



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI**



**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERIZAREA  
EXPUNERII UMANE LA CÂMPURI ELECTROMAGNETICE DE JOASĂ  
FRECVENȚĂ**

**Silviu-Constantin Vornicu**

**Conducător de doctorat : Prof. dr. ing. Alexandru Salceanu**

IAȘI, 2024

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI**  
**RECTORATUL**

Către

---

---

Vă facem cunoscut că, în ziua de 11 Septembrie 2024 la ora 12, în Sala de Conferințe "Dragomir Hurmuzescu" a Facultății de Inginerie Electrică, Energetică și Informatică Aplicată, Blvd. Prof. Dimitrie Mangeron nr.23, Iași, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERIZAREA  
EXPUNERII UMANE LA CAMPURI ELECTROMAGNETICE DE JOASĂ  
FRECVENȚĂ"**

elaborată de domnul **SILVIU CONSTANTIN VORNICU** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Prof.univ. dr.ing.mat. Dorin Dumitru Lucache, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași – președinte;
2. Prof.univ.dr.ing. Alexandru Sălceanu, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași - conducător de doctorat;
3. Prof.univ.dr.ing. Călin George Seritan, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie "Politehnica" București - referent oficial;
4. Prof.univ.dr.ing. Radu Adrian Munteanu, Universitatea Tehnică din Cluj Napoca - referent oficial;
5. Conf.univ.dr.ing. Eduard Costel Luncă, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași - referent oficial.

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

**RECTOR,**

Prof.univ.dr.ing. Dan Cașcaval

**Secretar universitate,**

Ing. Cristina Nagiț



## Cuprins

<b>1. Introducere .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Aspecte generale privind câmpul electromagnetic.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Stadiul actual al cercetării.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Organizarea lucrării.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Surse reprezentative de câmp electromagnetic. Niveluri de referință pentru limitarea expunerii .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Surse reprezentative de câmp electromagnetic.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1. Linii electrice de transport și distribuție (aerene și subterane).....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2. Stații de transformare a energie electrice.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3. Posturi de transformare MT/JT.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.4. Instalații electrice interioare și aparate electrocasnice.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. Reglementări și niveluri de referință pentru limitarea expunerii umane la         câmpurile electromagnetice.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1. Niveluri limită ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing                 Radiation Protection).....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2. Hotărârea Guvernului României din iulie 2016.....</b>	<b>17</b>
<b>3. Studiu de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice de joasă frecvență generate de linii electrice subterane.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Câmpuri magnetice generate de către LES, în zone rezidențiale și         ocupationale.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2. Modelul LES selectat pentru analiză.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Model ANSYS Maxwell 2D pentru determinarea câmpului magnetic generat         de LES.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4. Calculul analitic al câmpului magnetic generat de LES 20 kV.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5. Compararea rezultatelor în urma calculului câmpului magnetic realizat prin         simulare numerică, față de cel calculat analitic, generat de LES 12/20         kV.....</b>	<b>27</b>

<b>4. Studii de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice și electrice de joasă frecvență generate de linii electrice aeriene.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1. Câmpuri magnetice și electrice generate de LEA în zone rezidențiale și ocupaționale.....</b>	<b>32</b>
<b>4.2. Model ANSYS Maxwell 2D pentru determinarea câmpului magnetic și câmpului electric generat de LEA.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3. Simulări numerice de câmp electric și câmp magnetic generate de LEA.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.1. LEA 110 kV simplu circuit stâlp susținere SN 110.102.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.2. LEA 110 kV dublu circuit stâlp susținere SN 110.252.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.3. LEA 220 kV dublu circuit stâlp susținere 220.202.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3.4. LEA 400 kV simplu circuit stâlp susținere 400.102.....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.5. LEA 400 kV dublu circuit stâlp susținere 400.231/232.....</b>	<b>56</b>
<b>5. Studiu experimental privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență din diferite zone urbane ale orașului Iași.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1. Evaluarea câmpului magnetic din zonele stradale pietonale ale orașului Iași.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2. Evaluarea câmpului magnetic din piețele publice ale orașului Iași.....</b>	<b>62</b>
<b>5.3. Evaluarea câmpului magnetic din parcurile orașului Iași.....</b>	<b>62</b>
<b>5.4. Evaluarea câmpului magnetic din parcările publice ale orașului Iași.....</b>	<b>63</b>
<b>5.5. Evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea posturilor de transformare din orașul Iași.....</b>	<b>63</b>
<b>5.6. Evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea stațiilor de transformare din orașul Iași.....</b>	<b>65</b>
<b>6. Concluzii finale, contribuții personale, direcții viitoare de cercetare.....</b>	<b>66</b>
<b>7. Bibliografie .....</b>	<b>71</b>

# CAPITOLUL 1

## 1.1. Aspecte generale privind câmpul electromagnetic

### Câmpul electromagnetic

Câmpul electromagnetic este alcătuit dintr-un câmp electric și un câmp magnetic care oscilează în jurul unui corp încărcat electric, și care afectează alte particule încărcate electric. Câmpul electromagnetic este o forță principală a naturii și se propagă indefinit în spațiu prin unde electromagnetice. Propagarea undelor electromagnetice are la bază fenomenul generării reciproce a câmpului electric și a câmpului magnetic. Emisiile (radiațiile) electromagnetice pot fi cauzate artificial, dar pot avea și cauze naturale. În general, pentru câmpurile electromagnetice care variază în timp, aceste două câmpuri, electric, respectiv magnetic sunt cuplate, dar în limita câmpurilor neschimbabile ele devin independente.

### Spectrul electromagnetic

Spectrul electromagnetic este format din două categorii principale de radiații electromagnetice ce sunt stabilite în funcție de lungimea de undă:

- Radiații ionizante
- Radiații neionizante

**Radiațiile ionizante** sunt situate în domeniul lungimilor de undă nanometrice. Ele sunt capabile să rupă legăturile atomice ale moleculelor sau să scoată unul sau mai mulți electroni dintr-un atom pentru a crea particule încărcate pozitiv (ioni). Pentru a înțelege fenomenul de ionizare, radiația electromagnetică trebuie interpretată ca o emisie de particule elementare numite fotoni, nu ca o undă care se propagă. Energia unui foton depinde de frecvența radiației.

Cu cât frecvența de oscilație este mai ridicată, cu atât lungimea de undă este mai redusă și energia vehiculată mai mare. Razele X, razele  $\gamma$  și razele cosmice sunt radiații ionizante. Ele sunt capabile să modifice materia. Chiar și în doze foarte mici au efecte dăunătoare asupra sănătății.

**Radiațiile neionizante** au domeniul de frecvență de la practic 0 Hz până la domeniul ultravioletelor îndepărtate. Acestea nu au energia suficientă să rupă legăturile atomice ale moleculelor, câmpurile electrice și magnetice cu frecvența până la 100 kHz nu produc efecte termice dar induc curenți în corpul uman, iar cele cu frecvența de peste 10 MHz produc efecte termice, încălzind într-o zonă periferică corpul ce le absoarbe.

**Lungimea de unda** ( $\lambda$ ) este distanța pe care o undă o parcurge într-un ciclu complet al oscilației sale. Lungimea de undă este invers proporțională cu frecvența undei electromagnetice, cu cât frecvența este mai mare, cu atât lungimea de undă este mai mică, aceasta se definește ca:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 1.1$$

Unde:  $\lambda$  este lungimea de undă (m),  $c$  este viteza luminii în vid ( $3 \times 10^8$  m/s), iar  $f$  este frecvența (Hz).

În funcție de distanța dintre un punct de observare,  $d$  și sursa de câmp electromagnetic, spațiul care se află în jurul sursei de câmp electromagnetic poate fi împărțit în două regiuni, zona de câmp apropiat și zona de câmp îndepărtat.

În **zona de câmp îndepărtat** ( $d > \lambda/2\pi$ ), câmpul electromagnetic are caracter de undă plană, câmpul electric ( $E$ ) și câmpul magnetic ( $H$ ) sunt perpendiculare pe direcția de propagare, și perpendiculare unul față de celălalt, acestea aflându-se în fază. Raportul dintre cele două intensități este constant, acesta se definește ca impedanța de undă ( $Z_u$ ). Dacă mediul de propagare este aerul, impedanța de undă este egală cu  $377 \Omega$ .

$$Z_u = \frac{E}{H} = 377 \Omega \quad 1.2$$

În **zona de câmp apropiat** ( $d < \lambda/2\pi$ ), câmpul electromagnetic se compune din câmp magnetic și câmp electric, acestea fiind interdependente între ele și sunt influențate de structura fizică a sursei și de modul de generare a acestora. Direcția și intensitatea câmpului electric depind de distribuția sarcinilor electrice, câmpul electric poate avea efecte componente tangențiale și radiale în funcție de geometria sursei. Direcția și intensitatea câmpului magnetic depind de modul în care curenții sunt distribuiți de sursă, câmpul magnetic poate avea componente în diverse direcții depinzând de modul de alimentare și de natura sursei.

Caracterizarea câmpului electromagnetic în zona de câmp îndepărtat se poate realiza utilizând ecuația 1.2 și prin măsurarea oricărei dintre cele două componente, intensitatea câmpului magnetic  $H$  (A/m) sau intensitatea câmpului electric  $E$  (V/m). Totuși câmpul electromagnetic, indiferent de componenta măsurată, se exprimă în V/m.

Pentru caracterizarea câmpului electromagnetic în zona de câmp apropiat, conversia dintre cele două componente nu mai este posibilă, trebuie măsurate individual, atât componenta electrică, cât și componenta magnetică.

Termenul de câmp magnetic este folosit pentru caracterizarea a două mărimi, când este vorba de câmp apropiat acesta se referă la inducția magnetică,  $B$ , exprimată în tesla (T), iar când este vorba de câmp îndepărtat acesta se referă la intensitatea câmpului magnetic,  $H$ , exprimată în Amperi pe metru (A/m). Cele două sunt mărimi vectoriale, iar legătura între ele este dată de permeabilitatea magnetică a mediului respectiv. Pentru vid unde  $\mu_0$  este  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m avem:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad 1.3$$

Câmpurile electromagnetice cu cele mai joase frecvențe întâlnite sunt, de obicei, cele produse de transportul și distribuția energiei electrice, în mediile industriale dar și cele produse de toate aparatele electrice care se alimentează cu energie electrică (consumatori industriali, consumatori

casnici). Frecvențele sunt în general de 50 Hz în Europa (60 Hz în Statele Unite, Canada, Japonia etc).

Pentru un câmp electromagnetic generat de o linie electrică cu frecvență de 50 de Hz, lungimea de undă folosind relația 1.1 este:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} \quad 1.4$$

Este destul de clar ca măsurarea acestui câmp electromagnetic trebuie făcută în zona de câmp apropiat, deci câmpurile electric și magnetic trebuie considerate separat.

Întregul spectru electromagnetic este prezentat în Figura 1.1. Sunt date frecvențele, lungimile de undă, precum și numele obișnuit al domeniilor. Unele imagini în miniatură ilustrează gama de aplicații.

Clasificarea radiațiilor electromagnetice referitoare la domeniul de frecvență, lungimea de undă, energia fotonului și acronimele internaționale folosite pentru gruparea lor sunt prezentate în Tabelul 1.1.

