Još jedna od mogućnosti koje pruža ovaj program je prikaz sigurnih zona u postrojenju, odnosno zona u kojima su vrijednosti električnog polja ispod visoke vrijednosti upozorenja. Na slici 5.16. je vidljivo kako je cijelo postrojenje sigurno za radnike na razini tla.

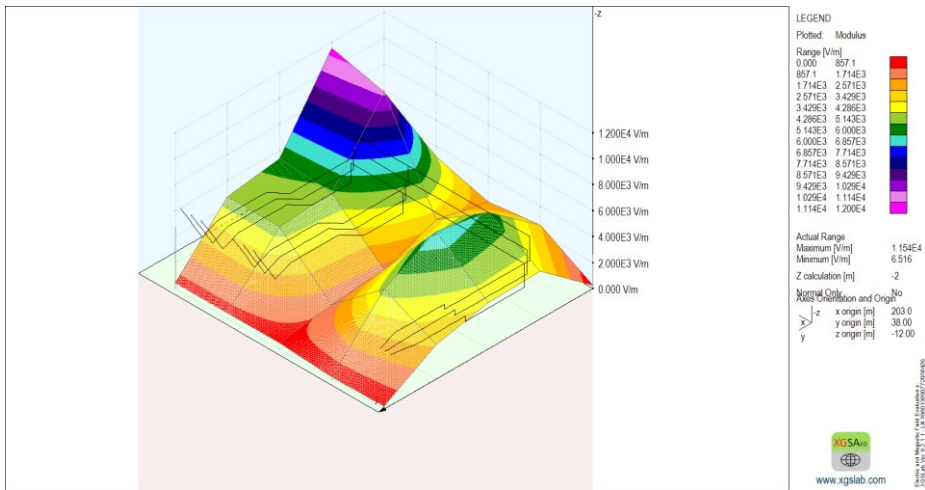


Slika 5.16. Prikaz sigurnih zona u postrojenju na visini 0 m

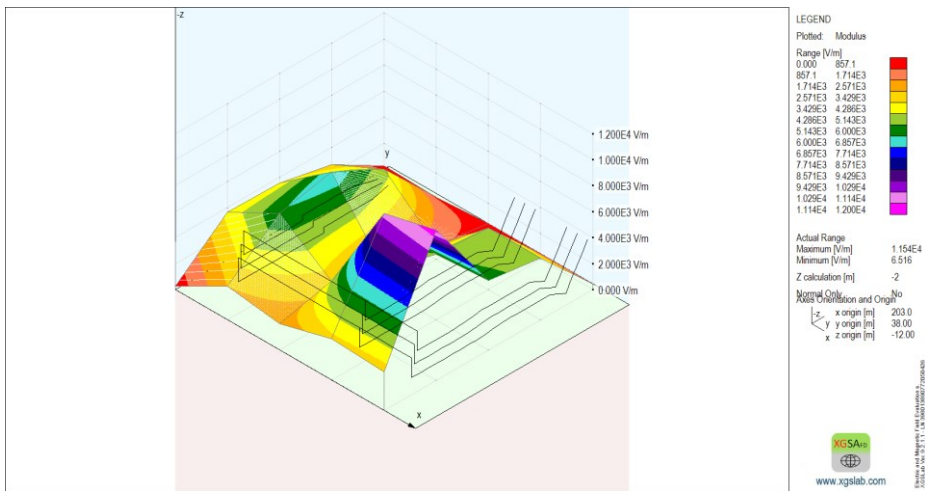
Nakon što je promijenjena postavljena visina na 2 m iznad tla, s pretpostavkom da je to razina glave čovjeka, pokrenuta je simulacija te je dobiven niz grafičkih prikaza koji dokazuju kako je udaljenost od vodiča jako bitan čimbenik utjecaja električnog polja na ljudsko tijelo.



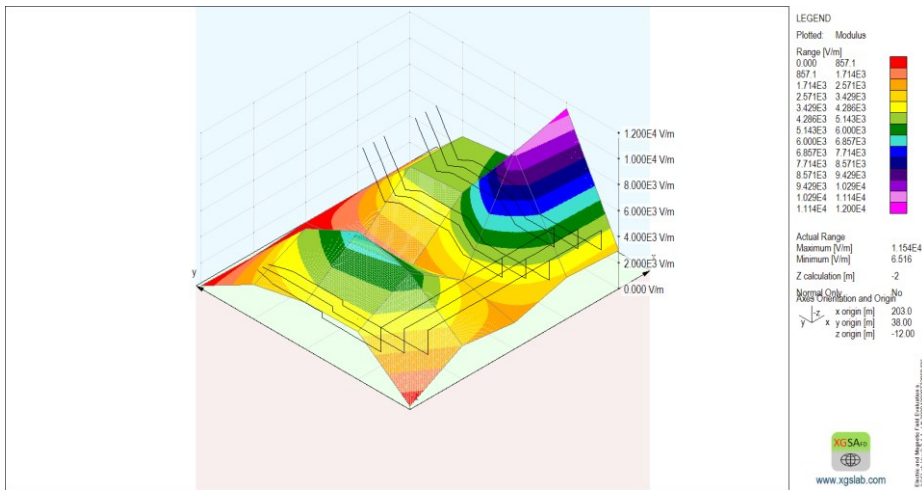
Slika 5.17. 2D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 2 m



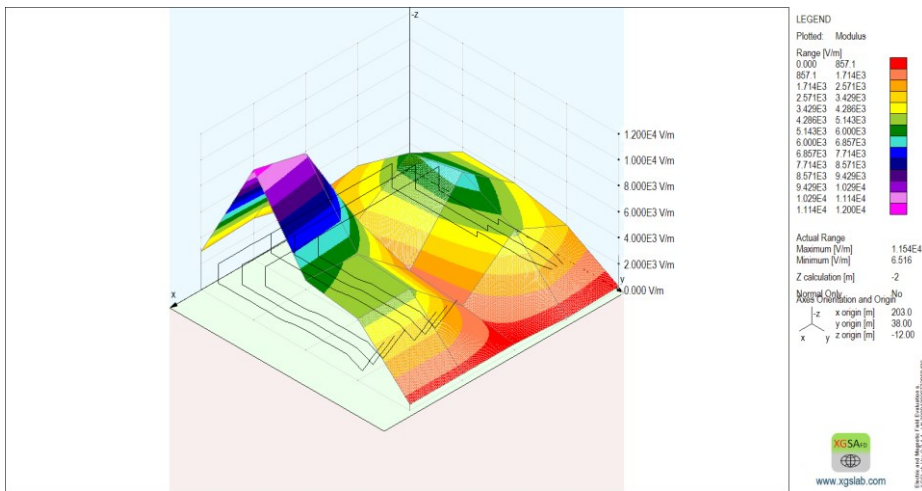
Slika 5.18. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa sjeverne strane na visini 2 m



