

# IZRAČUN EMS V OKOLICI DALJNOVODOV

**Prof.dr. Mladen Trlep,**

**Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru**

## I. ELEKTROMAGNETNO POLJE V OKOLICI DALJNOVODA

Ko skozi enega ali več vodnikov v zraku, ki so priključeni na izmenično napetost  $U$ , frekvence  $f$  tečejo izmenični tokovi  $I$ , se v okolici vodnikov (teoretično do neskončnosti) pojavi elektromagnetno sevanje (EMS). V primeru omrežne frekvence 50Hz govorimo o EMS ekstremno nizkih frekvenc. Problem EMS lahko v tem primeru obravnavamo kot problem kvazistatičnega polja, kar poenostavi matematično obravnavo problema. Tako EMS obravnavamo ločeno za električno polje (EP) in magnetno polje (MP).

Ker EP in MP ne moremo videti, temveč ju lahko zaznamo le posredno preko delovanja sile na naelektrene delce, je zelo pomembno vprašanje, kako kljub temu prikazati te polji.

V nadaljevanju bodo podani nekateri možni načini prikazovanja EMP. Pri tem se moramo zavedati, da gre za grafično prikazovanje dejansko nevidnega EMP, ki bazira na tem, da prikazujemo skalarne ali vektorske veličine polja. EMP lahko prikazujemo v prostoru (3D) ali v karakteristični ravnini (2D). Ker je 3D prikazovanje EMP velikokrat nepregledno in zahteva močnejšo grafično podporo, se običajno EMP prikazuje v karakteristični ravnini. Takšno prikazovanje bo v nadaljevanju tudi uporabljeno, pri čemer bo karakteristična ravnina definirana z **x-y ravnino** v kartezijskem koordinatnem sistemu. V nadaljevanju se vsi prikazi nanašajo na primer vodnika, ki se nahaja na višini  $h$  paralelno z zemljo. Vodnik je priključen na napetost  $U$ , skozi vodnik pa teče tok  $I$ .

## II. Izračun EMP v okolici daljnovodov

Ko merimo ali računamo EMP v okolici daljnovoda ugotovimo, da se EMP spreminja tako v smeri prečno na vodnike (ravnina x-y), kot tudi v smeri paralelno z vodniki (v smeri koordinate z). V smeri vodnikov se EMP spreminja, ker so vodniki pritrjeni na nosilne stebre in ker se med dvema stebroma spreminja oddaljenost vodnikov do zemlje.

To seveda pomeni, da bi morali obravnavati problem v prostoru (3D problem) in računati odvisnost od x,y,z koordinate. Pri tem lahko enostavno ugotovimo, da je EMP polje največje v ravnini, ki je pravokotna na vodniki in to pri največjem povesu vodnikov. Ker pri obravnavi vpliva EMP vedno iščemo področje največjih vrednosti EMP in te primerjamo z dovoljenimi vrednostmi polja, bi bilo dovolj izračunati polje samo v tej ravnini. Čeprav je seveda možno izračunati EMP v celotnem prostoru, pa je glede na povedano dovolj informativen tudi izračun samo v ravnini, ki seka vodnike pri največjem povesu in je pravokotna na vodnike. Tako lahko 3D izračun EMP prevedemo na 2D izračun v ravnini x-y, ki je seveda enostavnejši in hitrejši kot 3D izračun, predstavlja pa določeno poenostavitev problema. Pri takšnem izračunu je namreč privzeto, da so vodniki, ki potekajo v z-osi, cel čas na enaki višini. Ker računamo v točki največjega povesa to pomeni, da vodniki potekajo paralelno z zemljo in so na višini, ki je enaka višini v točki največjega povesa. Takšen izračun nam prinese nekoliko večje vrednosti od dejanskih, kar pa ni problematično, saj se pri analizi vpliva EMP na okolje osredotočimo le na maksimalne vrednosti polja. To z drugimi besedami pomeni, če so

izračunane vrednosti manjše od dovoljenih je izračun popolnoma sprejemljiv, v primerih približno enakih izračunanih in dovoljenih vrednosti, pa je potreben natančnejši 3D izračun, da se dobi merodajen odgovor.

EMP lahko izračunamo na različne načine, ki dajejo bolj ali manj natančne rezultate. V tehnični publikaciji CIGRE [L5] je predpisan matematični postopek za izračun EMP v okolici daljnovoda, ki pa je verodostojen oz. uporaben samo v idealnem primeru vodnika/vodnikov nad ravno podlago. V primeru, da želimo ovrednotiti vpliv okolja (prevodnih oz. magnetnih objektov v okolici, neravna podlaga, itd. ) pa omenjeni postopek praktično ni uporaben. Mnogo bolj so uporabne nekatere numerične metode med katerimi izstopa **metoda končnih elementov** (MKE). Ta metoda, zaradi svoje univerzalnosti, omogoča izračun EMP tudi v omenjenih primerih, ko analitična metoda odpove. Pri tem je možen tako 2D kot 3D izračun. V nadaljevanju prikazani rezultati EMP v okolici daljnovodov, so vsi dobljeni z 2D izračunom s pomočjo MKE. Časovno je MKE, za v nadaljevanju prikazane primere, popolnoma primerljiva z analitično metodo, ima pa to prednost, da dobimo rešitev praktično v vsaki točki ravnine, kjer polje računamo. To nam v nadaljevanju nudi kakovostnejšo grafično prikazovanje rezultatov, kar je v takšnih primerih nujno potrebno.

V Sloveniji se pri prenosu električne energije uporabljajo različne oblike daljnovodov (npr. jelka, portal, sod, donau, ipsilon) in različni napetostni nivoji, pri čemer so s strani vpliva EMP na okolje, najbolj zanimivi 110kV, 220kV in 400kV daljnovodi. V nadaljevanju bodo prikazani rezultati izračuna EMP v okolici daljnovodov, za podatke (geometrijo, napetost in tok) pridobljene iz obstoječe literature. Vsi izračuni so narejeni s pomočjo programskega paketa POLJE [L4], ki uporablja za izračun EMP t.i. metodo končnih elementov. Izračun je bil narejen za prečno ravnino na vodnike ob predpostavki, da so vodniki paralelno za zemljo, kar je omogočilo 2D izračun. Zaradi tega lahko predpostavimo, so izračunane vrednosti EMP nekoliko višje, kot so realne vrednosti.

Pri tem pa je potrebno še enkrat poudariti, da je možno z MKE izračunati tudi 3D problem ob upoštevanju:

- **realnega povesa vodnikov,**
- **prisotnih prevodnih in/ali magnetnih objektov v bližini doljnovoda,**
- **poljubne strukture oz. oblike površine zemlje,**

kar ni možno z analitičnim pristopom, niti tako natančno s kakšno drugo numerično metodo. Edino kar zahteva takšen pristop je daljši čas pri pripravi podatkov in nekoliko daljši čas izračuna. Vendar se je smiselno odločati za 3D izračun le v kakšnih zelo mejnih primerih ali pa ko je vpliv EMP na okolico lahko zelo odvisen od geometrije okoliških objektov, oblike površine zemlje in podobno. V vseh ostalih primerih, pa je dovolj natančen 2D izračun, ki tudi omogoča določeno upoštevanje oblike površine zemlje, okoliških objektov in podobno.