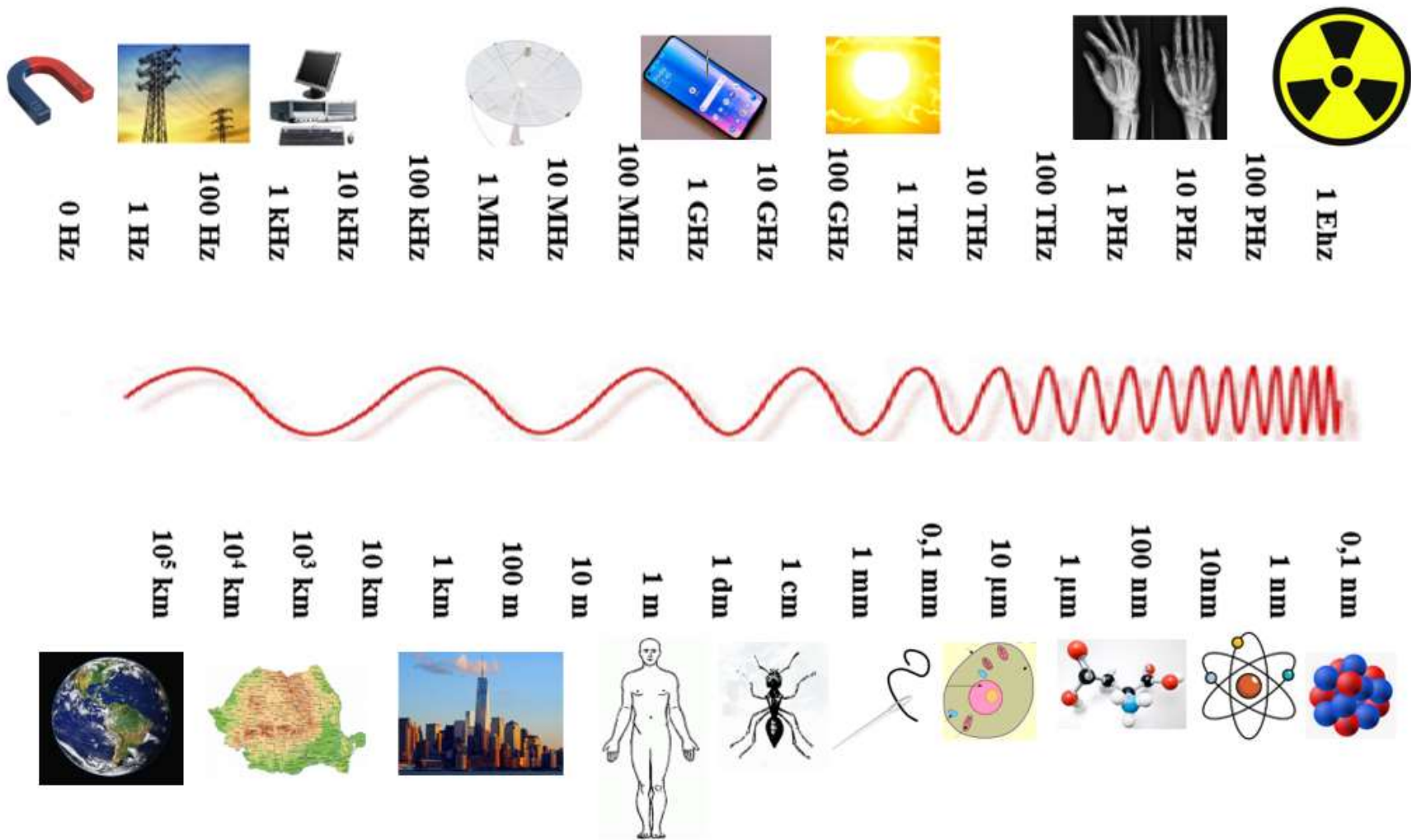


Figura 1.1. Spectrul electromagnetic



**Tabelul 1.1.** Clasificarea radiațiilor electromagnetice referitoare la domeniul de frecvență, lungimea de undă, energia fotonului și acronimele internaționale

Clasa	Radiații Non-ionizante											Radiații ionizante							
	Câmpuri electrice și magnetice neradiante			Undele radio și microunde								Lumina vizibilă și invizibilă							
	ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF	FIR	MIR	NIR	NUV	EUV	SX	HX	Y
<i>Frecvența (limita inferioară)</i>	3 Hz	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz	3 THz	30 THz	300 THz	3 PHz	30 PHz	300 PHz	3000 PHz
<i>Frecvența (limita superioară)</i>	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz	3 THz	30 THz	300 THz	3 PHz	30 PHz	300 PHz	3000 PHz	30000 PHz
<i>Lungimea de undă (limita inferioară)</i>	100 Mm	10 Mm	1 Mm	100 km	10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	1 dm	1 cm	1 mm	100 μm	10 μm	1 μm	100 nm	10 nm	100 pm	10 pm
<i>Lungimea de undă (limita superioară)</i>	10 Mm	1 Mm	100 Km	10 km	1 km	100 m	10 m	1 m	1 dm	1 cm	1 mm	100 μm	10 μm	700 nm	100 nm	10 nm	100 pm	10 pm	1 pm
<i>Energia fotonului (limita inferioară)</i>	12,4 feV	124 feV	1,24 feV	12,4 peV	124 peV	1,24 neV	12,4 neV	124 neV	1,24 μeV	12,4 μeV	124 μeV	1,24 meV	12,4 meV	124 meV	1,24 eV	12,4 eV	124 eV	1,24 keV	12,4 keV
<i>Energia fotonului (limita superioară)</i>	124 feV	1,24 feV	12,4 peV	124 peV	1,24 neV	12,4 neV	124 neV	1,24 μeV	12,4 μeV	124 μeV	1,24 meV	12,4 meV	124 meV	1,24 eV	12,4 eV	124 eV	1,24 keV	12,4 keV	124 MeV
<i>Legendă</i>	<i>ELF</i> – Frecvență extrem de joasă <i>SLF</i> – Frecvență super joasă <i>ULF</i> – Frecvență ultra joasă			<i>VLF</i> – Frecvență foarte joasă <i>LF</i> – Frecvență joasă <i>MF</i> – Frecvență medie <i>HF</i> – Frecvență înaltă <i>VHF</i> – Frecvență foarte înaltă <i>UHF</i> – Frecvență ultra înaltă <i>SHF</i> – Frecvență super înaltă <i>EHF</i> – Frecvență extrem de înaltă								<i>FIR</i> – Infraroșu îndepărtat <i>MIR</i> – Infraroșu mediu <i>NIR</i> – Infraroșu apropiat <i>VS</i> – Spectru vizibil <i>NUV</i> – Ultraviolete apropiate vizibil				<i>EUV</i> – Ultraviolete extreme <i>SX</i> – Raze X moi <i>HX</i> – Raze X dure <i>Y</i> – Raze Gamma			

## 1.2. Stadiul actual și importanța temei

Sănătatea este unul dintre pilonii principali în viața fiecăruia, iar expunerea la câmpurile electrice și magnetice reprezintă subiecte de actualitate. Importanța este redată de interesul din partea publicului larg, dar mai ales din partea cercetătorilor specializați, din perspectiva efectelor potențial dăunătoare asupra sănătății omului.

La aproximativ un secol și jumătate de la inventarea becului cu incandescență de către Thomas Edison, societatea a devenit dependentă de energie electrică și de nenumăratele dispozitive alimentate de la rețelele electrice. Societatea modernă este susținută de evoluția tehnologiei, aparatele electrocasnice devin din ce în ce mai performante, rețeaua electrică răspunde cererii de energie, dezvoltându-se rapid prin creșterea rețelelor de energie electrică generând astfel câmpuri electromagnetice de joasă frecvență. În aproape fiecare aspect al vieții moderne utilizarea energiei electrice este din ce în ce mai răspândită, astfel încât este imposibil să se evite expunerea la câmpurile electrice și magnetice generate de transportul și distribuția energiei electrice sau de către câmpurile generate de echipamentele electrice folosite în locuințe și la locurile de muncă.

## 1.3. Organizarea lucrării

Teza de doctorat intitulată *“Cercetări teoretice și experimentale privind caracterizarea expunerii umane la câmpuri electromagnetice de joasă frecvență”* este structurată în șase capitole. Primele două capitole conțin introducerea, actualitatea și importanța temei, principalele surse de câmp electromagnetic de foarte joasă frecvență și nivelurile de referință pentru limitarea expunerii. Următoarele trei capitole prezintă contribuția autorului la măsurarea câmpului electromagnetic generate de liniile electrice de transport a energiei electrice, liniile electrice de distribuție a energiei electrice, măsurări ale câmpului magnetic în diferite zone publice din municipiul Iași. În ultimul capitol sunt redată concluziile finale și direcțiile viitoare de cercetare.

**Capitolul 1** este un capitol introductiv, prezentând noțiunii de bază ale câmpului electromagnetic, definindu-se stadiul actual al cunoașterii, importanța temei, iar la final este prezentată organizarea pe capitole a tezei de doctorat.

În cadrul **Capitolul 2** cu titlul **“Surse reprezentative de câmp electromagnetic. Niveluri de referință pentru limitarea expunerii”** sunt caracterizare principalele surse de câmp electromagnetic de joasă frecvență. Sunt vizate în mod special liniile electrice aeriene de transport și distribuție a energiei electrice, liniile electrice subterane de transport și distribuție a energiei electrice, stațiile de transformare, posturile de transformare dar și instalații electrice interioare și aparate electrocasnice. Totodată sunt prezentate și nivelurile de referință pentru limitarea expunerii, precum și o serie de reglementări și restricții de bază.

**În Capitolul 3** intitulat “**Studii de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice de joasă frecvență generate de linii electrice subterane**” este propusă o abordare FEM simplă și totuși eficientă pentru a calcula și analiza (din perspectiva expunerii publice) câmpul magnetic asociat cu configurațiile tipice ale LES utilizate în sistemul energetic românesc. Calculele numerice sunt efectuate cu programul de simulare electromagnetică ANSYS Maxwell 2D, iar pentru validare, acestea sunt verificate cu rezultatele analitice obținute cu un instrument software bazat pe legea Biot-Savart și pe principiul de suprapunere dezvoltat cu ajutorul software-ului LabView. Modelul de LES selectat pentru analiză este adesea găsit în medii urbane și are o geometrie impusă de tipul conductoarelor, de tip NA2XS(F)2Y. Acesta este un cablu de medie tensiune cu conductor central din aluminiu, ecran din cupru, izolație centrală din polietilenă reticulată (XLPE) și manta din polietilenă de înaltă densitate (HDPE) cu secțiunea de 150 mm<sup>2</sup>.

**În Capitolul 4**, “**Studii de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice și electrice de joasă frecvență generate de linii electrice aeriene**”, este propusă o abordare FEM simplă și totuși eficientă pentru a calcula și analiza (din perspectiva expunerii publice) câmpurile electrice și magnetice EJM, asociate cu configurațiile tipice ale LEA utilizate în sistemul energetic românesc. A fost dezvoltat un model 2D ANSYS Maxwell, folosit pentru a investiga nivelurile de expunere generate de o selecție de LEA cu tensiuni nominale de 110 kV, 220 kV și 400 kV. O atenție deosebită va fi acordată distribuției câmpului la o înălțime de 1 m deasupra solului, luând în considerare factorii de influență precum încărcarea liniilor, transpunerea de faze dar și garda la sol.

**În Capitolul 5**, “**Studiu experimental privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență din diferite zone urbane ale orașului Iași**”, se prezintă un studiu experimental privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență în mediul urban, în condiții *outdoor*, folosind echipamentul Extech 480826. Au fost efectuate și prelucrate peste 1800 de măsurători în municipiul Iași. Dintre acestea, peste 1000 au fost realizate în cincisprezece cele mai aglomerate străzi, peste 100 de măsurători în patru piețe publice, peste 100 de măsurători în patru parcuri publice, peste 100 de măsurători în cinci parcuri, peste 250 de măsurători în jurul a douăzeci și cinci de posturi de transformare și peste 200 de măsurători în jurul a șapte stații de transformare.

**În Capitolul 6** sunt prezentate concluziile finale și contribuțiile originale privind tema cercetării. De asemenea în cadrul capitolului sunt prezentate și viitoarele direcții de cercetare în conexiune cu rezultatele obținute în urma elaborării tezei de doctorat.

## CAPITOLUL 2

### **Surse reprezentative de câmp electromagnetic. Niveluri de referință pentru limitarea expunerii**

#### **2.1. Surse reprezentative de câmp electromagnetic**

Pe lângă câmpurile electromagnetice naturale, omul a creat, în mod intenționat sau neintenționat, câmpuri electromagnetice artificiale. Cele intenționate pot fi utilizate pentru tratarea sau diagnosticarea unor celule sau materiale, iar cele neintenționate sunt generate de orice dispozitiv care funcționează cu energie electrică.

Sistemul electroenergetic reprezintă ansamblul instalațiilor electroenergetice interconectate și cuprinde instalațiile de producere a energiei electrice (generatoarele), instalațiile de transformare a acesteia de la o tensiune la alta (stații și posturi de transformare), instalațiile de transport și distribuție a energiei electrice (rețele de înaltă, medie și joasă tensiune) și instalațiile de utilizare a acesteia.

Producerea de energie se poate face prin centrale termoelectrice, centrale nucleare și centrale pe hidrocarburi dar și din surse regenerabile: eolian, fotovoltaic, hidrocentrale, și biomasă. Pentru transport și distribuție se folosesc linii electrice aeriene și subterane. Energia electrică suferă mai multe transformări ale tensiunii pentru a putea fi transportată la distanțe cât mai mari, cu pierderi cât mai mici, acest lucru realizându-se cu ajutorul stațiilor și posturilor de transformare. Energia electrică este utilizată de consumatorii finali, iar aceștia se încadrează în două categorii, în funcție de natura consumului: consumatori casnici (97,09 %) și consumatori industriali (2,91 %) [1].