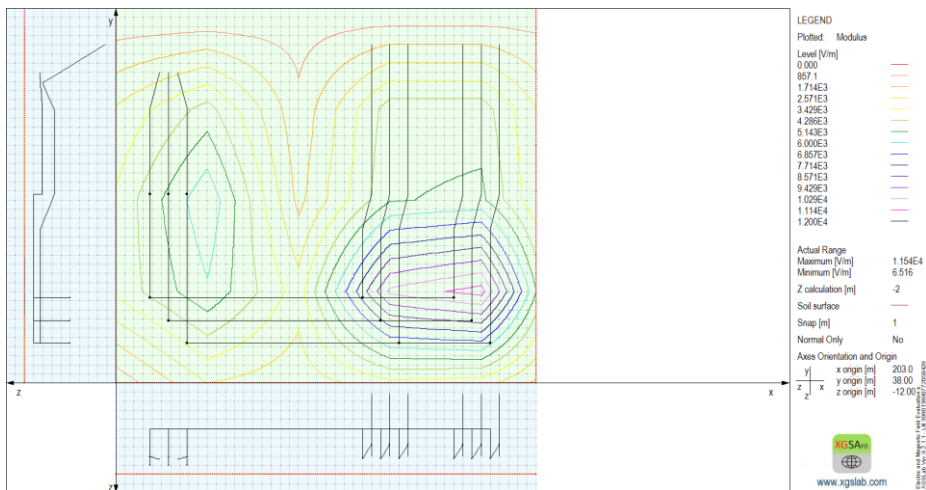
Slika 5.19. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa južne strane na visini 2 m



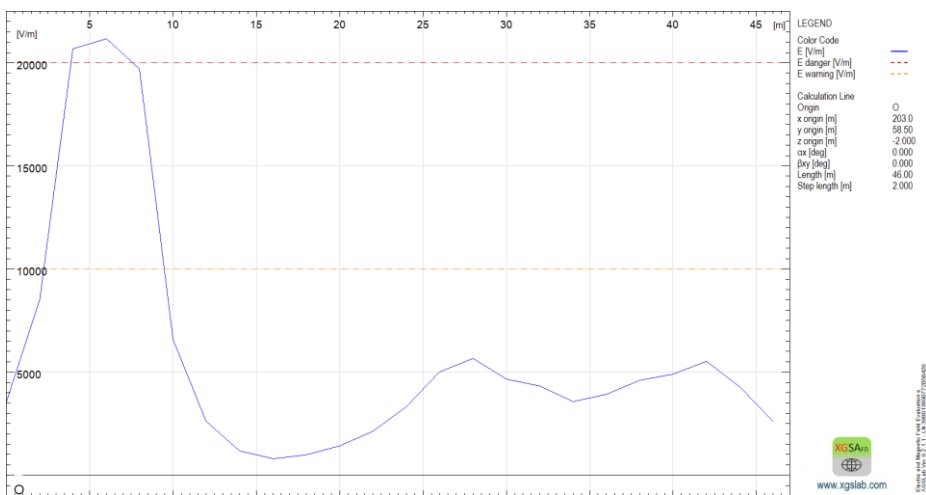
Slika 5.20. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa zapadne strane na visini 2 m



Slika 5.21. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju sa istočne strane na visini 2 m



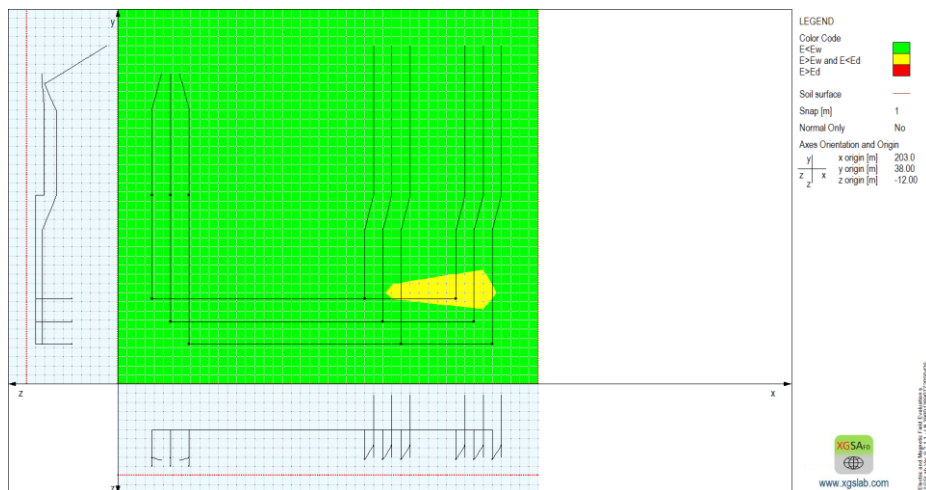
Slika 5.22. Konturni prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 2 m



Slika 5.23. Linijski prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 2 m

Zbog promjene visine simulacije na 2 m, maksimalna vrijednost jakosti električnog polja je bila  $11540 \text{ V/m}$ . Niska vrijednost upozorenja za jakost električnog polja je  $10000 \text{ V/m}$ . Na području spoja sabirnica i oba vodna polja iznos jakosti električnog polja prelazi tu vrijednost, što je vidljivo

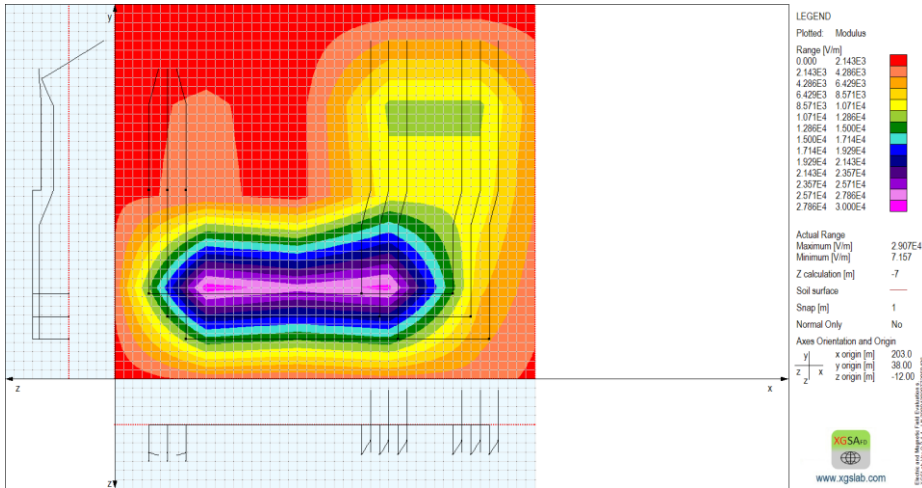
na slici sigurne zone. Uočeno je kako je to područje površinom malo u odnosu na cijelo postrojenje, ali isto tako i da nije premašena visoka vrijednost upozorenja za jakost električnog polja.



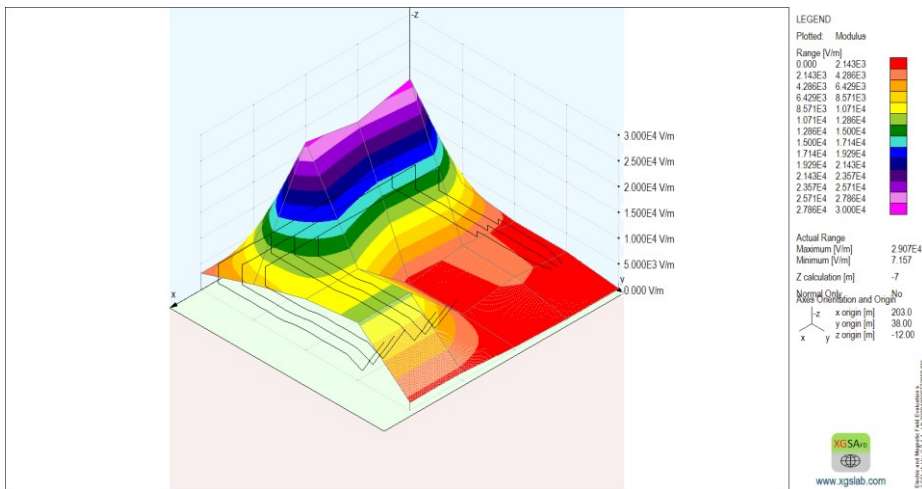
Slika 5.24. Prikaz sigurnih zona u postrojenju na visini 2 m

Nakon što je određena jakost električnog polja na visinama od 0 i 2 metra, visina simulacije je podešena na 7 m od tla, što je visina postavljanja sabirnica kako bi bilo uočeno što se događa na tim visinama i koje opasnosti prijete radnicima.