## **2D izračun EMP**

V nadaljevanju je analizirano EMP v okolici karakterističnih daljnovodov, v primeru ravne površine zemlje in brez upoštevanja vplivov okoliških objektov. Ti daljnovodi so: **jelka, portal, sod, ipsilon.**

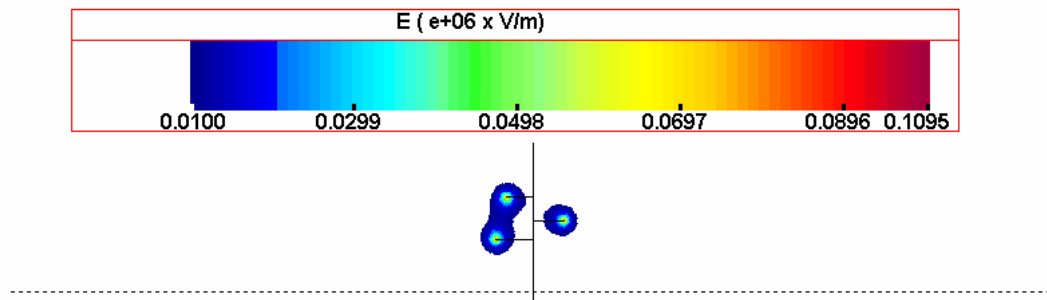
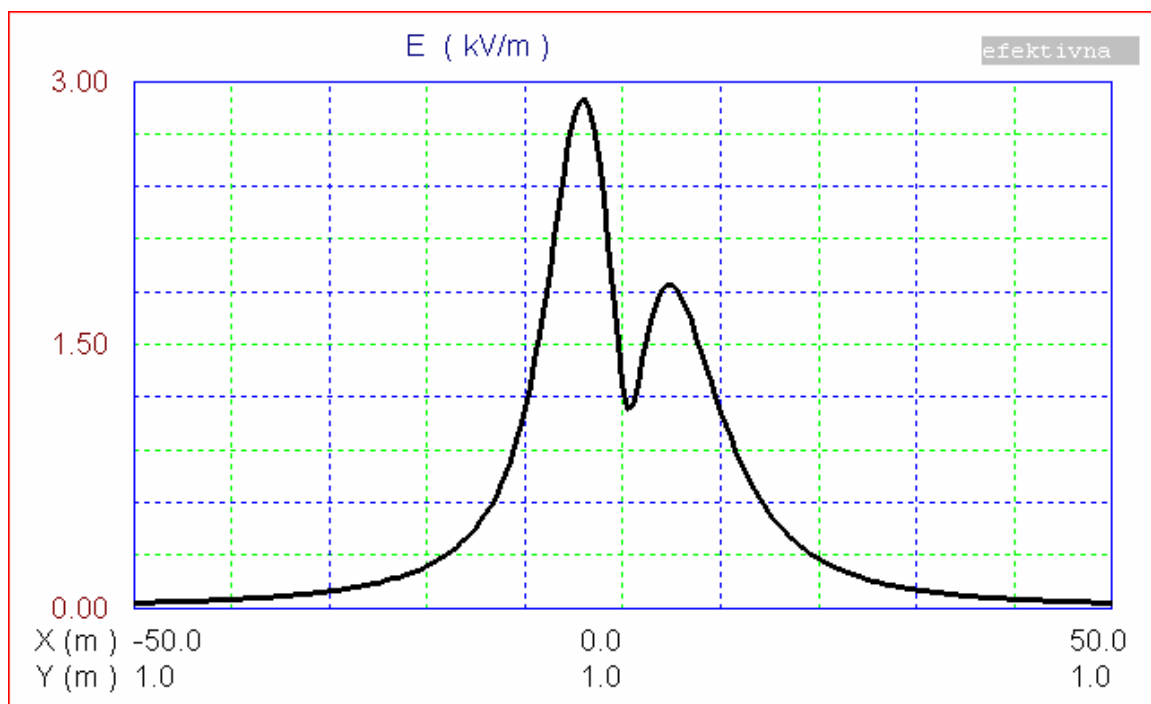
EMP je izračunano pri naslednjih efektivnih vrednostih medfazne napetosti oz. faznih tokov, ter pri priporočenih minimalnih razdaljah spodnjega vodnika daljnovoda od nivoja zemlje.

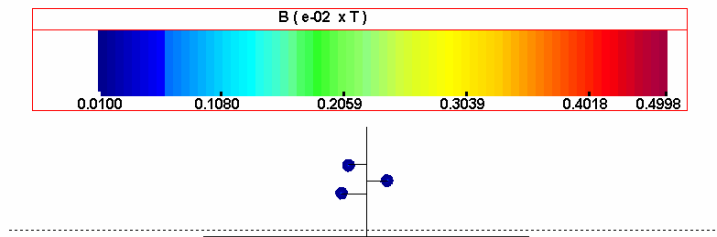
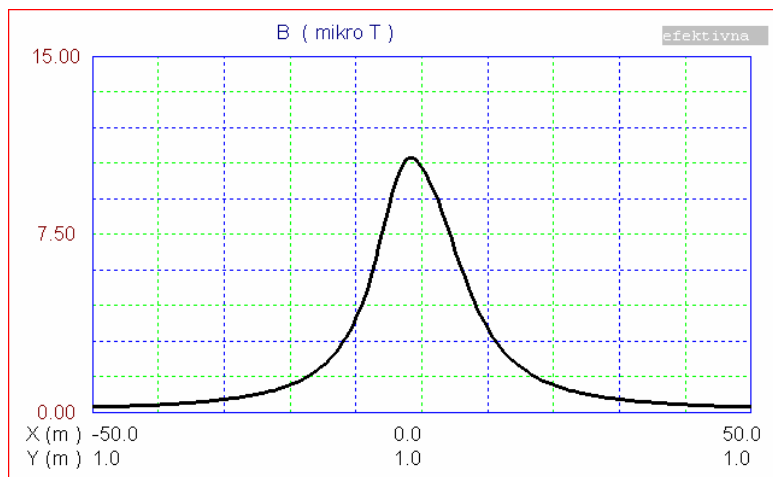
VN daljnovod	Medfazna efektivna napetost pri izračunu (kV)	Efektivni fazni tok pri izračunu (A)	Razdalja spodnjega vodnika do zemlje
110 kV	<b>121</b>	<b>400</b>	<b>6</b>
400 kV	<b>415</b>	<b>1600</b>	<b>8</b>

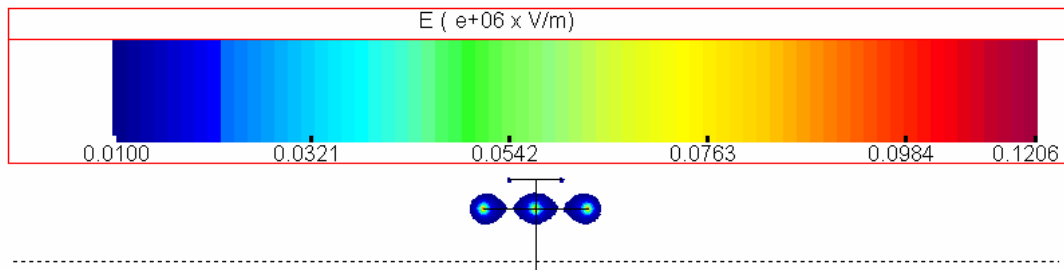
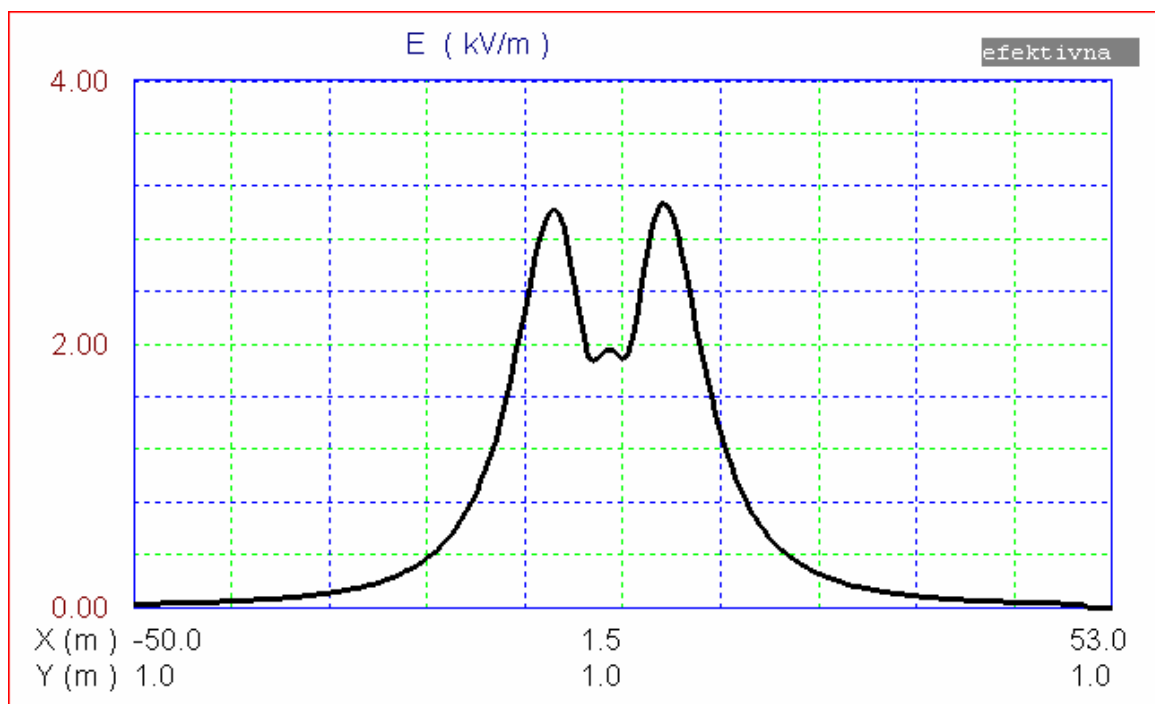
Za vsak daljnovod so prikazane štiri slike:

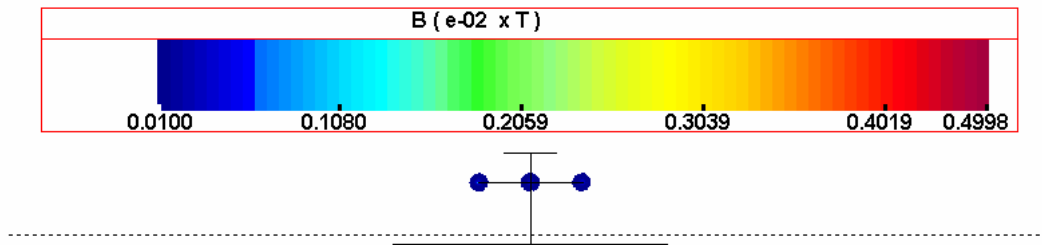
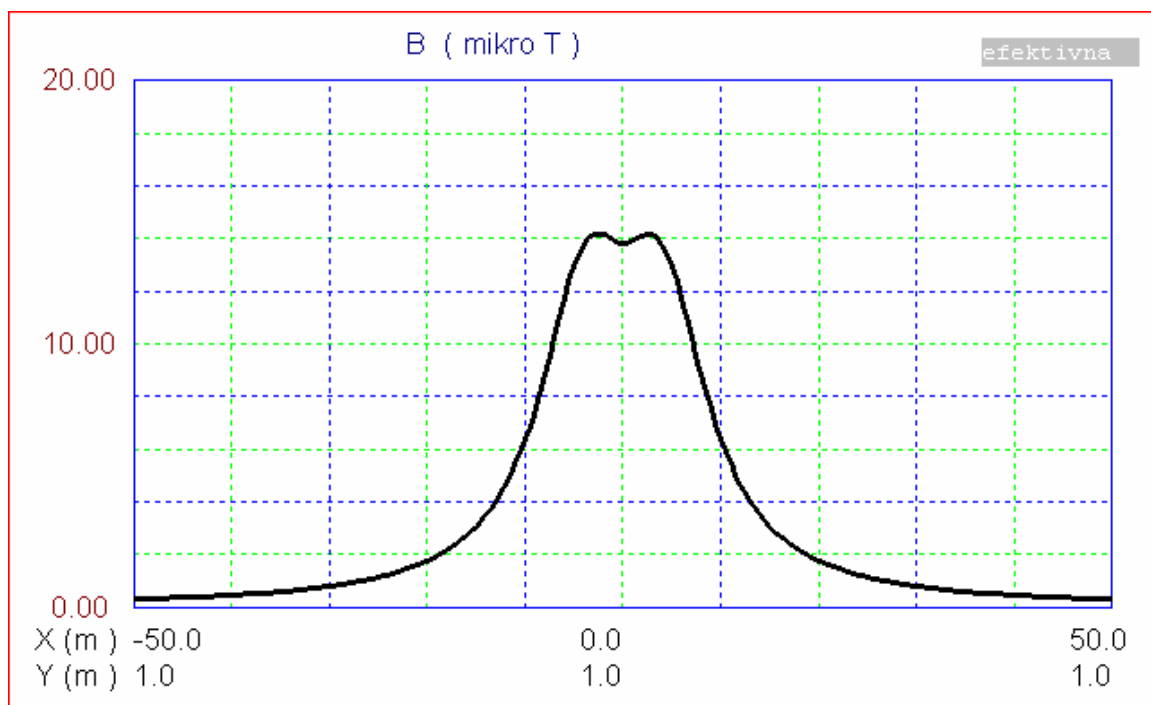
1. barvna slika efektivne vrednosti  $E$ , v področju karakteristične ravnine, kjer  $E$  presega dovoljeno vrednost, ki je enaka 10 kV/m,
2. graf efektivne vrednosti  $E$ , na liniji 1m nad zemljo,
3. barvna slika efektivne vrednosti  $B$ , v področju karakteristične ravnine, kjer  $E$  presega dovoljeno vrednost, ki je enaka 100  $\mu$ T,
4. graf efektivne vrednosti  $B$ , na liniji 1m nad zemljo.

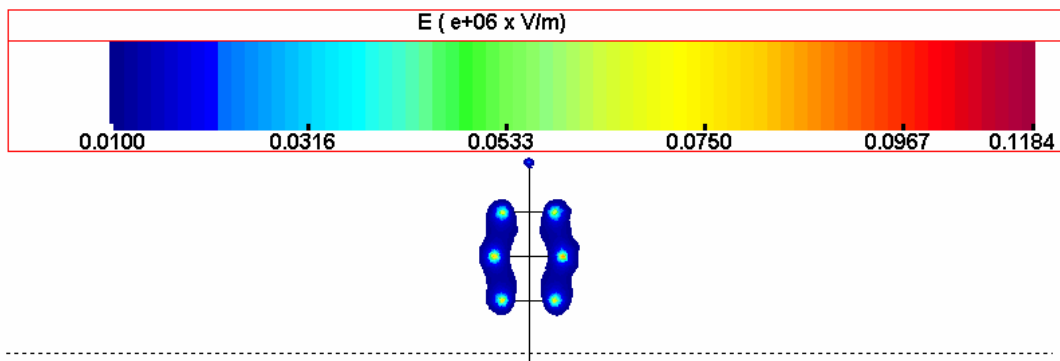
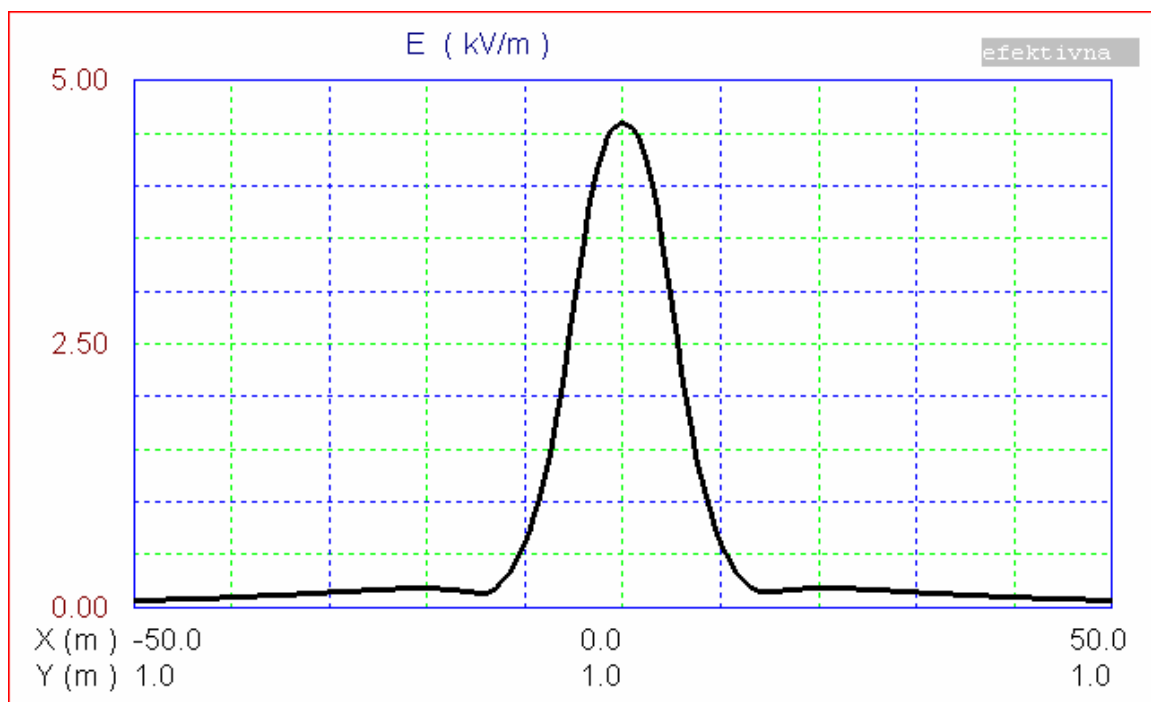
Na barvnih slikah (1. in 4.) efektivne vrednosti  $E$  oz.  $B$  je narisana tudi črta na višini 1m nad zemljo. Ta nam omogoča, da ocenimo ali EMP na višini 1m presega dovoljeno vrednost.