Utilizarea energiei electrice este atât de răspândită încât este imposibil să fie evitată expunerea la câmpurile electrice și magnetice produse în transportul și distribuția energiei electrice sau la acele câmpuri generate de dispozitivele folosite în locuințe și la locurile de muncă.

În continuare se vor prezenta principalele tipuri de surse de câmp electromagnetic de joasă frecvență.

##### **2.1.1. Linii electrice de transport și distribuție (aeriene și subterane)**

Energia electrică este transportată și distribuită la consumatorii finali prin **linii electrice aeriene** (LEA) și **linii electrice subterane** (LES).

**Linia electrică aeriană** (LEA) este o instalație montată în aer liber, compusă din conductoare, izolatoare, cleme, armături, stâlpi, fundații și instalații de legare la pământ și care servește la transportul sau distribuția de energie electrică.[2]

Conductoarele liniilor electrice aeriene, în mod obișnuit, se fabrică din aluminiu, oțel sau aliaje de aluminiu, foarte rare fiind cazurile în care acestea sunt din bronz sau oțel.

Pentru liniile de joasă tensiune se mai utilizează conductoare torsadate, formate din unul sau mai multe conductoare din aluminiu, izolate cu PVC, răsucite în jurul unui conductor din aluminiu-oțel, de asemenea și acesta izolat cu PVC.

Stâlpii liniilor electrice aeriene sunt construcțiile care prin intermediul izolatoarelor, clemelor și armăturilor susțin conductoarele deasupra solului.

Stâlpii după materialul din care sunt construiți pot fi din: metal, beton sau lemn.

Liniile electrice aeriene se pot clasifica astfel:

După tensiunea nominală: [3]

- linii de joasă tensiune – cu tensiunea care are valoarea efectivă nominală  $U_n \leq 1$  kV;
- linii de medie tensiune – cu tensiunea care are valoarea efectivă nominală cuprinsă între  $1\text{kV} < U_n \leq 35$  kV;
- linii de înaltă tensiune – cu tensiunea care are valoarea efectivă nominală cuprinsă între  $35\text{ kV} < U_n \leq 150$  kV;
- linii de foarte înaltă tensiune cu tensiunea care are valoarea efectivă nominală  $300\text{ kV} < U_n$ .

**Liniile electrice subterane (LES)** sunt folosite pentru transportul și distribuția energiei electrice în orașe, pe platforme industriale, în incintele întreprinderilor, în centrale și stații electrice, etc. Față de liniile electrice aeriene prezintă câteva avantaje: siguranță mărită în funcționare, spațiu redus ocupat, evitarea pericolului de atingere directă a părților aflate sub tensiune, lipsa influenței factorilor poluanți și a celor atmosferici, neafectarea din punct de vedere estetic a zonelor parcurse. În schimb au și unele dezavantaje, cel mai important este costul mult mai ridicat, dar și depistarea, repararea mai dificilă a defecțiunilor și necesitatea unui personal cu o calificare superioară pentru montare [12].

Cablurile sunt formate din următoarele componente: conductoarele, izolația, ecranul și învelișul cablului.

Conductoarele cablurilor pot fi din cupru sau aluminiu, alcătuite din unul (conductoare monofilare) sau mai multe fire (conductoare multifilare).

Învelișul cablului are rolul de a realiza o formă finită a cablului și de a asigura protecția împotriva degradărilor exterioare. Se compune din: materialul de umplură, mantaua de etanșare, armatură, mantaua exterioară.

Câmpul electric într-un punct situat în apropierea unei linii electrice depinde de tensiunea liniei, de înălțimea ei și de distanța dintre conductoarele care alcătuiesc linia. Diametrul conductoarelor este, de asemenea, foarte important. Utilizarea unor conductoare mai groase conduc la apariția unor câmpuri electrice mai mari.

Câmpurile electrice scad direct proporțional cu distanța. Câmpul electric este cel mai scăzut atunci când cele trei faze sunt echilibrate. În cazul dezechilibrului celor trei faze acesta crește. La nivelul solului, câmpurile electrice sunt cele mai mari acolo unde săgeata LEA este maximă (cel mai aproape de sol) și se reduce până la sfârșitul intervalului (lângă stâlp).

Câmpul magnetic produs de o linie electrică depinde de mai mulți factori:

- Numărul de conductoare ale liniei (de obicei trei pentru o linie cu simplu circuit, respectiv șase pentru o linie cu două circuite);
- Aranjamentul conductoarelor în spațiu, incluzând distanța dintre conductoare. Aceasta este de obicei determinată de necesitatea de a evita atingerea între conductoare adiacente, incluzând o posibilitate de deplasare a conductoarelor cauzată de vânt. Prin urmare, distanța crește, de obicei, pe măsură ce crește tensiunea liniei;
- Disponibilitatea fazelor pentru o linie dublu-circuit. Dacă ordinea fazelor celor două circuite este aceeași (faze în oglindă sau „netranspuse”), câmpurile magnetice produse de acestea vor avea mereu același sens, așa că se vor însuma (cu un factor de scalare, pentru a permite câmpurilor să scadă cu distanța față de linie). Dacă fazele celor două circuite sunt dispuse în ordine inversă (faze „transpuse”), câmpurile magnetice generate de acestea vor avea sensuri opuse, așa că va exista un anumit grad de compensare, câmpul rezultat fiind, evident, mai mic decât în cazul anterior [4];
- Curenții ce trec prin conductoarele liniei;
- Înălțimea conductoarelor deasupra solului;
- Liniile electrice cu tensiuni foarte înalte prezintă curenți mai mari și distanțe mai mari între conductoare. Prin urmare, acestea produc, de obicei, câmpuri magnetice mai puternice, chiar dacă câmpul magnetic în sine nu depinde de tensiune.

Liniile electrice cu tensiuni foarte înalte prezintă curenți mai mari și distanțe mai mari între conductoare. Prin urmare, acestea produc, de obicei, câmpuri magnetice mai puternice, chiar dacă câmpul magnetic în sine nu depinde de tensiune.

Curenții în liniile electrice variază pe parcursul unei zile, de la un sezon la altul și de la un an la alt an, deoarece cererea de energie electrică variază. Liniile funcționează de regulă cu o încărcătură semnificativ mai mică decât maximul lor, prin urmare, câmpurile electromagnetice întâlnite sunt, de obicei, semnificativ mai mici decât câmpul maxim teoretic pe care o linie îl poate produce.

## 2.1.2. Stații de transformare a energiei electrice

Stațiile de transformare a energiei electrice sunt noduri în sistemul electroenergetic național care cuprind mai ales extremitățile liniilor electrice, legături conductoare, aparataj electric, clădiri și transformatoare de putere.

Din totalul stațiilor de transformare existente în sistemul electroenergetic național, 81 de stații de transformare sunt deținute de către Operatul de Transport Național, una este de 750 kV, 38 sunt de 400 kV și 42 sunt de 220 kV.[5] Stațiile de 110 kV sunt deținute de către cei opt operatorii de distribuție prezentați în Figura 2.1. Operatorii de distribuție dețin un total de 872 stații de transformare 110 kV, după cum urmează[6]:

- E-Distribuție Muntenia – 70 stații;
- E-Distribuție Banat – 96 stații;
- E-Distribuție Dobrogea – 120 stații;
- Distribuție Energie Oltenia – 144 stații;
- Delgaz Grid – 124 stații;
- DEER Muntenia Nord – 125 stații;
- DEER Transilvania Nord – 92 stații;
- DEER Transilvania Sud – 101 stații.

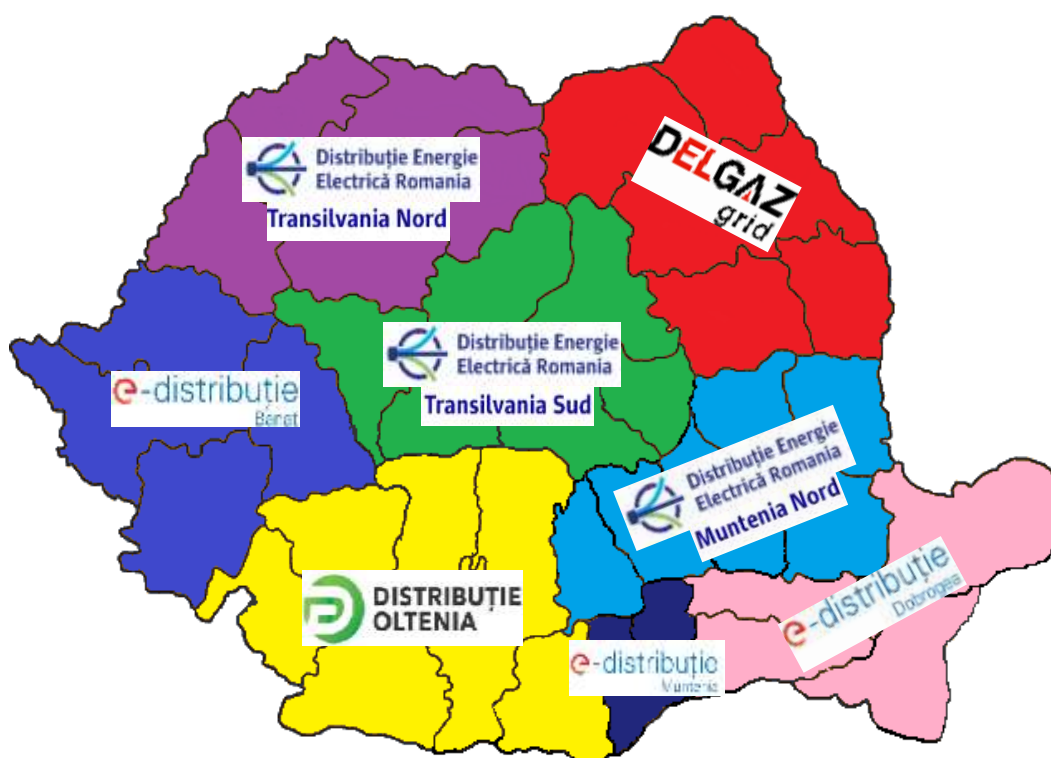


Figura 2.1. Hartă operatori de distribuție Romania

Stațiile de transformare nu produc câmpuri electrice semnificative în afara graniței lor, deoarece gardul din metal ce înconjoară stația ecranează câmpul electric generat de orice surse din interiorul stației. Câmpul electric din jurul stației electric se datorează liniilor electrice aeriene care intră și ies din stație.

În interiorul stației, barele și alte echipamente produc câmpuri electrice. Acestea sunt cele mai ridicate acolo unde barele sunt aranjate în așa fel încât câmpurile se consolidează reciproc, iar cele mai mici în cazul în care aranjamentul produce reducerea acestora.

Echipamentele din interiorul stațiilor produc câmpuri magnetice puternice, dar acestea scad destul de rapid, odată cu distanța. La gardul perimetral sau la câțiva metri în afara acestuia, câmpul magnetic din interiorul stației se apropie de obicei de valoarea câmpului de fond.

Cele mai mari câmpuri magnetice din jurul perimetrului unei stații de alimentare sunt generate aproape întotdeauna de liniile aeriene și cablurile subterane care intră sau ies din aceasta. Există adesea mai multe astfel de linii și este dificil să distingi câmpul magnetic generat de acestea sau câmpul magnetic generat de echipamentele din interiorul stației.

Totuși unele studii arată ca în interiorul stațiilor, în locurile unde sunt amplasate întrerupătoarele și separatoarele, deoarece aceasta sunt mai apropiate de sol, câmpul electric depășește nivelul de referință pentru limitarea expunerii în cazul expunerii ocupaționale [7].

### **2.1.3. Posturi de transformare MT/JT**

Posturile de transformare MT/JT, prescurtate simplu, PT, sunt parte componentă a rețelelor de distribuție și asigură modificarea nivelului tensiunii energiei electrice de la medie tensiune (20 kV, 10 kV și 6 kV) la joasă tensiune (0,4 kV), având puteri de până la 2500 kVA [8].

În Figura 2.6 sunt prezentate diferite tipuri de posturi de transformare în funcție de tipul lor de execuție:

Posturile de transformare produc rareori câmpuri electrice și magnetice semnificative, în afara perimetrului lor [9]. În cazul unui post de transformare montat pe stâlpi, câmpul se datorează în mare parte liniilor electrice aeriene, dar și montajului în aer liber a barelor de tensiune și a altor echipamente. Totuși, câmpul electric generat de echipamentele din interiorul tabloului de distribuție este ecranat de acesta, deoarece, de regulă, este fabricat din metal.