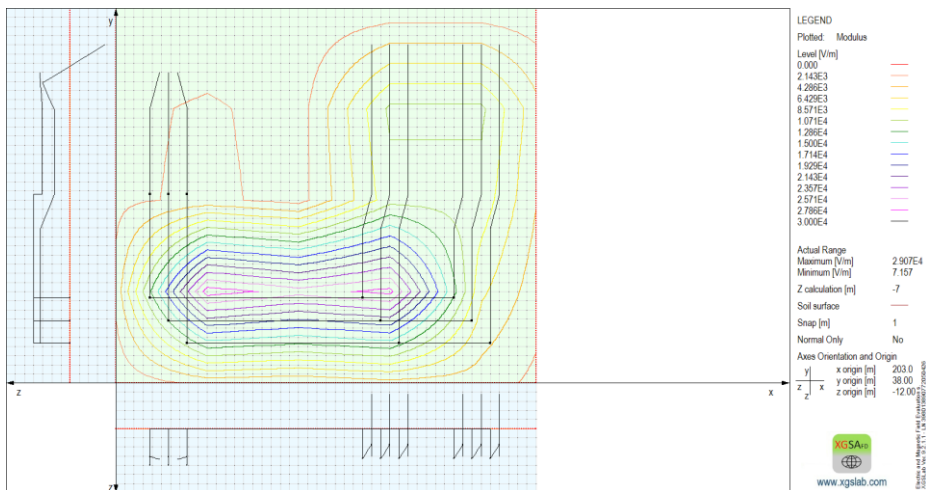




Slika 5.25. 2D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 7 m

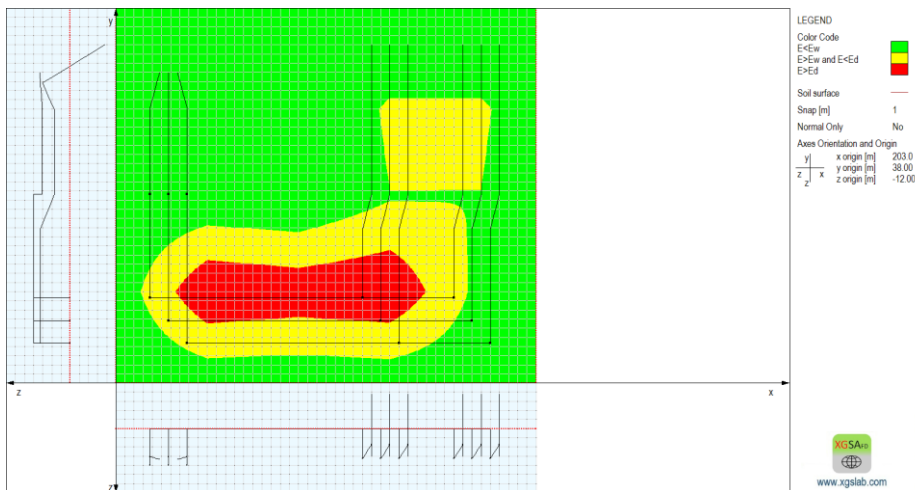


Slika 5.26. 3D prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 7 m



Slika 5.27. Konturni prikaz raspodjele električnog polja u postrojenju na visini 7 m

Maksimalna vrijednost jakosti električnog polja koja se pojavila u ovom slučaju je 29070 V/m. Vrijednosti ispod niske vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja se pojavljuju tek na malom dijelu transformatorskog polja. Na slici 5.28. je vidljivo kako su se na velikom dijelu postrojenja pojavile vrijednosti između niske i visoke vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja, dok se duž sabirnica pojavljuju vrijednosti više od visoke vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja, što u realnom slučaju ne predstavlja problem jer se radnici u naponskom stanju ne smiju penjati na te visine. Međutim, ukoliko se primjenjuje metoda rada pod naponom, potrebno je voditi računa o pripadnim zaštitnim odjelima koja će štiti radnike od djelovanja električnog polja.



Slika 5.28. Prikaz sigurnih zona u postrojenju na visini 7 m

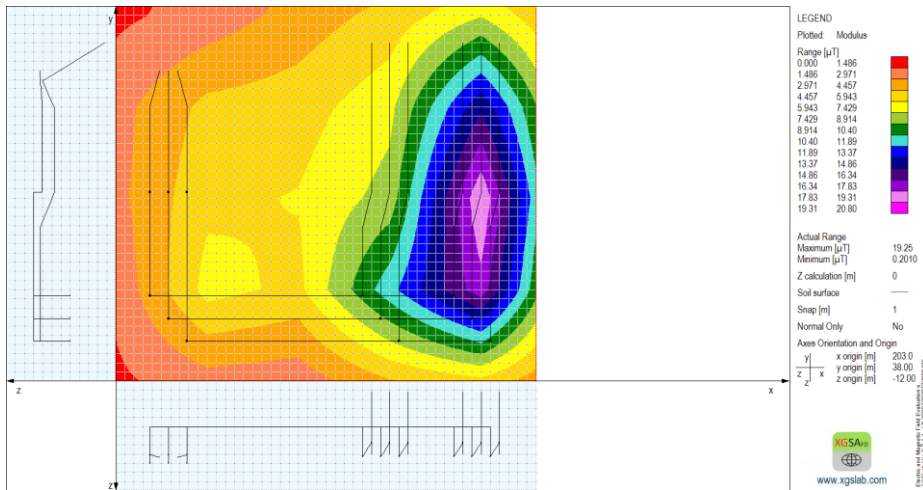
### 5.3. Analiza magnetskog polja

Prije pokretanja simulacija potrebno je, kao i u slučaju električnog polja, odrediti nisku vrijednost upozorenja za gustoću magnetskog toka prema izrazu (5-3) te visoku vrijednost upozorenja za gustoću magnetskog toka prema izrazu (5-4).