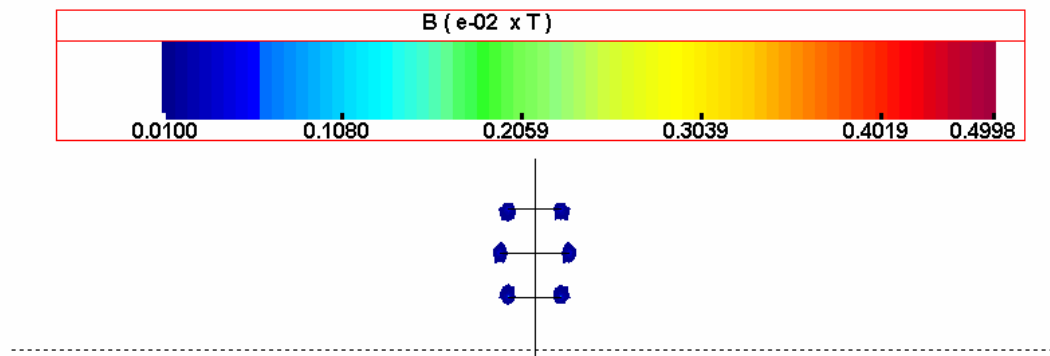
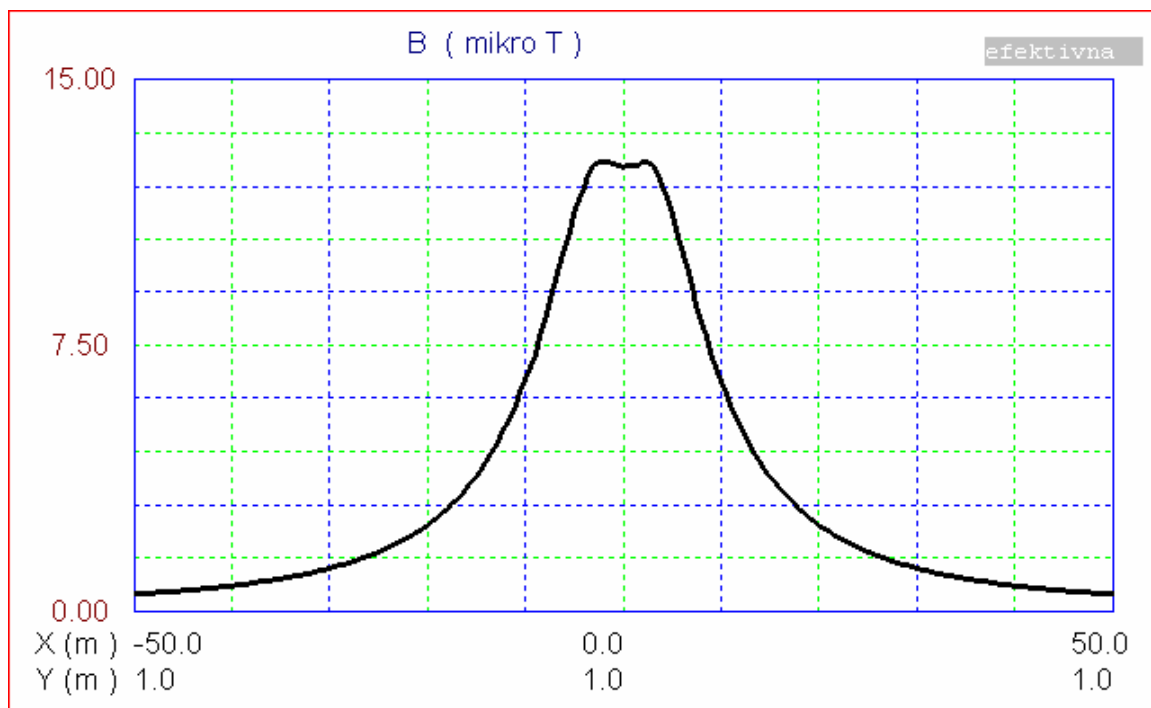
**JELKA 110 kV - električno polje**Slika 11: Izris efektivne vrednosti  $E$  večjih od 10kV/m .Slika 12: Graf efektivne vrednosti  $E$  na liniji 1m nad zemljo.

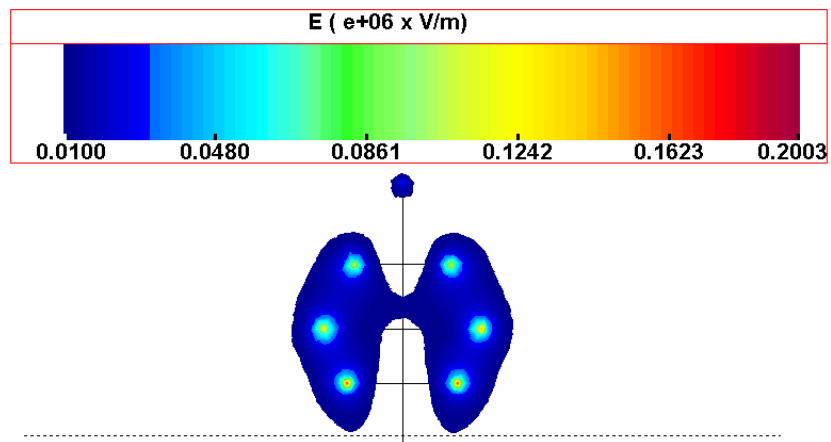
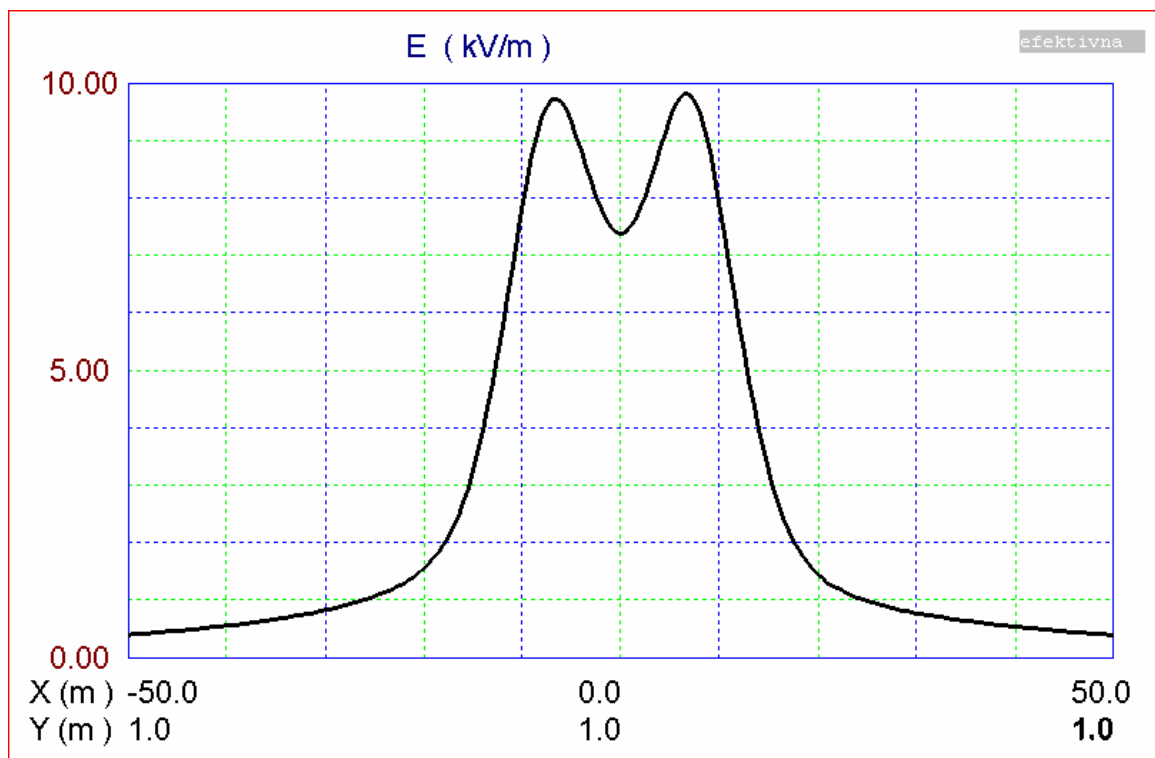
**JELKA 110 kV - magnetno polje**Slika 13: Izris efektivne vrednosti  $B$  večje od  $100 \mu\text{T}$ .Slika 14: Graf efektivne vrednosti  $B$  na liniji 1m nad zemljo.