În cazul posturilor de transformare prefabricate din cabine metalice sau montate subteran, nu se produc câmpuri electrice în afara stației.

Echipamentul din interiorul postului de transformare, în special barele de tensiune și tabloul de distribuție, produc câmpuri magnetice, dar acestea scad odată cu distanța. La o distanță de câțiva metri, acesta scade până la nivelul câmpului de fond [9]. În majoritatea cazurilor, un post de transformare nu este o sursă semnificativă de expunere. În cazul în care postul de transformare este



montat lângă o clădire de locuințe, lipit de peretele unei încăperi locuite, poate fi un motiv pentru care câmpul magnetic generat în interiorul acesteia este mai ridicat.

Câmpuri magnetice mai mari decât cele obișnuite pot fi produse de cablurile care conectează transformatorul în tabloul de distribuție de joasă tensiune, dar și cele care ies din acesta. Aceste câmpuri apar deoarece conductoarele pot să nu fie foarte apropiate între ele, ceea ce înseamnă că factorul de reducere a câmpul magnetic este mult mai mic. Câmpul depinde de pozarea conductoarelor și de curentul care trece prin acestea [10].

#### **2.1.4. Instalații electrice interioare și aparate electrocasnice**

Câmpurile electrice și magnetice de joasă frecvență din locuințe apar ca urmare a circulației tensiunilor și curenților prin conductoarele de alimentare a instalației electrice a locuințelor, prin conductoarele de împământare și ca urmare a utilizării aparatelor electrocasnice. Câmpul electric produs de orice sursă din afara casei va fi atenuat considerabil de structura casei (în principal de acoperișul metalic).

Câmpurile magnetice sunt parțial anulate dacă valoarea curentului care circulă prin conductorul de fază este aceeași i cu valoarea celui care revine prin conductorul de nul. Anularea este mai eficientă dacă distanța dintre cabluri este mai mică sau dacă sunt chiar răsucite. Cu toate acestea, cablurile din interiorul pereților locuinței pot deveni o sursă semnificativă de câmp magnetic. În situația în care există o conexiune în interiorul casei între nul și împământare, o parte din curentul care circula spre nul poate “curge” spre cablu de împământare. Atunci curenții nu mai sunt echilibrați și se produce un câmp magnetic mai mare.[22]

În centrul unei încăperi, câmpul electric are, în general, o valoare de până la 20 V/m. În apropierea aparatelor electrocasnice și a cablurilor intensitatea câmpului poate crește până la câteva sute de volți pe metru [23]. Pentru câmpurile electrice efectul de anulare nu este atât de eficient, iar cablurile din pereții locuinței sunt principala sursă de câmp electric. Câmpul electric produs de cabluri depinde parțial de modul în care acestea sunt instalate; cablurile instalate în canale sau conducte de metal produc câmpuri electrice externe foarte mici.

Orice aparat electric conectat la rețea produce câmpuri electrice (spre deosebire de câmpurile magnetice, care sunt produse numai atunci când aparatul funcționează), iar aparatele sunt adesea conectate chiar și atunci când nu funcționează.

Cele mai mari inducții magnetice din casă la care este expusă majoritatea oamenilor apar în apropierea aparatelor electrocasnice care încorporează motoare, transformatoare sau încălzitoare. În majoritatea cazurilor, oamenii sunt expuși la câmpuri magnetice mai mari generate de aparatele electrice de uz casnic în interiorul locuințelor. comparativ cu expunerea de la locul de muncă sau din afara casei.

Inducția magnetică scade rapid, odată cu distanța față de aparate și variază între pătratul invers și cubul invers al distanței. La o distanță de doar 1 m inducția magnetică va fi de obicei similară câmpurilor de fond. La o distanță de 3 cm, inducția magnetică poate fi de câteva sute de  $\mu\text{T}$  sau chiar se pot apropia de câțiva mT de la dispozitive precum uscătoare de păr, deși pot exista variații mari ale câmpurilor la aceeași distanță față de aparate similare [23].

Deoarece câmpurile electrice sunt atât de ușor de perturbat, acestea sunt rareori uniforme. Multe obiecte, în special obiectele metalice, perturbă câmpul electric și se pot crea, local, zone de intensitate puternică a câmpului electric.

## **2.2. Reglementări și niveluri de referință pentru limitarea expunerii umane la câmpurile electromagnetice**

Privind expunerea umană la câmpurile electromagnetice există mai multe organizații ce stabilesc atât reglementările, cât și nivelurile de referință. Una dintre cele mai importante este ICNIRP (Comisia Internațională pentru Protecția împotriva Radiațiilor Neionizante), ICNIRP este o organizație internațională, non-profit, cu o misiune științifică, recunoscută de către Organizația Mondială a Sănătății (OMS), Organizația Internațională a Muncii (OIM) și inclusiv de către Comisia Uniunii Europene[25]. ICNIRP, pe baza analizării în detaliu a lucrărilor științifice privind efectele asociate expunerii la câmpuri electromagnetice, stabilește anumite norme și limite de expunere. Aceste Norme au fost adoptate în majoritatea statelor lumii, printre care și România.

La nivelul Uniunii Europene și a României, expunerea publicului larg la câmpurile electromagnetice este reglementată prin Recomandarea Consiliului Europei nr. 519/1999 [26], care conține prevederi referitoare la limitarea expunerii populației la câmpuri electromagnetice stabilite de ICNIRP în 1998 [27]. În cazul expunerii publicului ocupațional, reglementarea se face prin Directiva Europeană 2013/35/UE [28], iar la nivel național prin Hotărârea Nr. 520/2016 [29].

### **2.2.1. Niveluri limită ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*)**

În acest subcapitol sunt prezentate nivelurile de referință pentru limitarea expunerii și pentru protecția oamenilor față de câmpurile electrice și magnetice, care se încadrează în domeniul de joasă frecvență a spectrului electromagnetic ce se extinde de la 1 Hz până la 100 kHz. Peste 100 kHz, trebuie luate în considerare efecte termice precum încălzirea țesuturilor, acestea sunt reglementate de alte ghiduri ale ICNIRP [19].

Totuși, în intervalul de frecvență de la 100 kHz până la 10 MHz, trebuie luate în considerare ambele efectele: cele generate de câmpurile de frecvență joasă cu efecte asupra sistemului nervos,

precum și câmpurile de frecvență înaltă, în funcție de condițiile de expunere. Prin urmare, unele limite din acest subcapitol sunt extinse până la 10 MHz pentru a încadra efectele sistemului nervos în intervalul de frecvență respectiv.

INCIRP 2010 [19] înlocuiește partea de joasă frecvență a ghidurilor din 1998 (ICNIRP 1998) [27]. Obiectivul principal al ICNIRP este de a oferi îndrumări pentru limitarea expunerii la câmpuri electrice și magnetice (CEM), care să ofere protecție împotriva tuturor efectelor adverse asupra sănătății.

Din punct de vedere a expunerii la CEM, pot apărea efecte directe și efecte indirecte:

- efectele directe rezultă din interacțiunea directă a organismului cu CEM;
- efectele indirecte se referă la interacțiuni cu un obiect plasat într-un câmp electromagnetic, având potențialul electric diferit de cel al organismului.

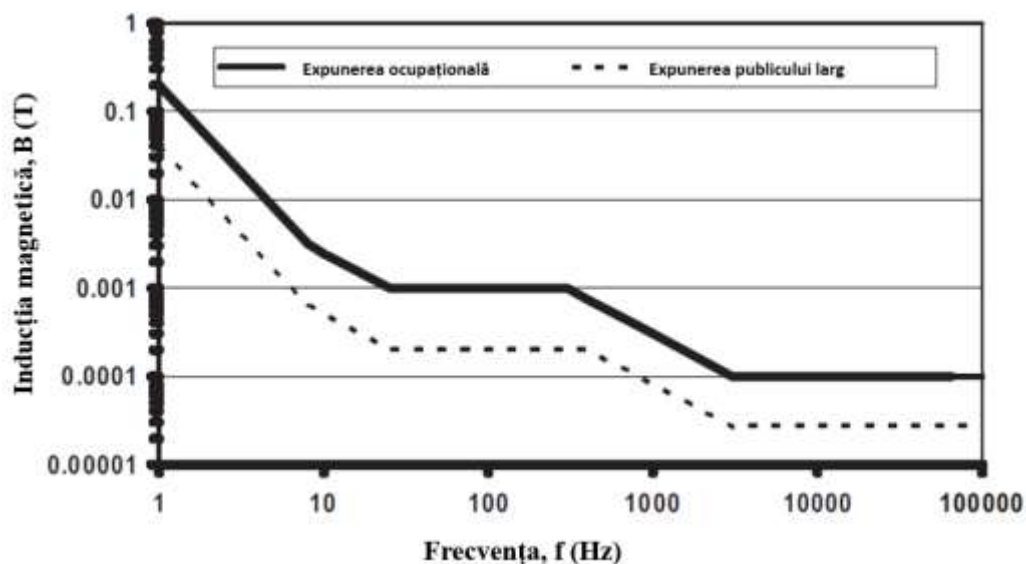
Nivelurile de referință prezentate, pentru limitarea expunerii la CEM, sunt aplicabile atât expunerii ocupaționale, cât și expunerii publicului larg. Acestea sunt tratate separat, atât pentru expunerea ocupațională cât și pentru expunerea publicului larg. Expunerea ocupațională se referă la adulții expuși la câmpuri electrice și magnetice cu frecvențe de la 1 Hz până la 10 MHz la locurile de muncă, în condiții cunoscute, ca urmare a desfășurării activităților acestora. Prin contrast, termenul public se referă la oameni de toate vârstele, dar cu stări de sănătate diferite, ceea ce ar putea crește variabilitatea susceptibilităților individuale. În majoritatea cazurilor, această categorie nu este conștientă de expunerea la CEM. Aceste considerații stau la baza adoptării unor restricții de expunere mai stricte pentru publicul larg, față de cei ce lucrează în condiții de expunere ocupațională.

Tabelele 2.1 și 2.2 prezintă nivelurile de referință pentru expunerea ocupațională și, respectiv, publică, iar nivelurile de referință sunt ilustrate în Figurile 2.2 și 2.3. Nivelurile de referință presupun o expunere printr-un câmp uniform în raport cu extinderea spațială a corpului uman.

Atunci când nivelurile de referință pentru limitarea expunerii în care variația câmpului electric sau magnetic în spațiul unde se află corpul uman sunt relativ mici, iar distanța până la sursa câmpului este atât de apropiată încât distribuția câmpului nu este uniformă sau este localizată doar pe o mică parte a corpului, măsurarea intensității maxime a câmpului electric sau magnetic în poziția corpului prezent în acest spațiu are ca rezultat întotdeauna o evaluare a expunerii ce nu depășește nivelurile de referință pentru limitarea expunerii.