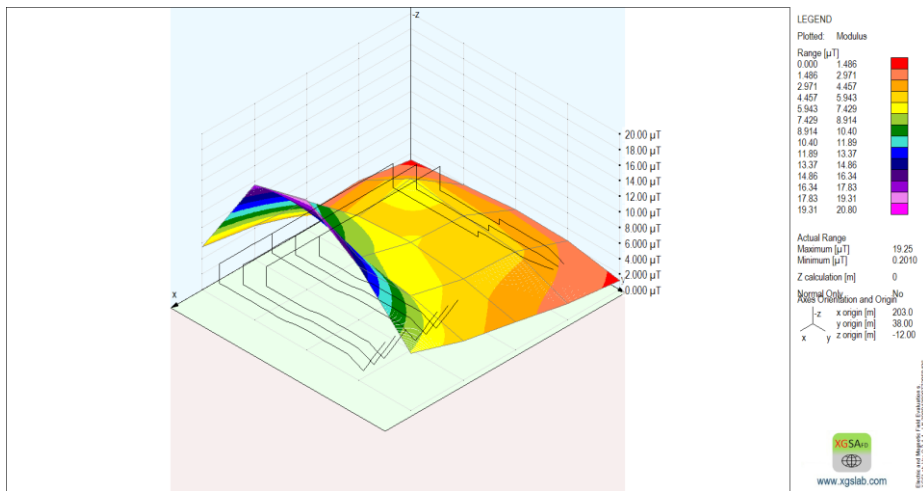
$$1 \cdot 10^3 \mu T = 1000 \mu T \quad (5-3)$$

$$\frac{3 \cdot 10^5}{f} = \frac{3 \cdot 10^5}{50} = 6000 \mu T \quad (5-4)$$

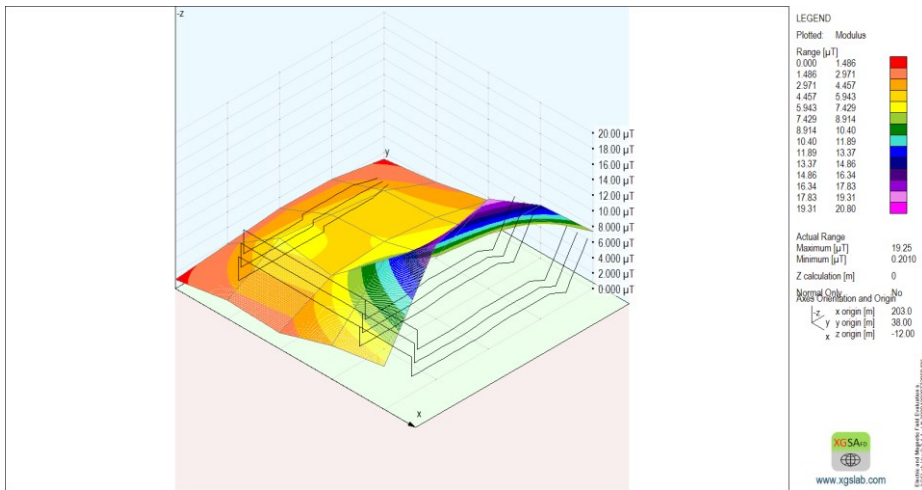
Rezultati dobiveni pokretanjem simulacije su prikazani grafički.



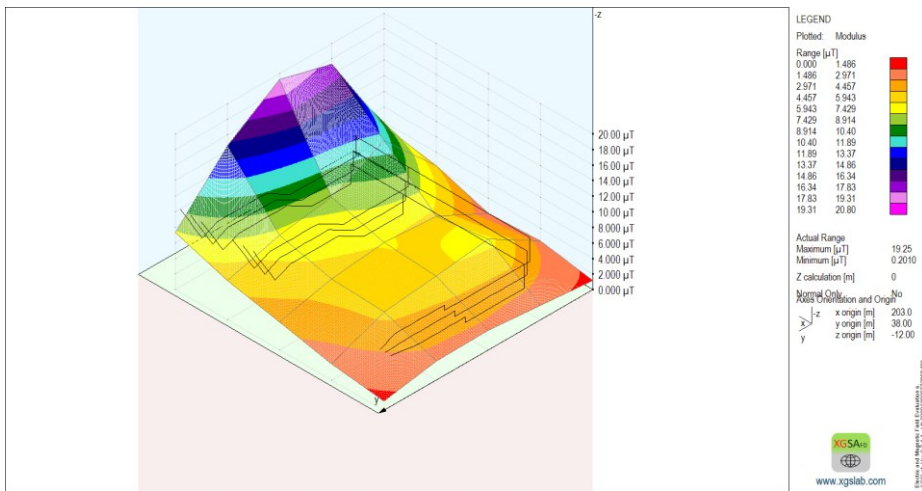
Slika 5.29. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju



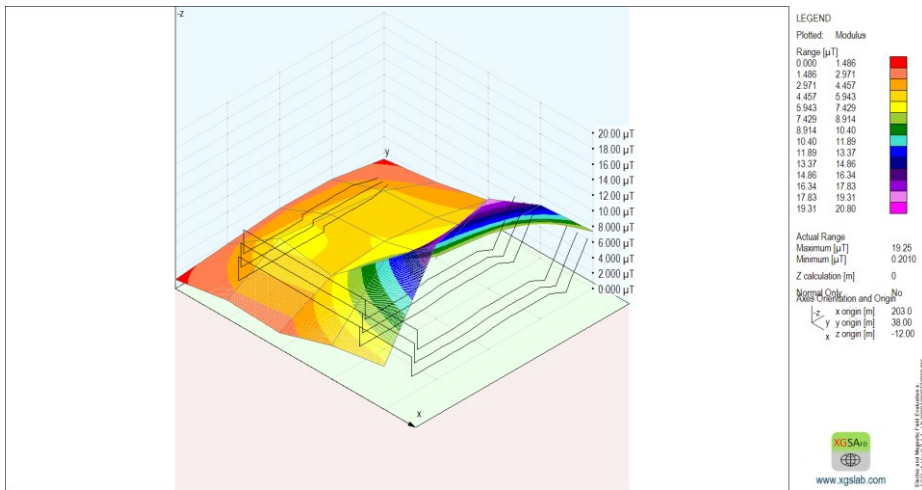
Slika 5.30. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju sa sjeverne strane



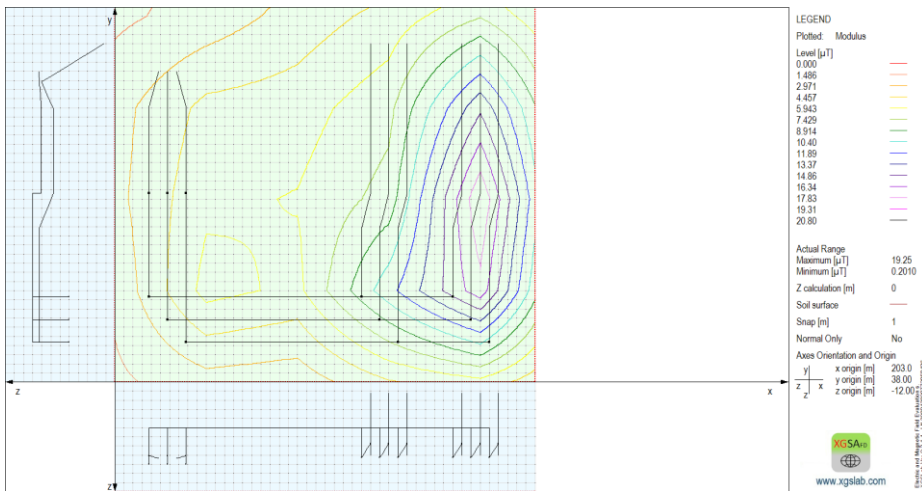
Slika 5.31. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s južne strane