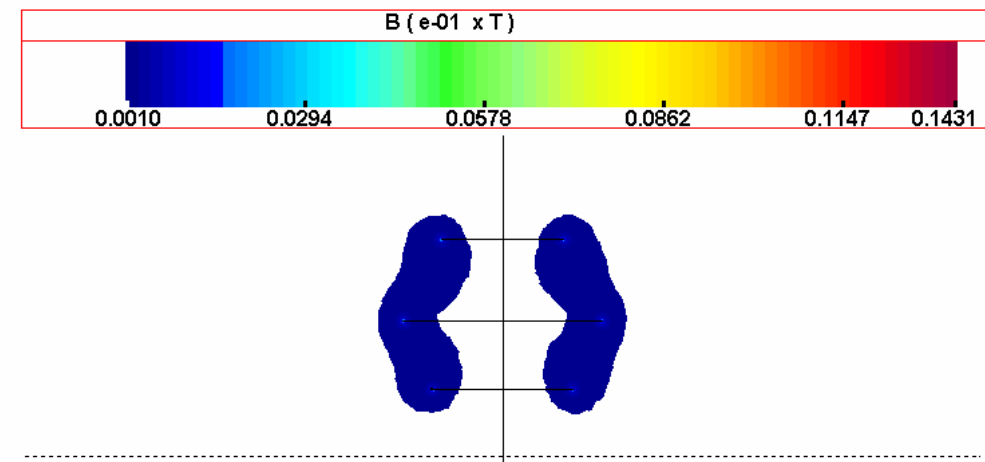
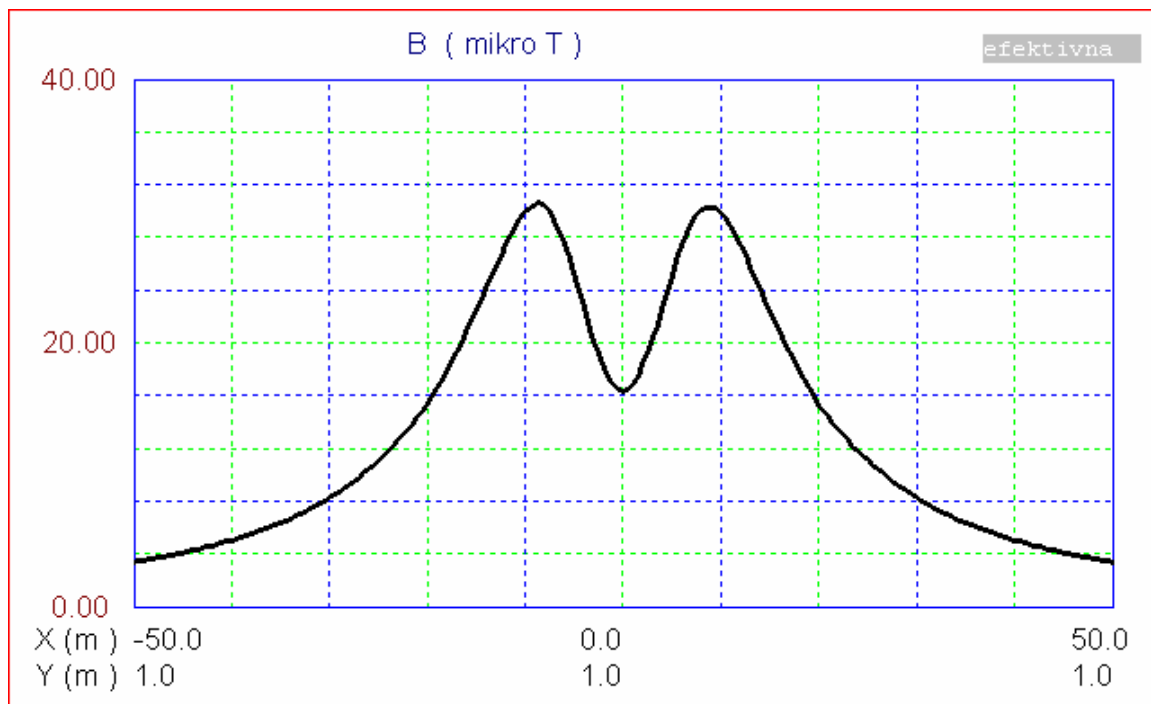
**PORTAL 110 kV - električno polje**Slika 15: Izris efektivne vrednosti  $E$  večjih od  $10\text{kV/m}$ .Slika 16: Graf efektivne vrednosti  $E$  na liniji 1m nad zemljo.