**Tabel 2.1.** Nivelurile de referință pentru expunerea ocupațională la câmpurile electrice și magnetice

Domeniul de frecvență	Intensitatea câmpului electric E (kV/m)	Intensitatea câmpului magnetic H (A/m)	Inducția magnetică B (T)
1 Hz – 8 Hz	20	$1,63 \times 10^5/f^2$	$0,2/f^2$
8 Hz – 25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2,5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz – 300 Hz	$5 \times 10^2/f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2,4 \times 10^5/f$	$0,3/f$
3 kHz – 10 MHz	$1,7 \times 10^{-1}$	80	$1 \times 10^{-4}$



**Figura 2.2.** Nivelurile de referință pentru expunerea la câmpuri electrice variabile în timp

**Tabel 2.2.** Nivelurile de referință pentru expunerea publicului larg la câmpurile electrice și magnetice

Domeniul de frecvență	Intensitatea câmpului electric E (kV/m)	Intensitatea câmpului magnetic H (A/m)	Inducția magnetică B (T)
1 Hz – 8 Hz	5	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz – 25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz – 50 Hz	5	$1,6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
25 Hz – 400 Hz	$2,5 \times 10^2/f$	$1,6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
400 Hz – 3 kHz	$2,5 \times 10^2/f$	$6,4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz – 10 MHz	$8,3 \times 10^{-2}$	21	$2,7 \times 10^{-5}$

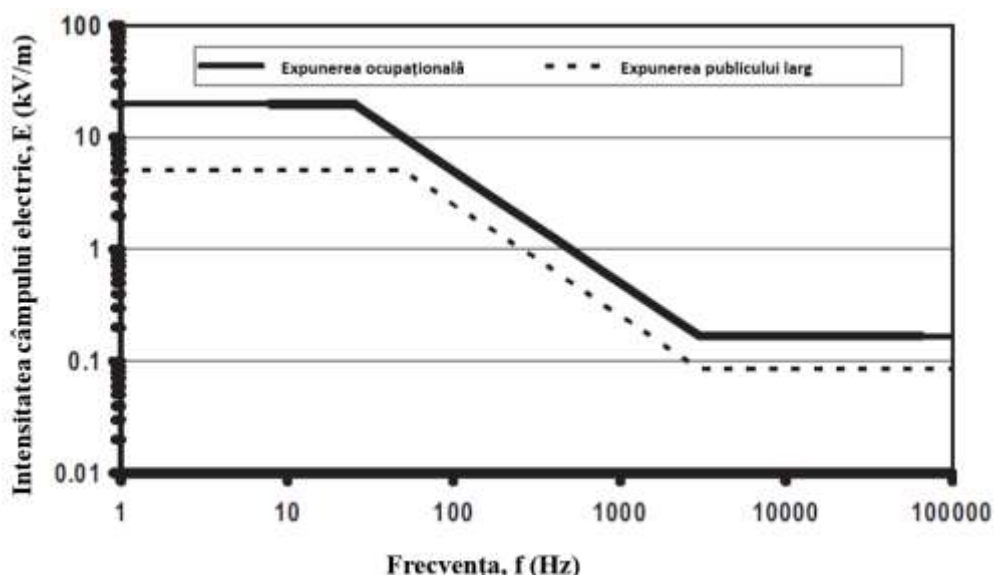


Figura 2.3. Nivelurile de referință pentru expunerea la câmpuri electrice variabile în timp

### 2.2.2. Hotărârea Guvernului României din iulie 2016

Hotărârea nr. 520 din 2016 [29] “privind cerințele minime de securitate și sănătate referitoare la expunerea lucrătorilor la riscuri generate de câmpuri electromagnetice” a fost adoptată de către Guvernul României în data de 16 iulie 2016. Aceasta transpune prevederile Directivei Europene nr. 35/2013 [28] în legislația națională, preluând integral anexele cu valorile-limită de expunere (ELV) și nivelurile de declanșare a acțiunii (AL). Aceste noi norme înlocuiesc cerințele de securitate și sănătate referitoare la expunerea lucrătorilor la câmpuri electromagnetice, stabilite prin HG 1136/2006.

Prin câmpurile electromagnetice din prezenta hotărâre se face referire la câmpuri electrice și magnetice statice, la câmpuri electrice, magnetice și electromagnetice variabile în timp cu frecvența până la 300 GHz.

În Tabelul 2.3. sunt prezentate nivelurile de declanșare a acțiunii (AL) pentru expunerea la câmpurile magnetice cu AL joase și AL înalte.

**Tabelul 2.3.** Niveluri de declanșare a acțiunii (AL) pentru expunerea la câmpuri magnetice cu frecvența (f) cuprinsă între 1 Hz - 10 MHz [28]

Domeniul de frecvență	Inducția magnetică AL joase, B (μT)	Inducția magnetică AL înalte, B (μT)	Inducția magnetică AL pentru expunerea membrelor la câmp magnetic localizat, B [μT]
$1 \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^5/f^2$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$25 \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

## CAPITOLUL 3

### Studiu de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice de joasă frecvență generate de linii electrice subterane

#### 3.1. Câmpuri magnetice generate de către LES, în zone rezidențiale și ocupaționale

Liniile electrice subterane sunt utilizate pe scară largă în zonele urbane, dar nu au fost studiate la fel de mult ca alte surse de câmp electromagnetic.

Liniile electrice subterane sunt utilizate pentru aplicații în care este imposibil, dificil sau nesigur să se utilizeze linii electrice aeriene. Ele sunt utilizate în zonele rezidențiale dens populate, în rețelele de distribuție de joasă și medie tensiune [20]. LES-urile ca și LEA-urile produc câmpuri electrice și magnetice de joasă frecvență.

În ceea ce privește câmpurile electrice, efectul de ecranare realizat datorită principiului *cuștii Faraday* este foarte puternic, ecranarea este produsă în principal de ecranul metalic conductiv care protejează orice cablu subteran (atunci când este legat la pământ, folosit și pentru curentul de defect de scurtcircuit), sau de pământul în care este îngropat cablul. În schimb, câmpurile magnetice nu sunt atenuate și se reduc doar odată cu distanță. În general, câmpurile magnetice provenite de la cablurile de alimentare subterane scad mult mai rapid cu distanța comparativ cu cele generate de o linie electrică aeriană echivalentă, dar pot atinge valori mai mari deasupra cablurilor [21,22].

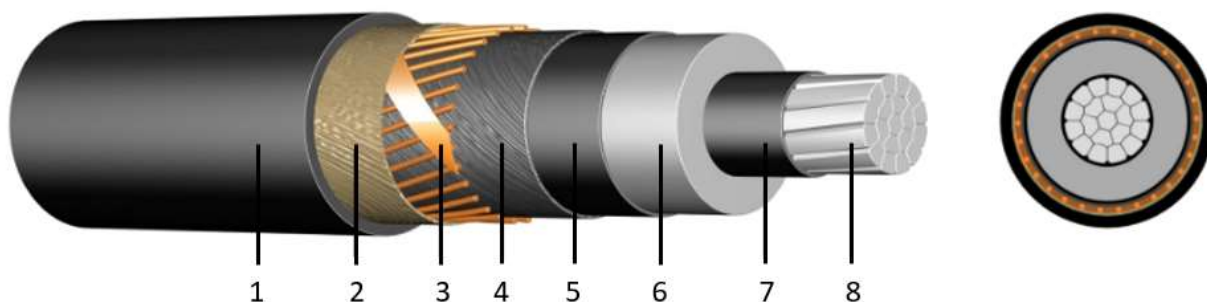
Pe măsură ce cererea de energie electrică în centrele urbane crește, luând în considerare și dificultățile în instalarea de noi linii electrice aeriene din cauza problemelor de autorizare, utilizarea cablurilor subterane este din ce în ce mai frecventă. Prin urmare, interesul față de calculul câmpurilor magnetice generate de cablurile de alimentare subterane este important nu numai pentru cuantificarea nivelurilor de expunere actuale, ci și pentru dezvoltarea metodelor de atenuare a influenței lor asupra mediului înconjurător.

În acest capitol, este propusă o abordare FEM simplă și totuși eficientă pentru a calcula și analiza (din perspectiva expunerii publice) câmpul magnetic E<sub>JF</sub> asociat cu configurațiile tipice ale LES utilizate în sistemul energetic românesc. Calculele numerice sunt efectuate cu software-ul de simulare electromagnetică ANSYS Maxwell 2D, iar pentru validare, acestea sunt verificate, față de rezultatele analitice obținute, cu un instrument software bazat pe legea Biot-Savart și principiul de suprapunere, dezvoltat cu ajutorul software-ului LabView [23].

### 3.2. Modelul LES selectat pentru analiză

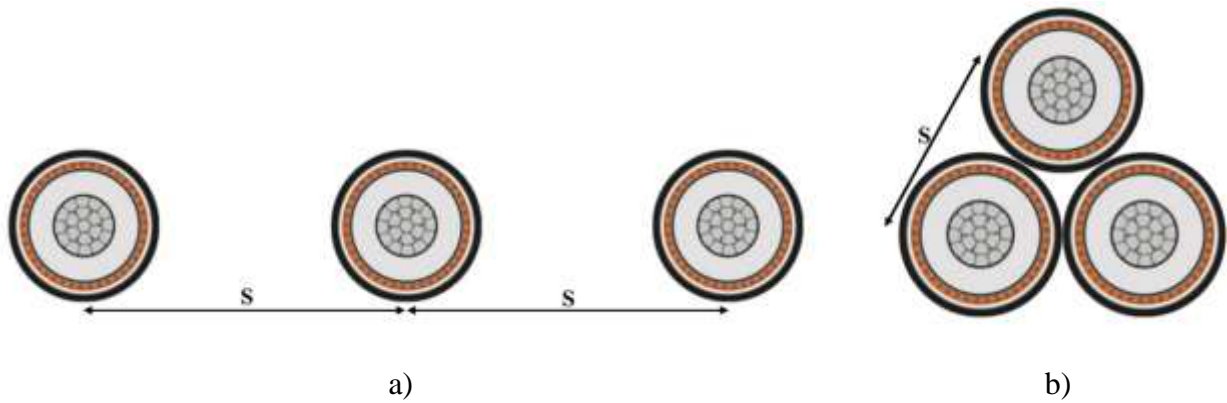
Linia electrică subterană de 12/20 kV selectată (adesea găsită în medii urbane) are o geometrie impusă de tipul conductoarelor, de tip NA2XS(F)2Y. Aceasta este un cablu de medie tensiune cu conductor central din aluminiu, ecran din cupru, izolație centrală din polietilenă reticulată (XLPE) și manta din polietilenă de înaltă densitate (HDPE) cu secțiunea de 150 mm<sup>2</sup> (15,4 mm diametru conductor central).

Figura 3.1 prezintă cablul NA2XS(F)2Y și cele opt straturi din care este construit (1 – Manta din polietilena de înaltă densitate (HDPE); 2 – Bandă expandabilă semi-conductivă asigurând impermeabilitate longitudinală; 3- Ecran din sârme de cupru și contra spira din bandă de cupru; 4 – Bandă expandabilă semi-conductivă asigurând impermeabilitate transversală; 5 – Strat exterior din material semi-conductiv; 6 – Izolație a conductorului din polietilenă reticulată XLPE; 7 – Strat interior din material semi-conductiv; 8 – Conductorul central din aluminiu.



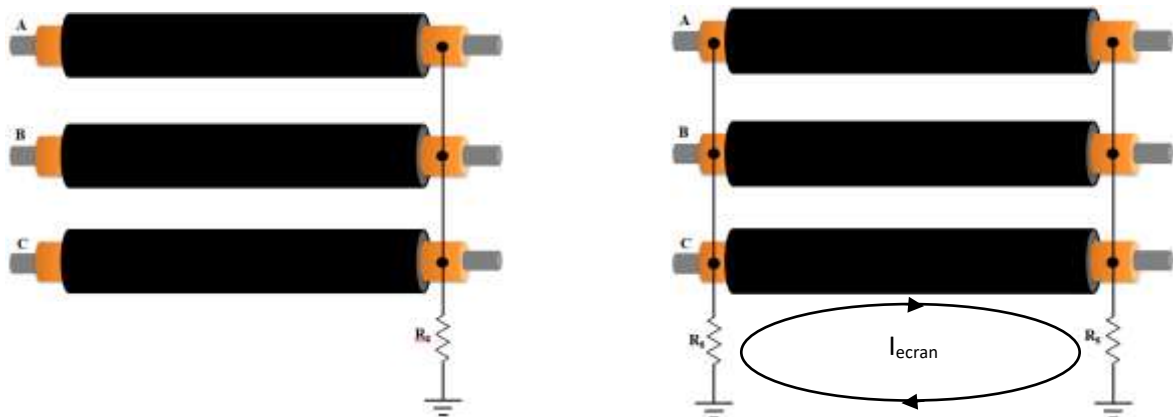
**Figura 3.1.** Cablu NA2X(F)2Y

Disponerea sistemului de cabluri trifazate se pot face în mai multe tipuri de formațiuni. Alegerea formațiunii depinde de mai mulți factori, cum ar fi: spațiul disponibil pentru instalare, aria conductorului, curentul maxim admisibil și metoda de conectare a ecranului. [24,25]. Cele mai utilizate formațiuni sunt atunci când cablurile sunt în același plan orizontal, așa cum se prezintă în Figura 3.2.a și în cazul când cele trei cabluri sunt plasate în colțurile unui triunghi echilateral, așa cum se prezintă în Figura 3.2.b.