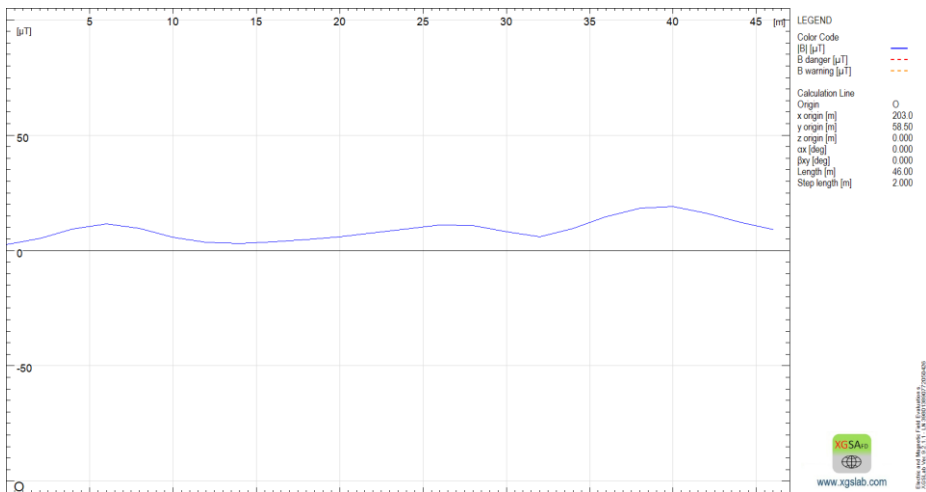
Slika 5.32. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju sa zapadne strane



Slika 5.33. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s istočne strane

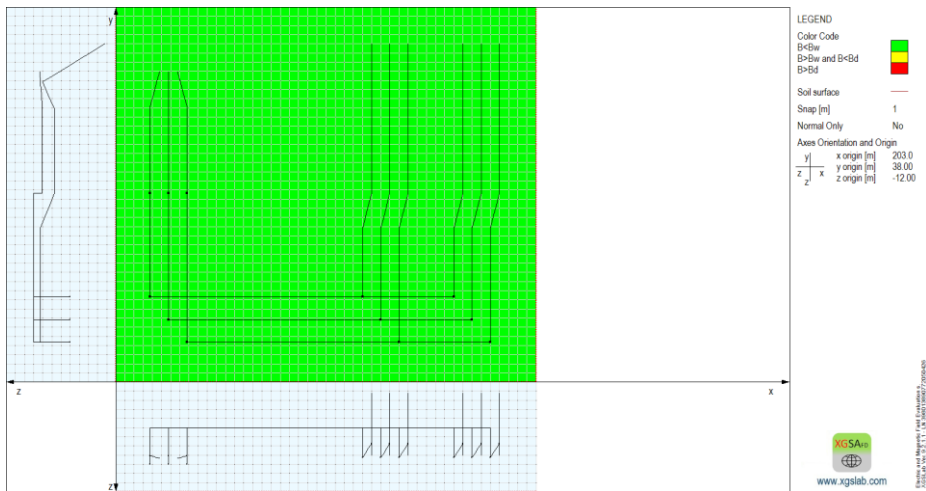


Slika 5.34. Konturni prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju

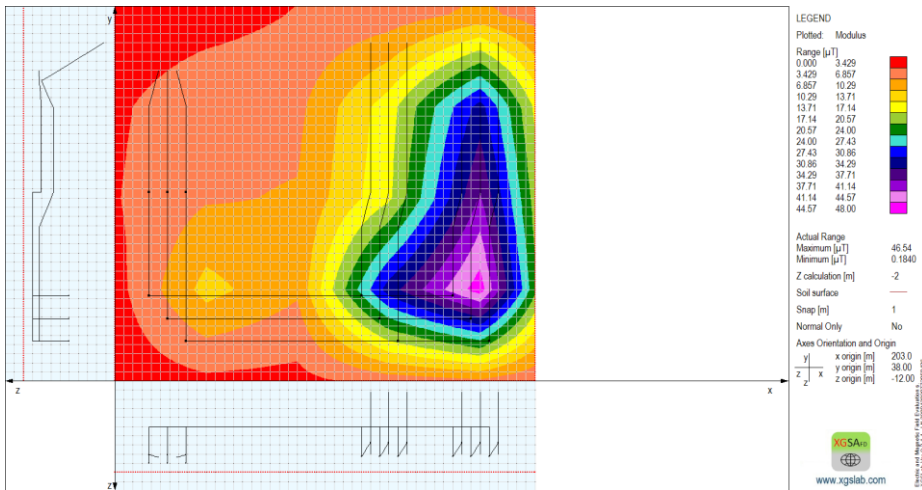


Slika 5.35. Linijski prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju

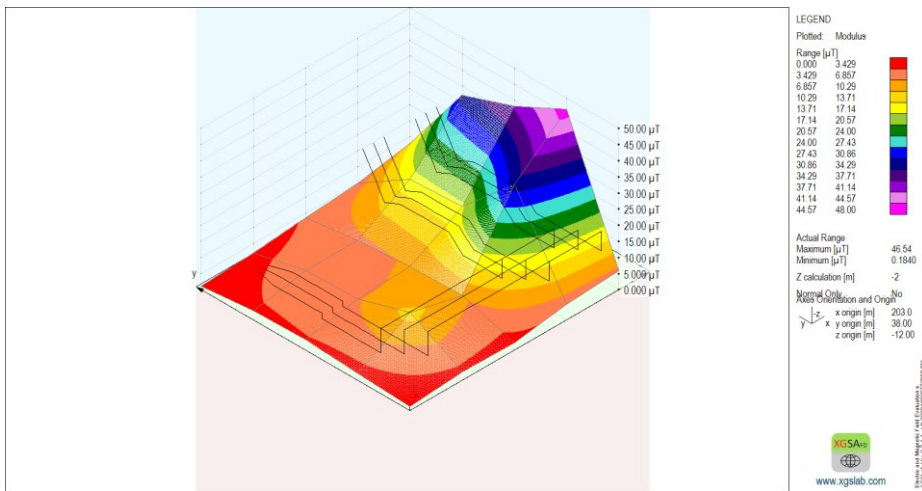
Primjećeno je da je najveća vrijednost gustoće magnetskog toka koja se pojavila u postrojenju 19,25  $\mu\text{T}$ , što je daleko manje od niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka koja iznosi 1000  $\mu\text{T}$ . Zbog toga se cijelo postrojenje smatra sigurnom zonom, što je vidljivo i na slici 5.36.



Slika 5.36. Prikaz sigurnih zona u postrojenju na visini 0 m

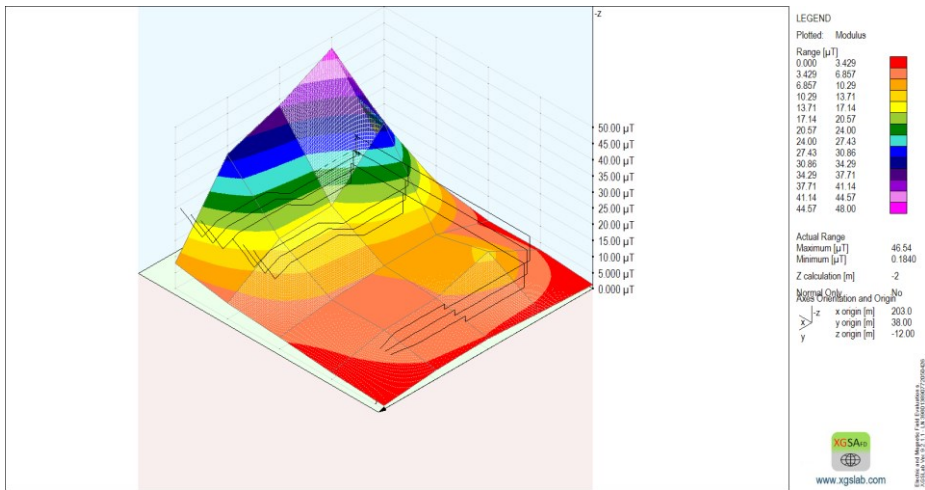


Slika 5.37. 2D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju na visini 2 m