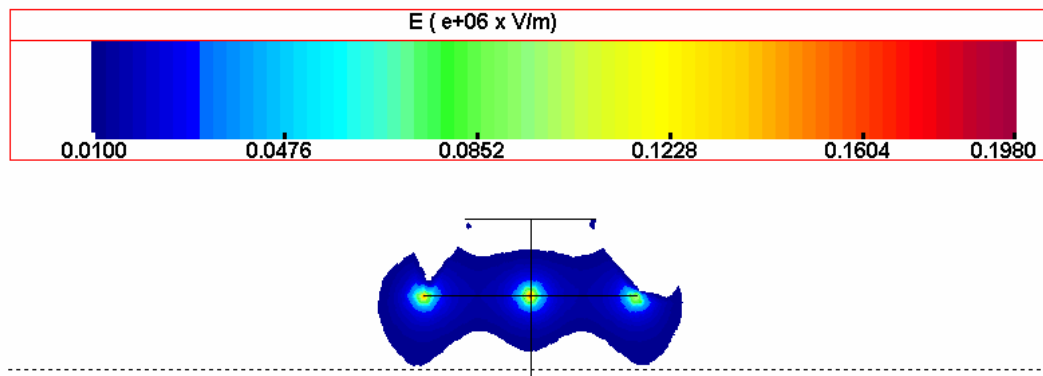
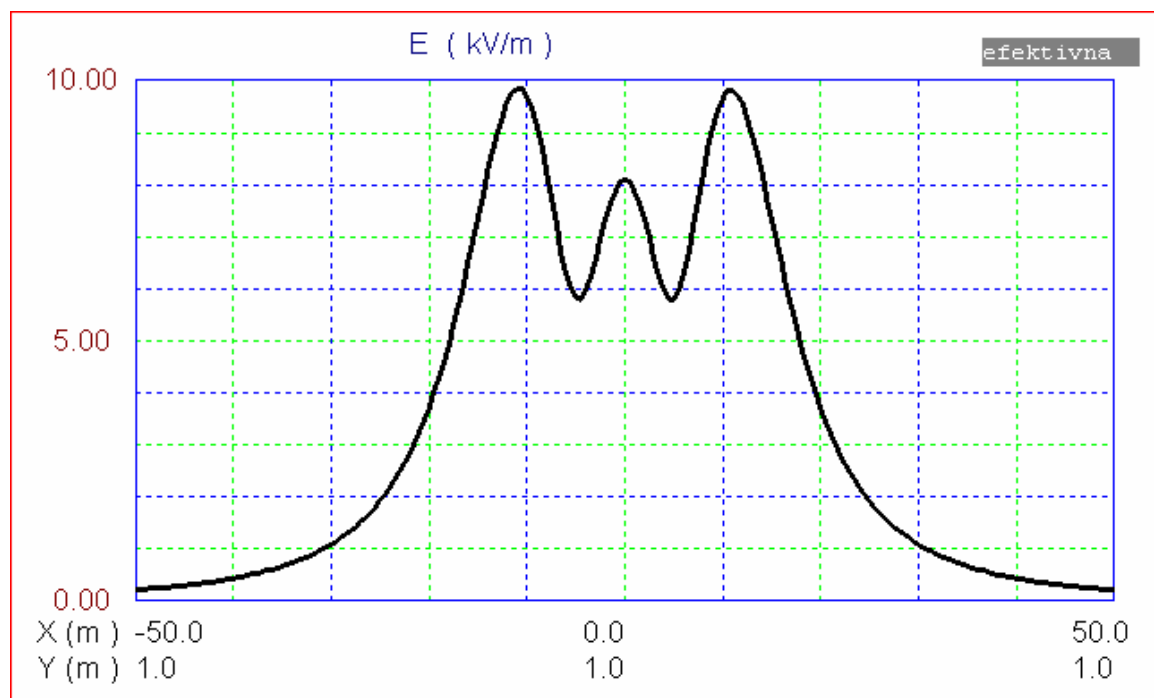
**PORTAL 110 kV - magnetno polje**Slika 17: Izris efektivne vrednosti  $B$  večje od  $100 \mu\text{T}$ .Slika 18: Graf efektivne vrednosti  $B$  na liniji 1m nad zemljo.

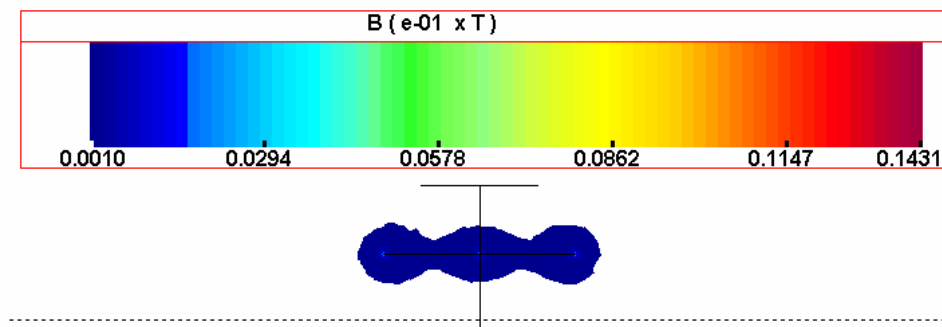
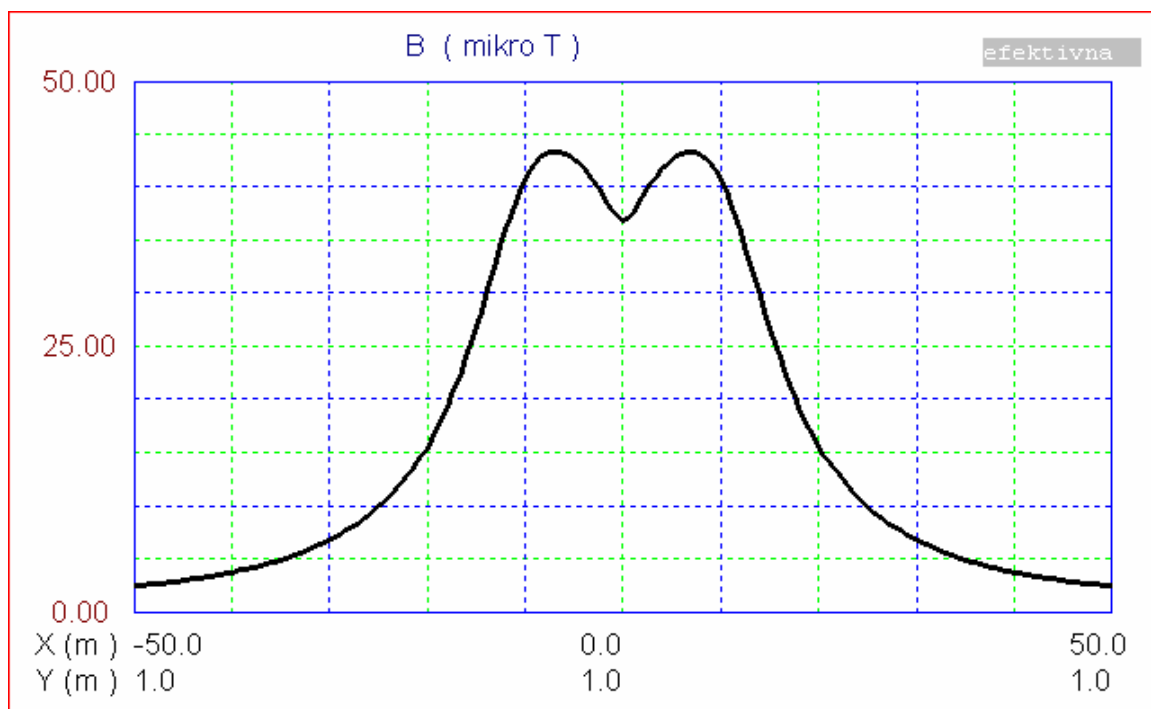
**SOD 110 kV - električno polje**Slika 19: Izris efektivne vrednosti  $E$  večjih od  $10 \text{ kV/m}$ .Slika 20: Graf efektivne vrednosti  $E$  na liniji 1m nad zemljo.

**SOD 110 kV - magnetno polje**Slika 21: Izris efektivne vrednosti  $B$  večje od  $100 \mu\text{T}$ .Slika 22: Graf efektivne vrednosti  $B$  na liniji 1m nad zemljo.

**SOD 400 kV - električno polje**Slika 21: Izris efektivne vrednosti  $E$  večjih od 10kV/m .Slika 22: Graf efektivne vrednosti  $E$  na liniji 1m nad zemljo.

**SOD 400 kV – magnetno polje**Slika 23: Izris efektivne vrednosti  $B$  večje od  $100 \mu\text{T}$ .Slika 24: Graf efektivne vrednosti  $B$  na liniji 1m nad zemljo.

**IPSILON 400 kV - električno polje**Slika 25: Izris efektivne vrednosti  $E$  večjih od  $10\text{kV/m}$ .Slika 26: Graf efektivne vrednosti  $E$  na liniji  $1\text{m}$  nad zemljo.

**IPSILON 400 kV – magnetno polje**Slika 27: Izris efektivne vrednosti  $B$  večje od  $100 \mu\text{T}$ .Slika 28: Graf efektivne vrednosti  $B$  na liniji 1m nad zemljo.