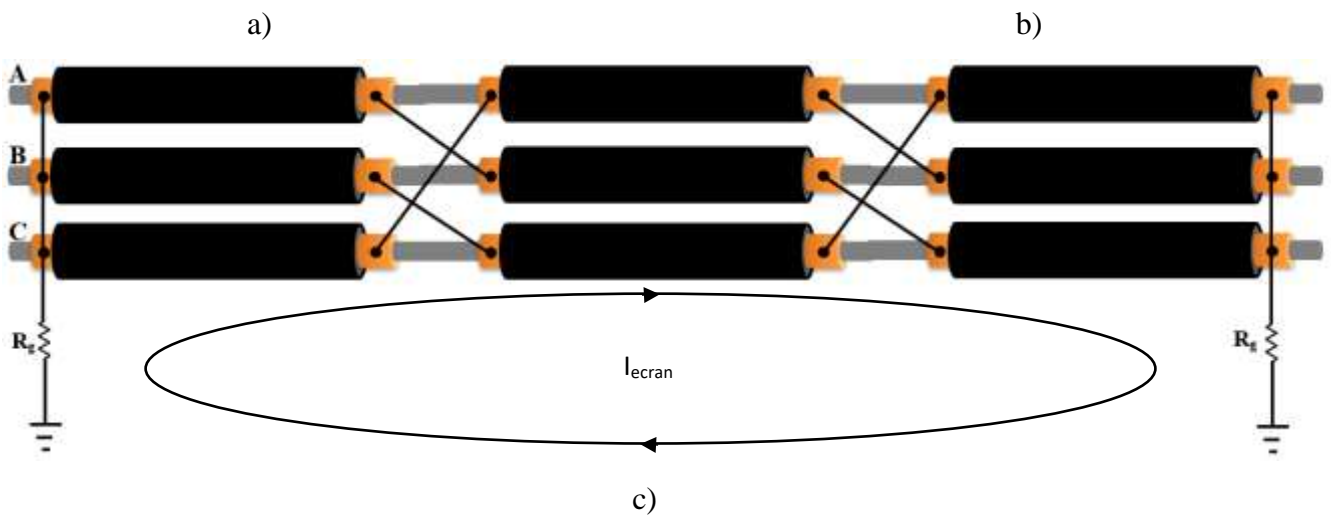


**Figura 3.2.** LES trifazată 12/20 kV a) dispunere orizontală b) dispunere treflă (triunghi)

Conectare ecranelor cablurilor la pământ se poate face în trei feluri (conectarea ecranelor la un singur capăt, conectarea ecranelor la ambele capete și conectarea ecranelor încrucișată), așa cum se prezintă în Figura 3.3. Conectarea la un singur capăt se utilizează pentru lungimi mici de LES, deoarece tensiunea se induce pe ecranul metallic din cauza lungimii LES și apare riscul de electroșoc, ceea ce poate duce la defecțiunile cablurilor. Conectare la ambele capete și conectarea încrucișată pot fi utilizate pentru linii lungi de LES. Valoarea curentului indus în ecran în cazul legăturii încrucișate a ecranelor, este mai mică decât valoarea curentului indus în ecran în cazul conectării la ambele capete a ecranelor, dar valoarea tensiunii induse a conectării ecranelor la ambele capete este mai mică decât tensiunea indusă a conectării ecranelor încrucișate. Prin urmare, metoda de conectare a ecranelor la ambele capete este cea mai utilizată pentru LES.







**Figura 3.3.** Conectare ecranelor LES: a) conectare ecranelor la un singur capăt; b) conectarea ecranelor la ambele capete; c) conectarea ecranelor încrucișată

Pentru implementarea modelului și validarea acestuia se presupune că LES are curenții exact echilibrați, adică:  $I_1 = I \angle -120^\circ$ ,  $I_2 = I \angle 0^\circ$  și  $I_3 = I \angle 120^\circ$ . Calculele vor fi efectuate la curentul nominal maxim (352 A și respectiv 319 A), presupunând că adâncimea reală de pozare nu are o influență semnificativă asupra curentului maxim admisibil de sarcină. Aceasta, prin reducerea temperaturii ambiante și a rezistenței termice specifice mai favorabile a solului, la adâncimi de pozare mai mari (conform [26], adâncimea obișnuită de pozare a LES este de aproximativ 0,7 m ÷ 1,2 m), este compensată. De asemenea, solul este considerat a fi omogen atât din punct de vedere electric cât și amagnetic.

### 3.3. Model ANSYS Maxwell 2D pentru determinarea câmpului magnetic generat de LES

ANSYS Maxwell 2D este un software de simulare a câmpului electromagnetic de joasă frecvență, de înaltă performanță, care utilizează metoda elementelor finite (FEM) pentru rezolvarea problemelor electromagnetice de joasă frecvență, prin specificarea geometriei, proprietăților materialelor și excitațiilor adecvate [27]. Prin urmare, poate servi ca instrument adecvat pentru calcularea expunerii la câmpurile magnetice provenite din LES. În continuare se prezintă dezvoltarea unui model Maxwell 2D pentru calcularea câmpurilor magnetice generate de LES. Modelul este implementat pentru cazul particular al unei LES 12/20 kV, utilizată pentru distribuția primară a energiei, dar poate fi aplicat cu ușurință oricăror alte LES-uri.

Calculul câmpului magnetic este rezolvat folosind solver-ul “eddy current”, care permite calcularea câmpurilor magnetice variabile în timp la o frecvență constantă dată, în acest caz 50 Hz. De asemenea, calculează densitățile de curent ținând cont de efectele curenților turbionari în

conductorii solizi (inclusiv efectele de înveliș și de proximitate) precum și alte cantități care pot fi derivate din soluția câmpului magnetic. O tehnică adaptivă de rafinare a rețelei este utilizată pentru a obține cea mai bună rețea necesară pentru a îndeplini nivelul de precizie definit.

Mărimile pe care solver-ul “eddy current” le rezolvă sunt potențialul vectorial magnetic ( $\mathbf{A}$ ) rezultat din inducția magnetică ( $\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}$ ) și potențialul scalar electric ( $V$ ). O primă ecuație folosită în acest scop, derivată din ecuațiile lui Maxwell, este:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = (\sigma + j\omega\varepsilon)(-j\omega\mathbf{A} - \nabla V) \quad (1)$$

unde:  $\mu$  este permeabilitatea magnetică absolută,  $\sigma$  este conductivitatea electrică,  $\omega=2\pi f$  este pulsația la care toate mărimile oscilează și  $\varepsilon$  este permitivitatea electrică absolută.

După cum se poate observa în partea dreaptă, ecuația constă într-o conductivitate complexă,  $(\sigma + j\omega\varepsilon)$ , înmulțită cu valoarea complexă a intensității câmpului electric. Adică  $\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \nabla V$ . Prin urmare, rezultatul este densitatea complexă de curent ( $\mathbf{J}$ ), care este suma a trei componente:

- $J_s = -\sigma\nabla V$ , densitatea curentului sursei datorită diferențelor de potențial electric;
- $J_e = -j\omega\sigma\mathbf{A}$ , densitatea curentului turbionar indus datorită câmpurilor magnetice variabile în timp;
- $J_d = j\omega\varepsilon(-j\omega\mathbf{A} - \nabla V)$ , densitatea curentului de deplasare datorită câmpurilor electrice variabile în timp.

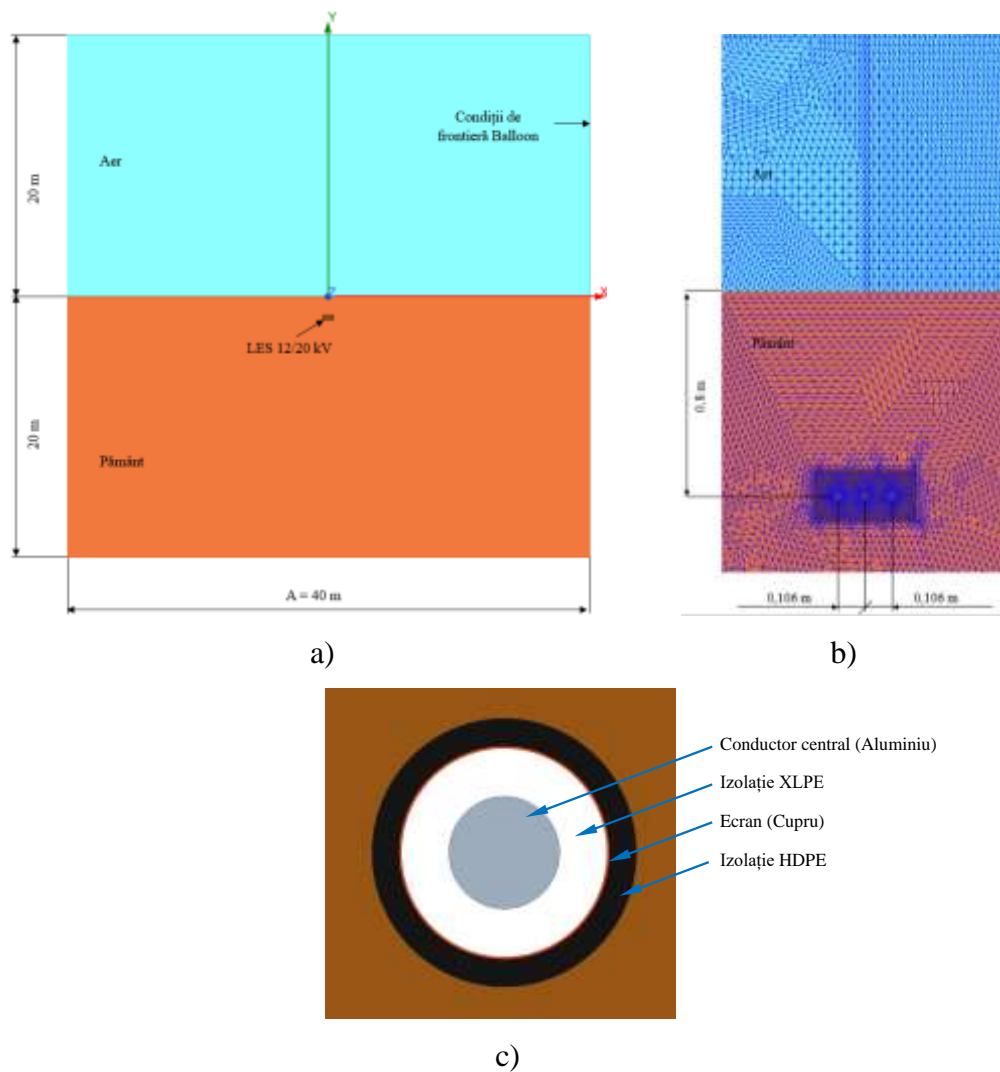
Deoarece curentul total ( $I_T$ ) care curge în orice conductor care este conectat la o sursă externă este specificat la stabilirea problemei, o a doua ecuație utilizată de modulul de curenți turbionari pentru a rezolva pentru  $\mathbf{A}$  și  $V$  este:

$$I_t = \int_S \mathbf{J} dS = \int_S (\sigma + j\omega\varepsilon)(-j\omega\mathbf{A} - \nabla V) \quad (2)$$

care afirmă, practic: curentul total dintr-un conductor este egal cu integrala lui  $\mathbf{J}$  pe aria secțiunii transversale a conductorului,  $S$ .

Deoarece se presupune că inducția magnetică,  $\mathbf{B}$ , se află în planul  $xy$ , potențialul vectorial magnetic  $\mathbf{A}$  are doar o componentă în direcția  $z$ . Prin urmare, solver-ul „eddy current” va rezolva numai pentru  $A_z(x,y)$ . De asemenea,  $\mathbf{E}$  are doar o componentă  $z$ , ceea ce înseamnă că  $V$  este constantă pe întreaga secțiune transversală a unui conductor. Prin urmare, aceasta nu este necesar să se rezolve pentru  $V$  la fiecare nod.

Modelul global FEM al sistemului de cablu trifazat este prezentat în Figura. 3.5a, unde domeniul de calcul este un pătrat cu latura de 40 m, suficient de mare pentru a determina comportamentul câmpului magnetic în afara axei centrale a cablului. Jumătate superioară a domeniului din Figura 3.4a modelează aerul. Adâncimea modelului (lungimea cablului) este de 1 metru. O secțiune discretizată în jurul cablurilor de alimentare este prezentată în Figura 3.4b.