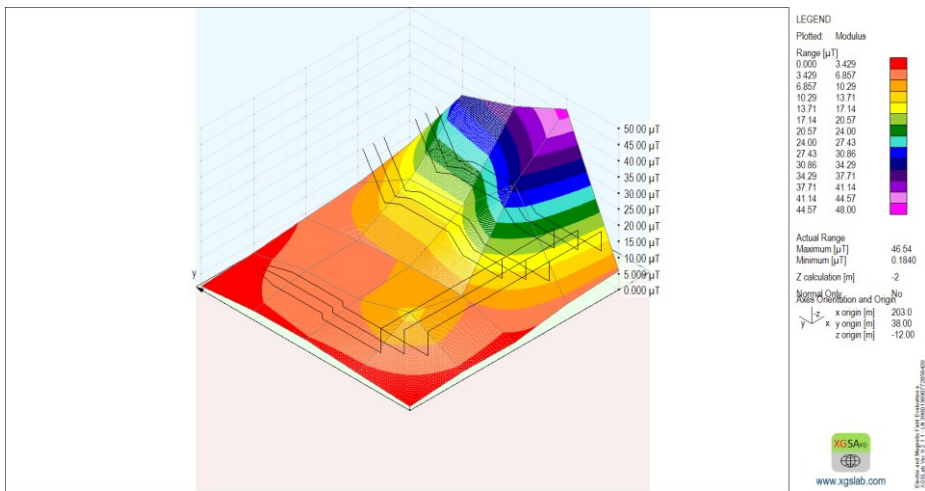


Slika 5.38. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s južne strane na visini 2 m

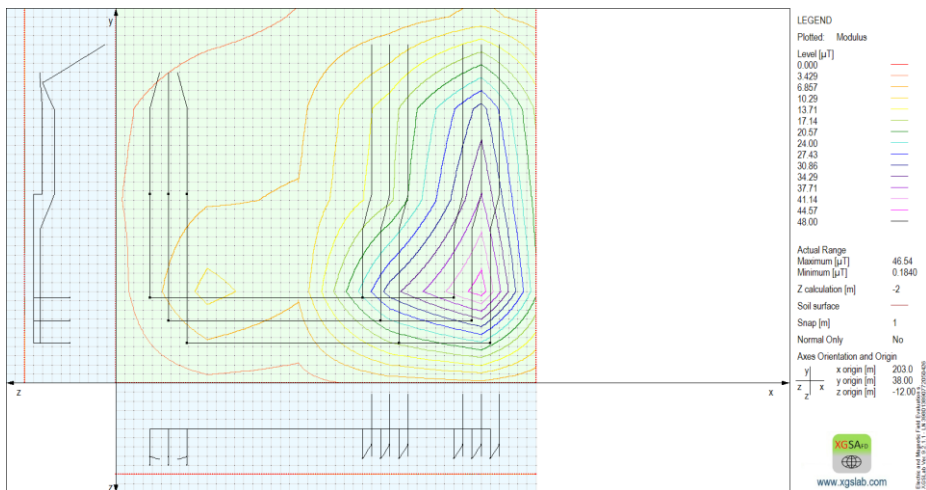




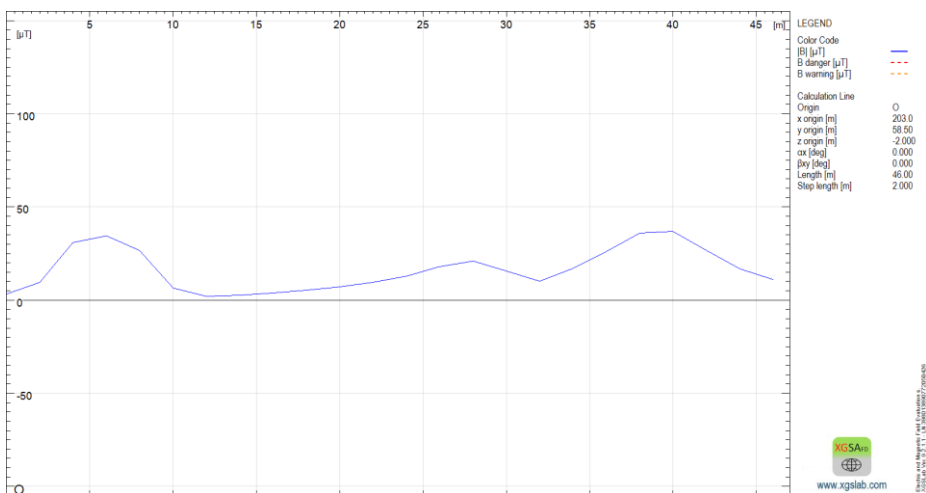
Slika 5.39. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju sa zapadne strane na visini 2m



Slika 5.40. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s istočne strane na visini 2 m



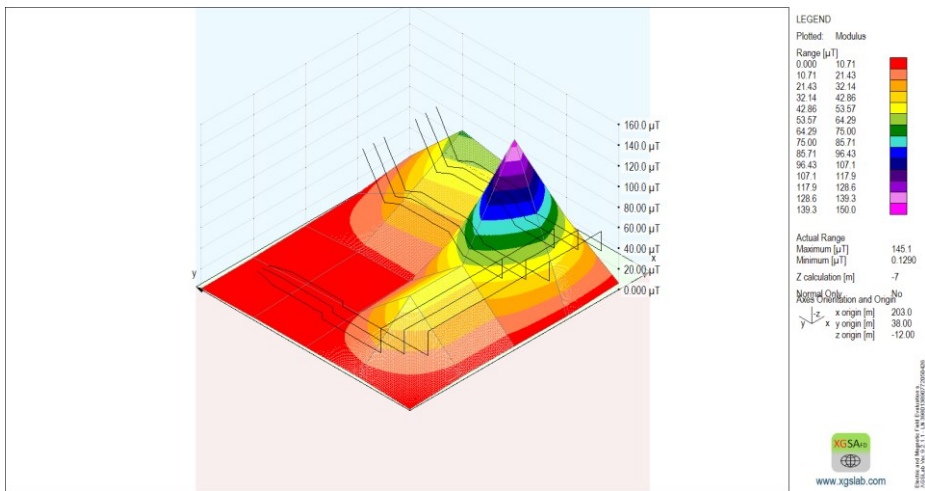
Slika 5.41. Konturni prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju na visini 2 m