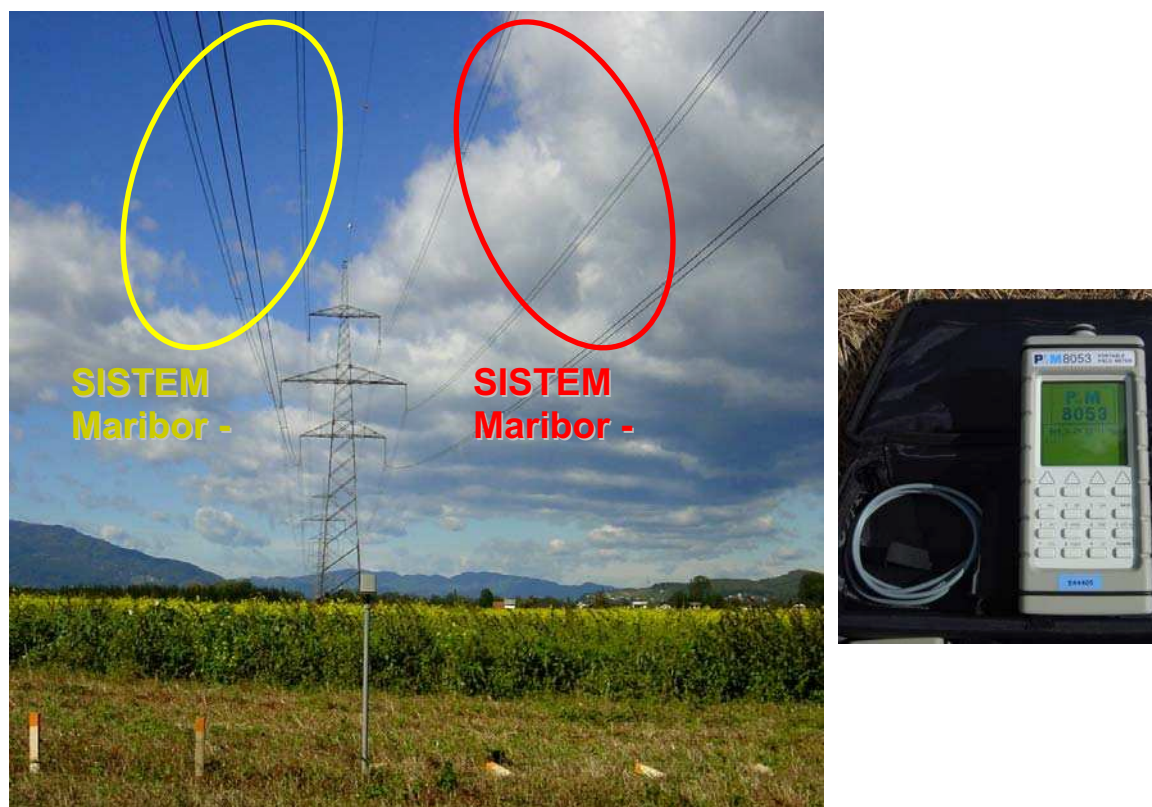
V primeru linearnih razmer, kar lahko praktično vedno privzamemo v obravnavanih primerih, je možno vse prikazane rezultate (pri napetosti  $U$  oz. toku  $I$ ) uporabiti tudi za analizo razmer pri drugačni obratovalni napetosti ( $U_x$ ) oz. toku ( $I_x$ ). Takrat je potrebno podane vrednosti :

- pri EP  $\phi$  ali  $E$  množiti z razmerjem  $U_x/U$

- pri MP *A* ali *B* množiti z razmerjem  $I_x/I$
- ### III. Meritve EMP pod daljnovodom

EMP pod daljnovodom lahko z ustreznim instrumenom tudi izmerimo. V nadaljevanju so prikazani rezultati meritve EMP pod dvosistemskim daljnovodom (Maribor-Podlog, Maribor-Krško) in primerjava izmerjenih in izračunanih vrednosti, kar je bilo opravljeno v okviru diplomske naloge "Analiza elektromagnetnega polja v okolici visokonapetostnih daljnovodov" (Rado Ferlič, mentor: M. Trlep)

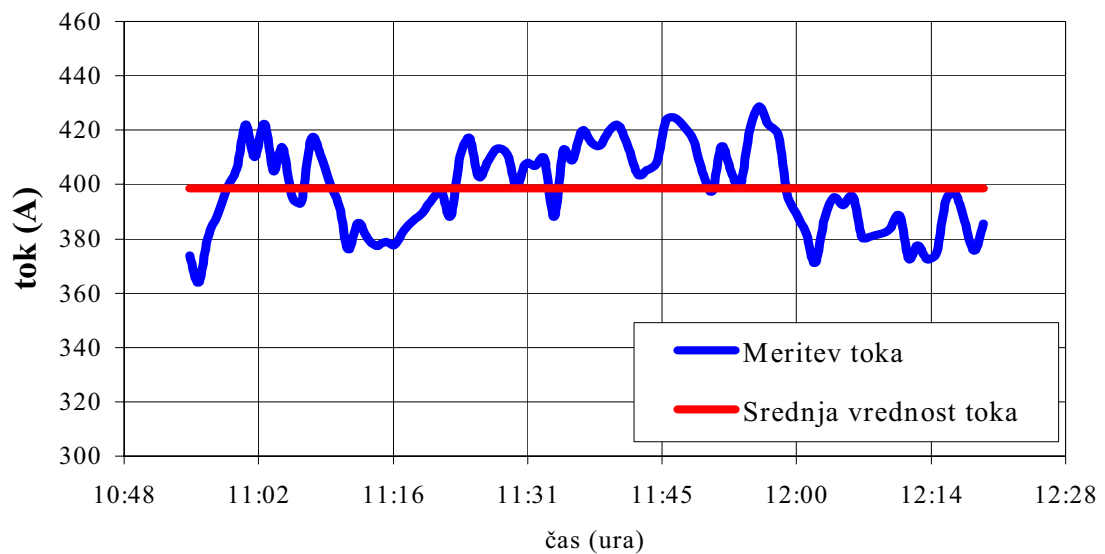
Meritev je bila opravljena na delu trase, slika 29, ki se zelo približa razmeram (poves vodnikov je največji; površina zemlje je ravna), ki so upoštevane pri izračunu EMP. Uporabljen je bil instrument PMM8053 s sondo EHP-50A, proizvajalca PMM.



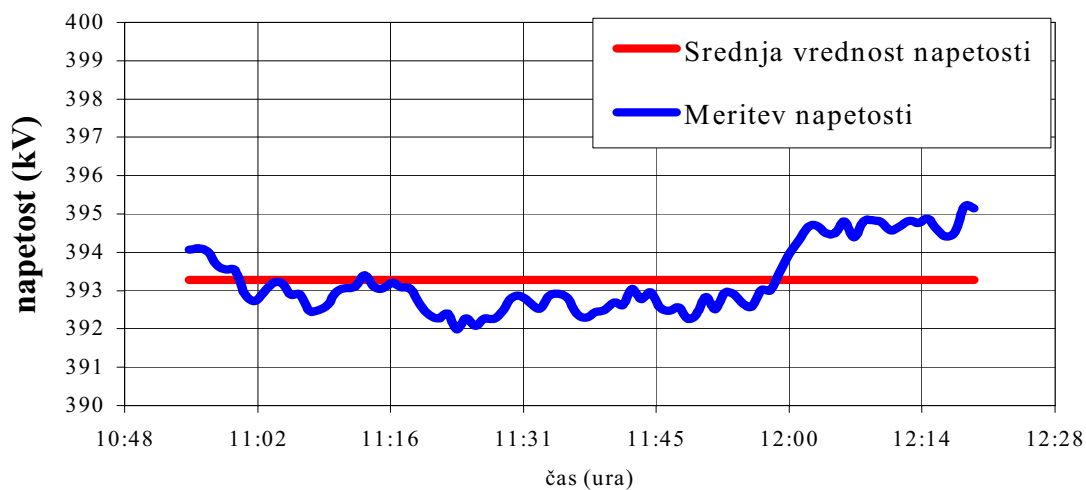
Slika 29: Slika področja pod daljnovodom, kjer je bila izvedena meritve EMP in slika uporabljenega instrumenta.