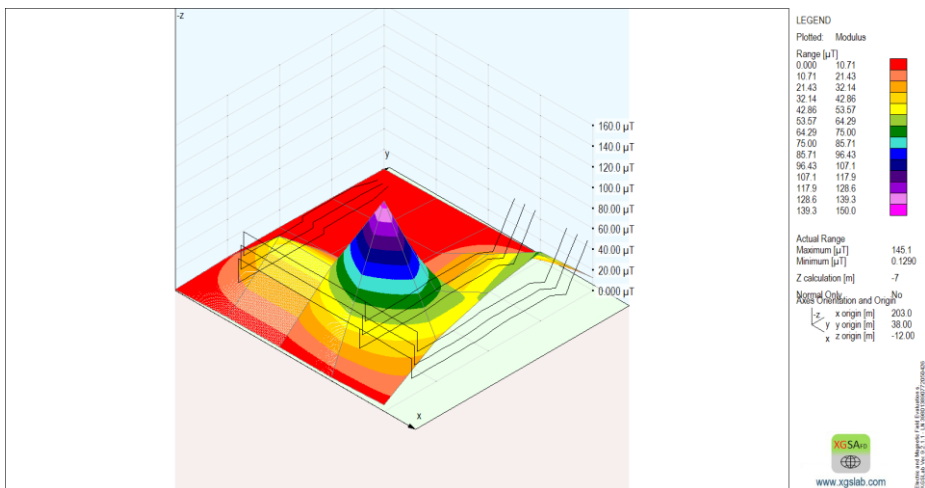
Slika 5.42. Linijski prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju na visini 2 m

Na visini od 2 m, najveća vrijednost gustoće magnetskog polja koja se pojavila je 46,54 µT, što je i dalje daleko ispod granice niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka. Cijelo

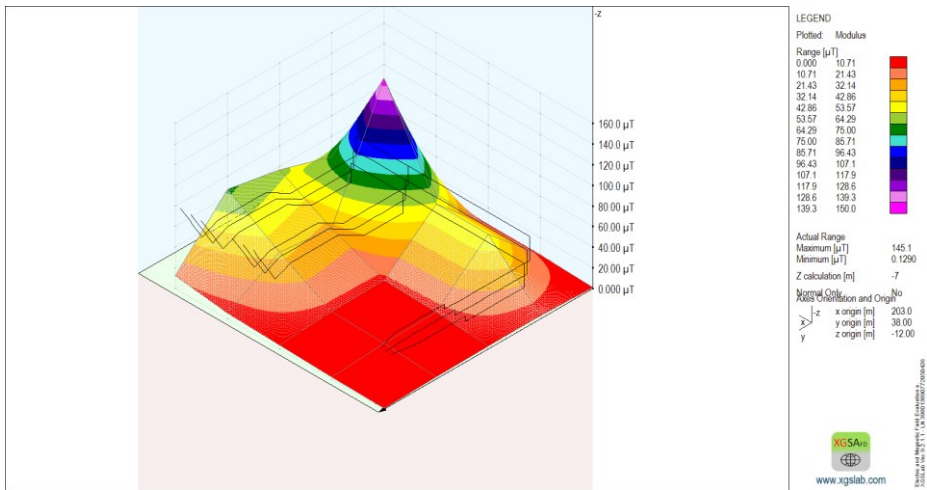
postrojenje je i dalje sigurna zona. Najveća vrijednost gustoće magnetskog toka se pojavljuje kod 2. vodnog polja jer tim dijelom postrojenja prolazi najveća struja.



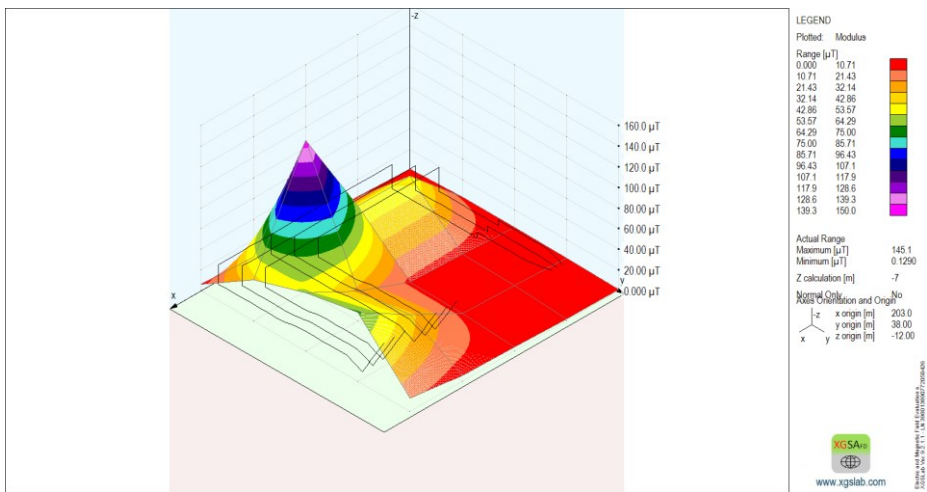
Slika 5.43. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju sa sjeverne strane na visini 2m



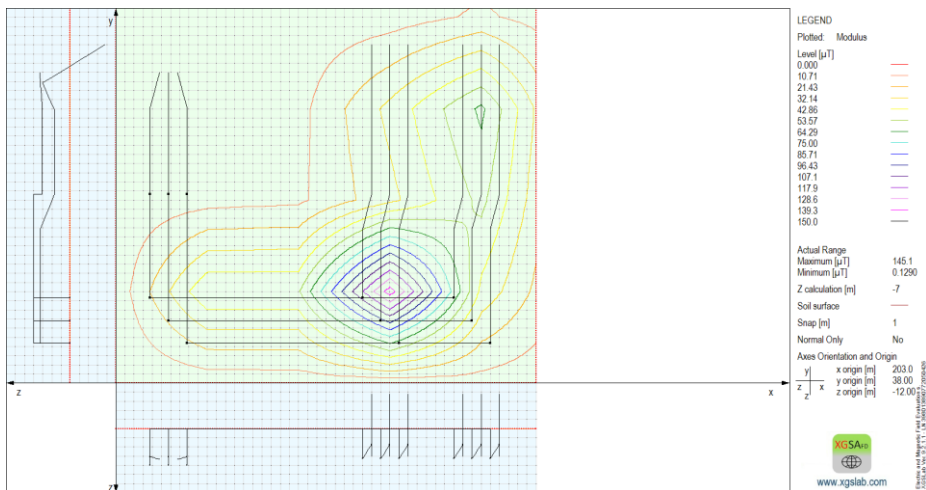
Slika 5.44. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s južne strane na visini 2m



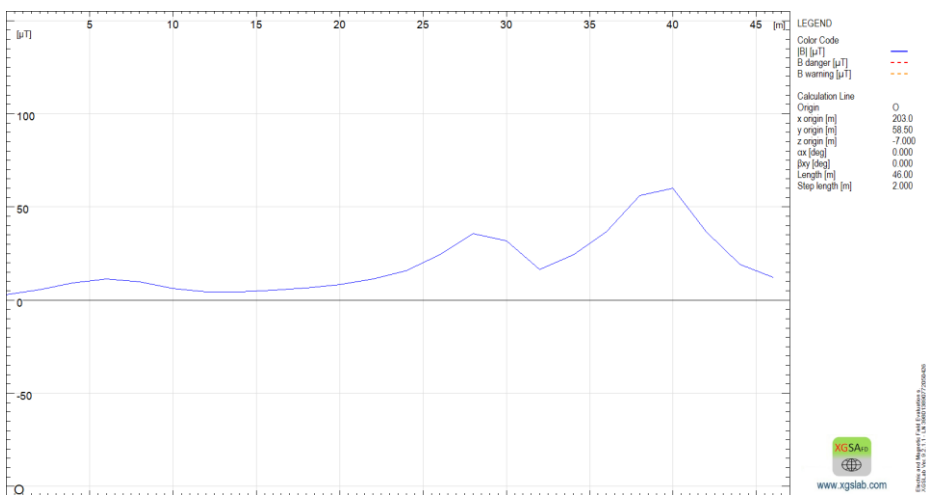
Slika 5.45. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju sa zapadne strane na visini 2m



Slika 5.46. 3D prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju s istočne strane na visini 2m



Slika 5.47. Konturni prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju na visini 2 m



Slika 5.48. Linijski prikaz raspodjele magnetskog polja u postrojenju na visini 2 m

Kao i u svim prethodnim slučajevima, i u ovom je vrijednost magnetskog polja ispod vrijednosti niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka te maksimalno iznosi 145,1  $\mu$ T. Najveća

vrijednost se pojavljuje iznad 2. vodnog polja zbog najveće struje, ali je cijelo postrojenje sigurno za ljude.