Ker smo hoteli istočasno tudi ovrednotiti verodostojnost rezultatov dobljenih z MKE, je bil opravljen za ta daljnovod tudi izračun EMP z MKE s programskim paketom POLJE [L4]. Zaradi korektnosti primerjave merjenih in izračunanih vrednosti je bilo potrebno upoštevati, da se med obratovanjem efektivna vrednost tako napetosti kot toka spreminja. Zaradi tega smo si pri pridobitvi za ustrezní časovni interval, ko se je meritev izvajala, tudi časovni potek efektivne vrednosti napetosti (slika 30) in toka (slika 31). V izračunu smo nato upoštevali srednjo vrednost efektivne vrednosti  $U$  in  $I$  in se tako približali realnim razmeram, ki so obstajale med meritvijo. Iz tega seveda

takoj izhaja, da to prinaša določeno napako v izračun oz. dodatno odstopanje med merilnimi in izračunanimi vrednostmi, ki ga ne moremo odstraniti.

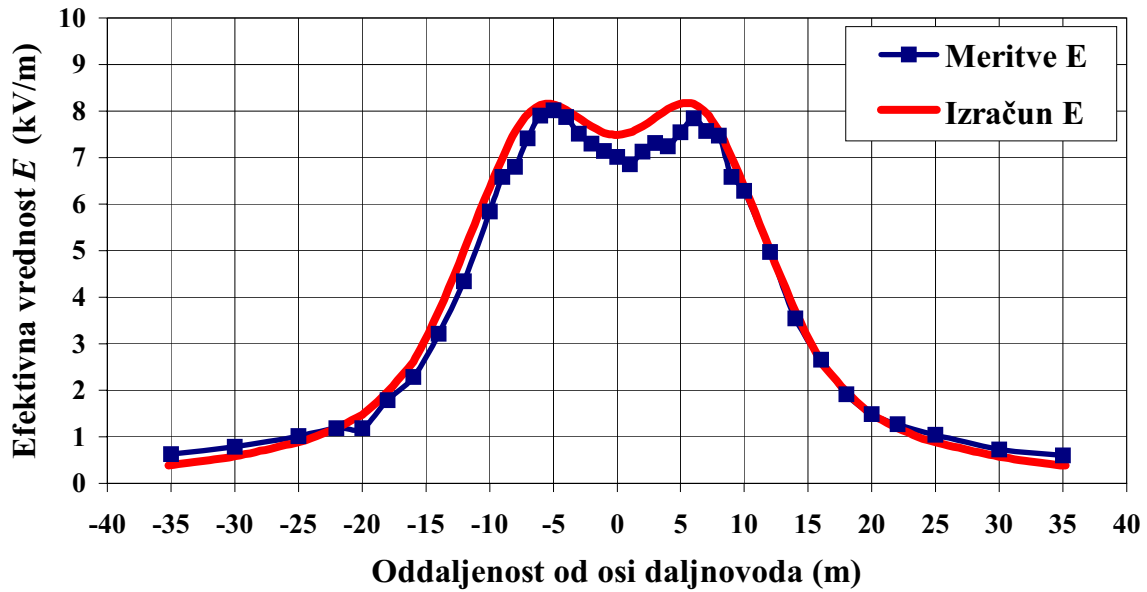


Slika 30: Časovno spreminjanje efektivne vrednosti toka med meritvijo EMP.

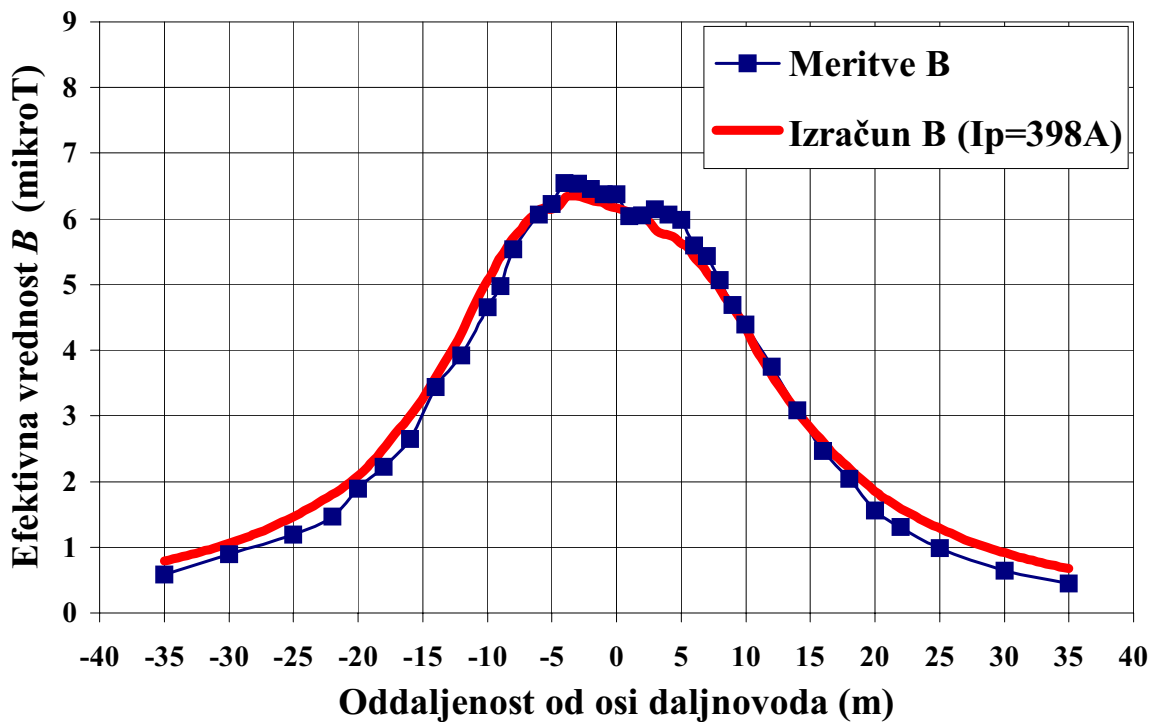


Slika 31: Časovno spreminjanje efektivne vrednosti toka med meritvijo EMP.

Primerjavi merilnih in izračunanih vrednosti  $E$  in  $B$  sta prikazani na naslednjih slikah.



Slika 32: Primerjava izmerjene in izračunane efektivne vrednosti  $E$ .



Slika 33: Primerjava izmerjene in izračunane efektivne vrednosti  $B$ .

Iz prikazane primerjavi na slikah 32 in 33 lahko ugotovimo, da je ujemanje izračunanih in merilnih vrednosti zadovoljivo in da nam prikazani računski postopek omogoča kvaliteten izračun EMP v okolici daljnovoda. To seveda pomeni, da nam uporaba takšnega orodje, omogoča realno simulacijo razmer v okolici daljnovoda in primerjavo različnih rešitev že v fazi projektiranja novih daljnovodov ali rekonstrukciji obstoječih, kar v nadaljevanju pomeni optimalno in cenejšo rešitev problema.

#### LITERATURA

1. Dragan Poljak: Human Exposure to Electromagnetic Fields, Wit Press, Southampton, Boston, 2004.
2. Rado Ferlič: Analiza elektromagnetnega polja v okolici visokonapetostnih daljnovodov, diplomsko delo (mentor: M. Trlep), FERI-Maribor, 2004.
3. Breda Cestnik: Električno in magnetno polje v okolju elektroenergetskih vodov, magistrska naloga (mentor: P. Žunko), FE-Ljubljana, 1999.
4. Mladen Trlep: Programski paket POLJE za izračun EMP z metodo končnih elementov, Laboratorij za aplikativno elektromagnetiko, FERI-Maribor.
5. CIGRE WG 36. 01: Electric and magnetic fields produced by transmission lines. Description of phenomena and practical guide for calculation. CIGRE, Technical Brochure 21, Paris, 1980.