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon što je izrađen model visokonaponskog postrojenja 110 kV u programu XGSLab, odrađen je niz simulacija koje su simulirale normalne pogonske slučajeve kako bi bile određene vrijednosti jakosti električnog polja te gustoće magnetskog toka koje utječu na rad zaposlenika u takvim postrojenjima. Osim brojčanih vrijednosti, dobiven je i niz grafičkih prikaza koji zorno prikazuju raspodjelu električnog i magnetskog polja u postrojenju. Prije nego je izrađen model postrojenja, bilo je potrebno teorijski objasniti pojavu električnog i magnetskog polja. Osim toga, bilo je bitno tumačenje zakona i propisa koji se odnose na rad u visokonaponskom postrojenju te ograničenja koja su propisana kako bi dobiveni rezultati mogli biti uspoređeni. Zbog različitih visina vodiča u postrojenju, mijenjana je visina simulacije od razine tla (0 m), preko visine čovjeka (2 m) do visine na kojima se nalaze sabirnice (7 m). U prvom slučaju dobivena je maksimalna vrijednost jakosti električnog polja  $5397 \text{ V/m}$ , dok je maksimalna vrijednost gustoće magnetskog toka bila  $19,25 \text{ }\mu\text{T}$ . Kako nijedna veličina nije prelazila nisku vrijednost upozorenja, zaključeno je da je postrojenje u potpunosti sigurno u razini tla. Promjenom visine na 2 m, maksimalna vrijednost jakosti električnog polja je bila  $11540 \text{ V/m}$ , a maksimalna vrijednost gustoće magnetskog toka  $46,54 \text{ }\mu\text{T}$ . Iako gustoća magnetskog toka nije prelazila vrijednost niske vrijednosti upozorenja, jakost električnog polja je prelazila iznos od  $10000 \text{ V/m}$  što je bila granica niske vrijednosti upozorenja. Zaključeno je da postoji dio postrojenja ispod 2. vodnog polja koje nije u potpunosti sigurno za ljude te na to treba obratiti pozornost. Naposljetku je promijenjena visina simulacije na 7 m od tla. Budući da s sabirnice smještene na toj visini, maksimalna vrijednost jakosti električnog polja je bila  $29070 \text{ V/m}$  te je prelazila visoku vrijednost upozorenja i nesigurna je za radnike, ali radnici se ne penju na takvu visina kada je dio postrojenja pod naponom, osim u slučajevima primjene metode rada pod naponom kada radnici moraju voditi računa o pripadnim zaštitnim odijelima. Maksimalna vrijednost gustoće magnetskog toka je  $145,1 \text{ }\mu\text{T}$  i ne prelazi nisku vrijednost upozorenja. U sva tri slučaja maksimalna vrijednost gustoće magnetskog toka se pojavila kod 2. vodnog polja jer je ono bilo opterećeno najvećom strujom. Zahvaljujući programu XGSLab, moguće je simulirati bilo koje pogonsko stanje visokonaponskog postrojenja, neovisno o iznosu napona i struja, te na taj način utvrditi područja u postrojenju koja su sigurna za radnike.

## **7. SAŽETAK**

U uvodnom dijelu diplomskog rada opisan je zadatak diplomskog rada, vrijednosti koje su se analizirale te model postrojenja potreban za simulaciju. U drugom poglavlju prikazana je literatura koja je korištena za teorijsko proučavanje električnog i magnetskog polja. U trećem poglavlju kratko je opisano električno polje i magnetsko polje. U četvrtom poglavlju protumačeni su zakoni i propisi iz kojih su definirane vrijednosti upozorenja i opasnosti koje su bitne za rad u visokonaponskom postrojenju. U petom poglavlju je opisan model postrojenja koji je izrađen u programu XGSLab. Rezultati simulacija koje su odrađene u navedenom programu su prikazani tekstualno i grafički te nakon svakog slučaja prokomentirani. U šestom poglavlju su kratko iznesena mišljenja o sigurnosti u visokonaponskom postrojenju i ovisnosti o jakosti električnog polja i gustoći magnetskog toka.

Ključne riječi: električno polje, magnetsko polje, raspodjela polja, visokonaponsko postrojenje



## **8. ABSTRACT**

The introductory part of the thesis describes the task of the thesis, the values that were analyzed and the plant model required for the simulation. The second chapter presents the literature used for the theoretical study of the electric and magnetic fields and the laws and regulations related to their limitations. The third chapter briefly describes the electric and the magnetic field. The fourth chapter explains the law and regulations from which the values of warnings and hazards that are important for operation in a high-voltage plant are defined. The fifth describes the plant model developed in the XGSLab program. The results of the simulations we performed in the mentioned program are presented textually and graphically and commented on after each case. In the sixth chapter, opinions on safety in a high-voltage plant and dependence on electric field strength and magnetic flux density are briefly presented.

Keywords: electric field, magnetic field, field distribution, high-voltage plant

## 9. LITERATURA

- [1] B. Kuzmanović, *Osnove elektrotehnike I*, 4. izdanje. Element, Zagreb, Menčetićeva 2, 2012.
- [2] J. F. White, "Electromagnetic Fields and Waves," in *High Frequency Techniques*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp. 183–306.
- [3] Edutorij, "Električno polje." [Online]. Available: [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). [Accessed: 13-Aug-2020].
- [4] Wikipedia, "Magnetsko polje." [Online]. Available: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetsko\\_polje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetsko_polje). [Accessed: 13-Aug-2020].
- [5] prim. S. V. Dr.med.dent., "Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja," vol. 2014, 2020.
- [6] D. med. doc.dr.sc. Dario Nakić, "Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja," vol. 2016, no. 1, 2016.
- [7] D. med. prof.dr.sc. Milan Kujundžić, "Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja," vol. 2019, 2019.
- [8] SINT Srl, "X GS Lab™." .

## 10. ŽIVOTOPIS

Antun Lovas je rođen u Osijeku 31. prosinca 1993. godine. Nakon završene Osnovne škole Josipa Kozarca u Semeljcima upisuje srednju Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku gdje nakon četiri godine srednjoškolskog školovanja stječe zvanje Elektrotehničar. Svoje školovanje nastavlja 2012. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku (današnji Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija) na kojem upisuje sveučilišni Preddiplomski studij elektrotehnike te se opredjeljuje za smjer Elektroenergetika. 2018. godine stječe naziv univ.bacc.ing te upisuje Diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Elektroenergetski sustavi.