**Figura 3.5** Modelul 2D FEM pentru calculul câmpurilor magnetice generate de LES cu ecranele conectate la ambele capete la pământ: a) model geometric global; b) secțiune discretizată în jurul LES; c) model de cablu simplificat

### Calculul valorii efective a inducției magnetice

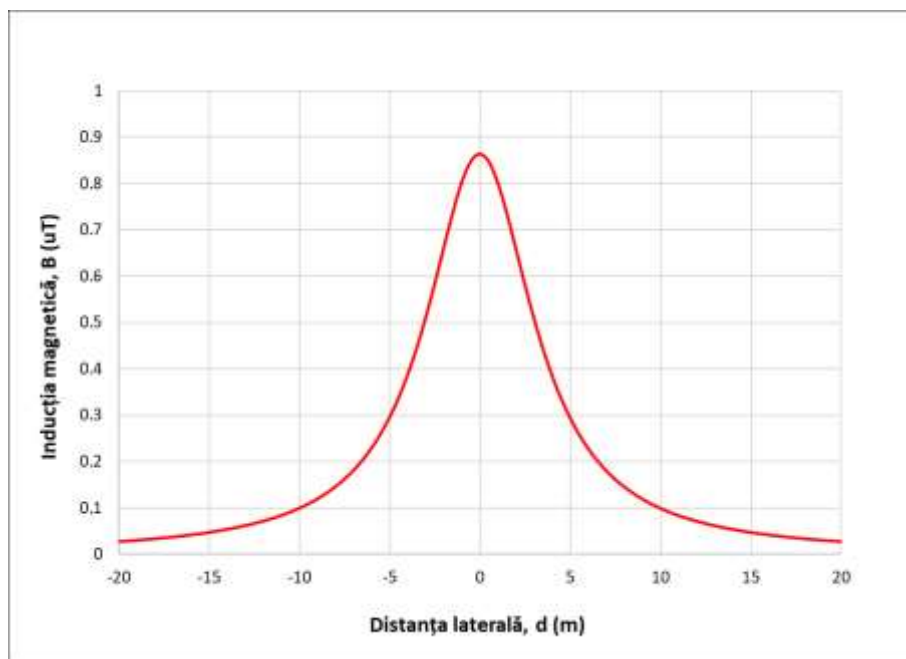
Conform procedurilor obișnuite de evaluare aplicate în studiile de expunere la câmp magnetic, suntem interesați în principal de calcularea profilurilor laterale valorii efective a inducției magnetice la diferite înălțimi deasupra solului, în special la înălțimea standard de 1 metru. Astfel de profiluri ale valorii efective a inducției magnetice sunt procesate separat cu ajutorul programului Microsoft Excel, unde, un număr de 73 de profiluri de densitate a fluxului magnetic instantaneu (generate pe o perioadă de 20 ms) sunt importate și apoi „sumate” împreună cu formula [43]:

$$B_{RMS}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_n^2(i)} \quad (3.1)$$

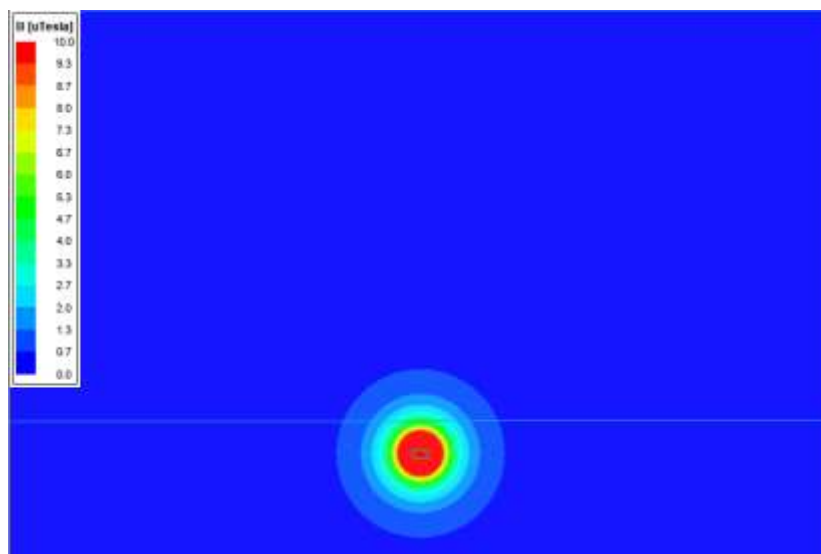
unde  $B_1(n), \dots, B_N(i)$  sunt valorile instantanee ale inducției magnetice corespunzătoare punctului  $i$  al profilului;  $N$  reprezintă numărul total de profiluri. Aici folosim  $N = 73$  de profiluri.

Așadar, pentru  $I = 319$  A, în Figura 3.6 este prezentat profilul lateral al inducției magnetice calculat pe baza celor 73 de profiluri laterale ale inducției magnetice instantanee până la 10 m față de axa centrală a LES în dispunere treflă, la înălțimea de 1 metru deasupra solului, profiluri generate de către programul ANSYS Maxwell. În Figura 3.7 este prezentată distribuția inducției magnetice în jurul LES la momentul  $t = 16,94$  ms, unde se obține inducția magnetică maximă din Figura 3.10.

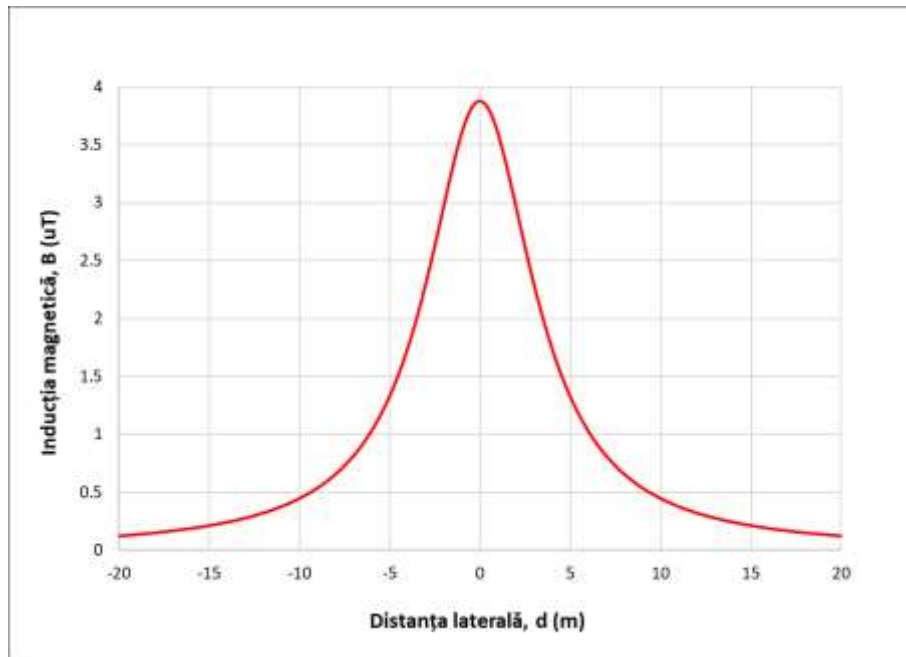
Pentru dispunerea orizontală se adoptă  $I = 352$  A, în Figura 3.8 este prezentat profilul lateral al inducției magnetice, în Figura 3.14 este prezentată distribuția inducției magnetice în jurul LES la momentul  $t = 15,56$  ms, unde se obține inducția magnetică maximă din Figura 3.9.



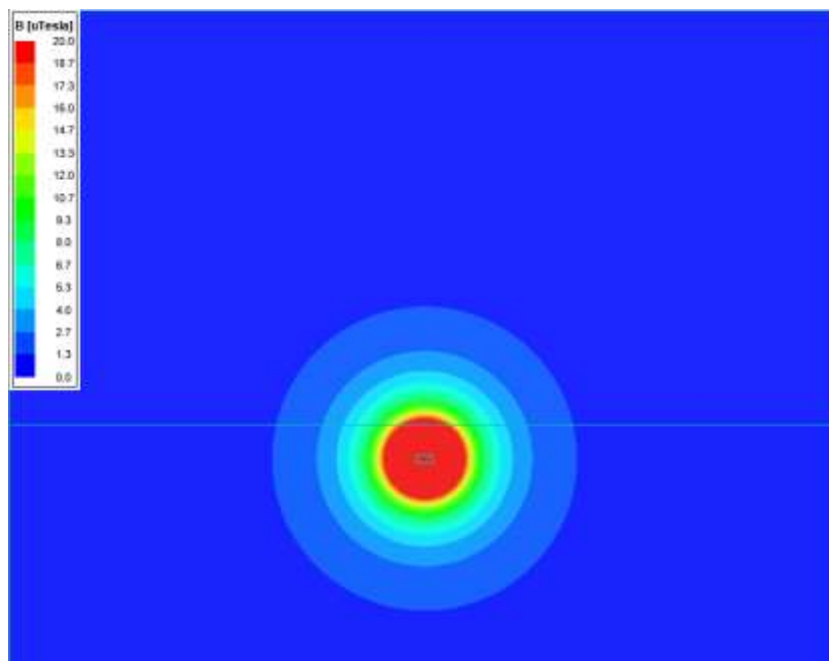
**Figura 3.6.** Profil lateral al valorii efective a inducției magnetice (dispunere treflă)



**Figura 3.7.** Distribuția câmpului magnetic în jurul LES 20 kV (dispunere treflă),  $t = 16,94$  ms



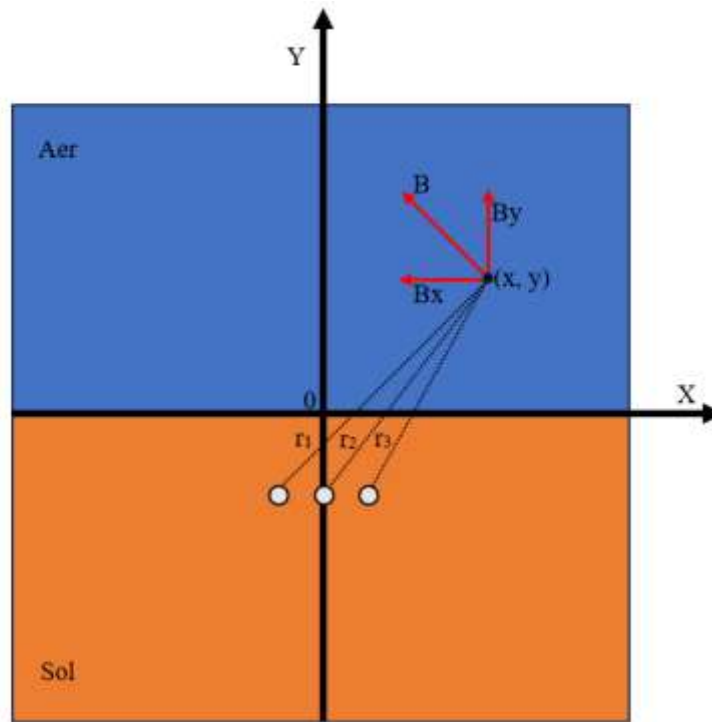
**Figura 3.8.** Profil lateral a valorii efective, a inducției magnetice (dispunere orizontală)



**Figura 3.9.** Distribuția câmpului magnetic în jurul LES (dispunere orizontală),  $t = 15,56$  ms

### 3.4. Calculul analitic al câmpului magnetic generat de LES 20 kV

Pentru a verifica rezultatele numerice obținute cu modelul FEM, a fost dezvoltat un instrument software interactiv utilizând legea Biot-Savart și principiul superpoziției. Se presupune că toate cablurile electrice subterane sunt drepte și de lungime infinită, inducția magnetică în orice punct de măsurare,  $P(x, y)$  din vecinătatea unui sistem de cabluri trifazate cu ecranele conectate la ambele capete poate fi calculată după cum urmează (Figura 3.10):



**Figura 3.10.** Calculul analitic al inducției magnetice în vecinătatea unei linii electrice subterane

Conform sistemului de coordonate carteziene din Figura 3.15, componentele orizontale și verticale ale inducției magnetice în orice punct de măsurare P (x, y) pot fi calculate prin formulele de mai jos:

$$\vec{B}_x = \sum_{i=1}^3 \frac{-\mu_0 I_i + I_{shi}}{2\pi} \left[ \frac{y-y_i}{r_i^2} \right]; \quad (3.2)$$

$$\vec{B}_y = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_0 I_i + I_{shi}}{2\pi} \left[ \frac{x-x_i}{r_i^2} \right], \quad (3.3)$$

unde:  $x_i$  și  $y_i$  sunt coordonatele conductorului  $I_i$ ,  $I_{shi}$  este curentul indus în ecranul conductorului  $I_i$ ,  $x$  și  $y$  sunt coordonatele punctului de măsurare P,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m este permeabilitatea magnetică a spațiului liber, iar  $r_i$  este distanța de la conductorul  $i$  la punctul de măsurare P (x, y),  $r_i$  se determină ca:

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (3.4)$$

Inducția magnetică totală rezultantă este dată de relația:

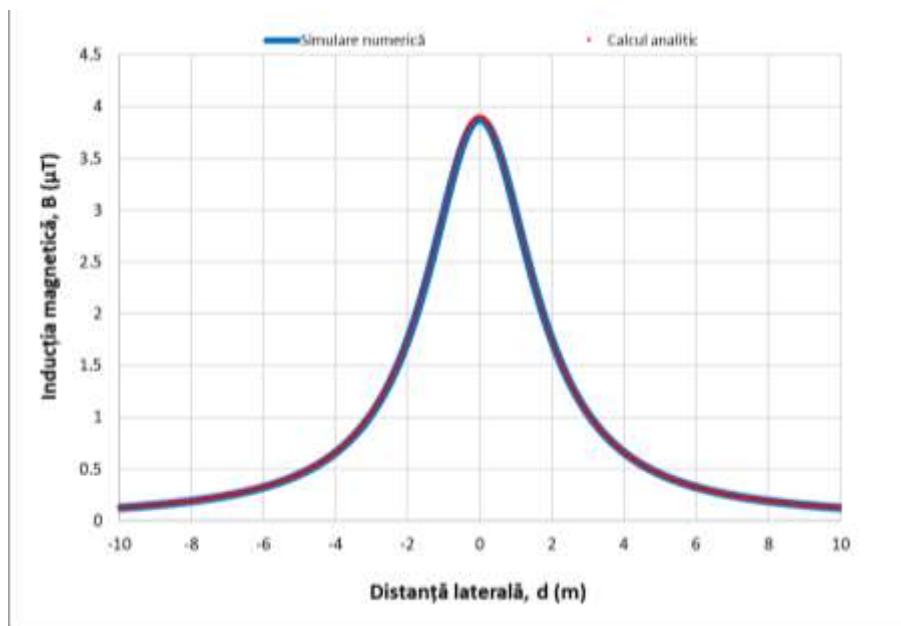
$$B = \sqrt{|\vec{B}_x|^2 + |\vec{B}_y|^2} \quad (3.5)$$

Pentru calcularea curenților induși în ecran s-a utilizat [24,28]. Atunci când sistemul trifazat LES este echilibrat, fiecare conductor, poate fi privit ca o linie de întoarcere a celorlalte două, deci:

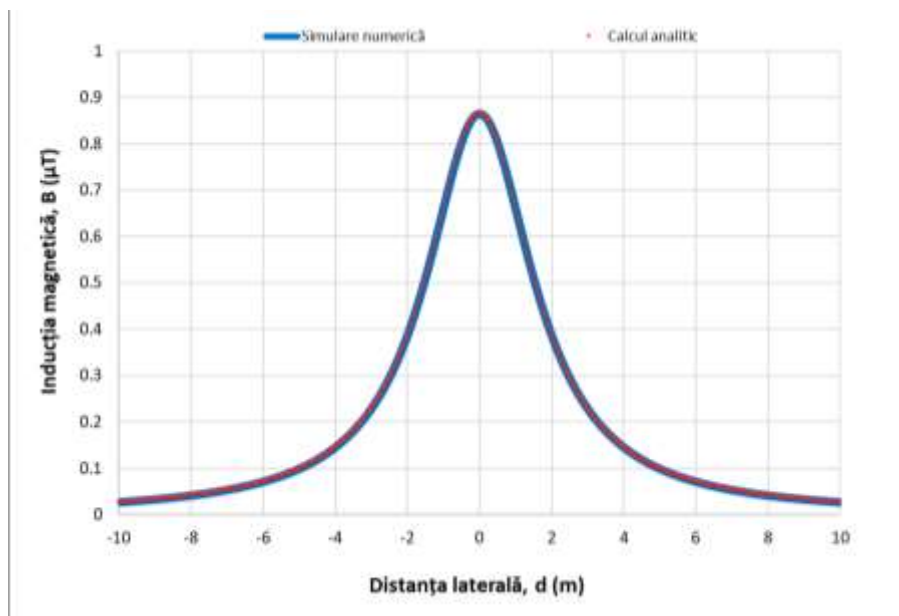
### 3.5. Compararea rezultatelor în urma calculului câmpului magnetic realizat prin simulare numerică, față de cel calculat analitic, generat de LES 12/20 kV

Comparațiile dintre rezultatele simulării numerice și rezultatele calculelor analitice (profile laterale ale valorii efective a inducției magnetice la înălțimea de 1 metru deasupra solului), pentru conductoarele în dispunere treflă, sunt prezentate în Figura 3.11, iar pentru cele în dispunere orizontală în Figura 3.12. Curenții induși de ecrane, calculați prin ambele metode, sunt prezentați în Tabelul 3.1 și, respectiv, în Tabelul 3.2.

După cum se observă, rezultatele obținute prin cele două metode (simulare numerică și calcul analitic) sunt într-o foarte bună concordanță. Cea mai mică diferență a valorii efective a inducției magnetice la axa centrală a cablului se obține pentru dispunerea treflă (Figura 3.11), și anume 2,36 nT. Pentru cablul de alimentare subteran trifazat în dispunere orizontală (Figura 3.12), diferența valorii efective a inducției magnetice la linia centrală este de 26,49 nT. În ambele cazuri s-au obținut rezultate mai mici ale valorii efective a inducției magnetice prin simulare numerică. În mod clar, aceste diferențe sunt prea mici pentru orice scop practic legat de evaluarea expunerii la câmpul magnetic, dar putem presupune o evaluare ușor diferită a interacțiunii electromagnetice dintre modele (curenții turbionari din ecrane sunt neglijați în modelul calculului analitic).



**Figura 3.11.** Comparații între profilurile laterale ale valorii efective a inducției magnetice obținute prin simulare numerică și calcul analitic pentru dispunerea orizontală



**Figura 3.12.** Comparații între profiluri laterale ale valorii efective a inducției magnetice obținute prin simulare numerică și calcul analitic pentru dispunerea treflă

**Tabelul 3.1.** Curenții induși în ecran obținuți prin calcul analitic și prin simulare numerică (dispunere orizontală)

Conductor	Curentul prin conductor		Curentul prin ecran (calcul analitic)		Curentul prin ecran (simulare numerică)	
	Valoare efectivă (A)	Faza (°)	Valoare efectivă (A)	Faza (°)	Valoare efectivă (A)	Faza (°)
<b>1</b>	352	120	61,45	10,20	61,35	10,18
<b>2</b>	352	0	44,76	-97,30	44,70	-97,31
<b>3</b>	352	-120	64,23	148,55	64,13	148,53

**Tabelul 3.2.** Curenții induși în ecran obținuți prin calcul analitic și prin simulare numerică (dispunere treflă)

Conductor	Curentul prin conductor		Curentul prin ecran (calcul analitic)		Curentul prin ecran (simulare numerica)	
	Valoare efectivă (A)	Faza (°)	Valoare efectivă (A)	Faza (°)	Valoare efectivă (A)	Faza (°)
<b>1</b>	319	120	20,87	26,25	20,81	25,88
<b>2</b>	319	0	20,87	-93,75	20,81	-94,75
<b>3</b>	319	-120	20,87	146,25	20,81	145,37

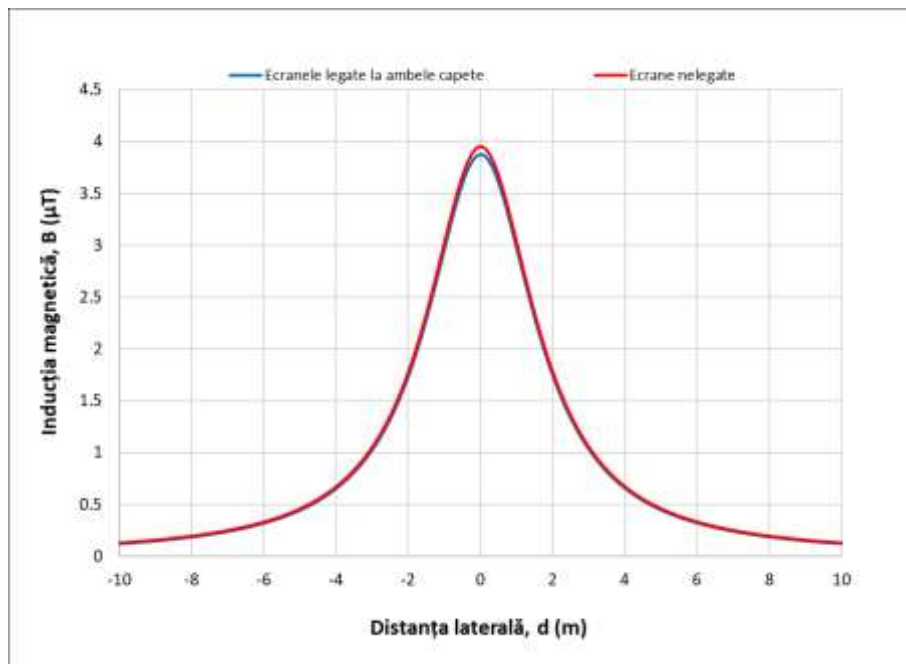


La curentul nominal maxim (352 A), câmpul magnetic de la axa centrală a LES în dispunere orizontală este scăzut în comparație cu limita ICNIRP 2010 pentru publicul larg (200  $\mu\text{T}$  la 50 Hz) [19], variind de la 10,41  $\mu\text{T}$  la nivelul solului (0 metri înălțime) până la 1,60  $\mu\text{T}$  la înălțimea de 2 metri față de sol. La înălțimea standard de 1 metru, valoarea efectivă a inducției magnetice la linia centrală este de 3,88  $\mu\text{T}$  (de 51,6 ori sub nivelul de referință ICNIRP), ajungând la 0,06% din limita ICNIRP la distanța laterală de 10 metri față de LES. Niveluri de expunere mai scăzute pot fi observate pentru LES în dispunere treflă (curent nominal maxim de 309 A), caz în care valoarea efectivă a inducției magnetice variază de la 4,38  $\mu\text{T}$  la nivelul solului până la 0,36  $\mu\text{T}$  la înălțimea de 2 metri față de sol. La înălțimea standard de 1 metru, valoare efectivă a inducției magnetice la linia centrală este de 0,86  $\mu\text{T}$  (de 232 ori sub nivelul de referință ICNIRP), în timp ce la distanța laterală de 10 metri față de LES scade la doar 0,014% din limita ICNIRP. Aceste valori ar trebui considerate niveluri maxime de expunere din astfel de configurații comune ale cablurilor de alimentare subterane trifazate de 12/20 kV.

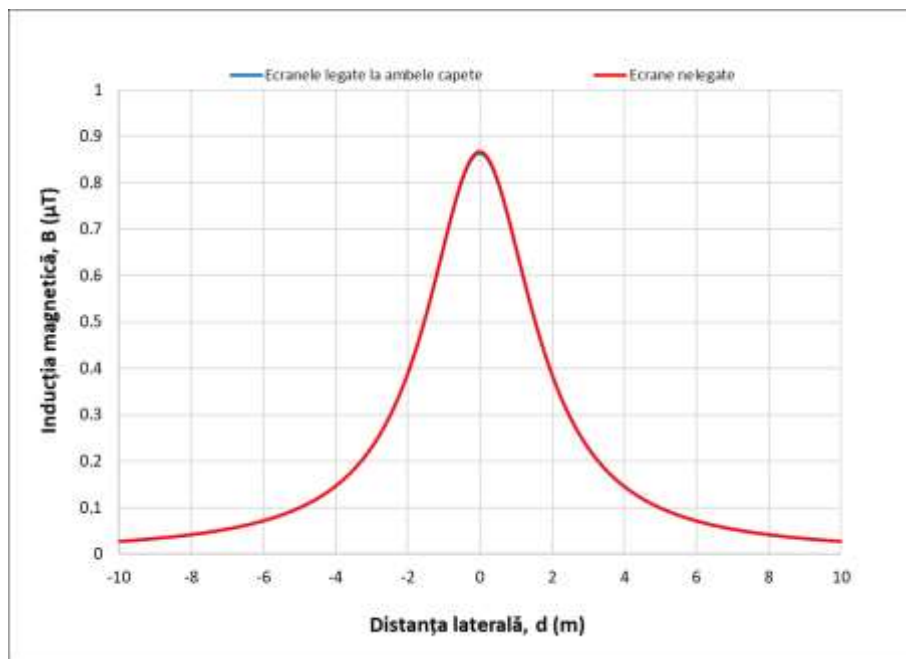
Pentru a ilustra efectul ecranului asupra reducerii câmpului magnetic, Figura 3.13 compară profilurile laterale ale valorii efective a inducției magnetice în cazul dispunerii orizontale, iar Figura 3.14 compară profilurile laterale ale valorii efective a inducției magnetice în cazul dispunerii treflă, ambele obținute prin simulare numerică, cu ecranele legate la ambele capete și cu ecranele nelegate.

După cum se arată în Figura 3.13, efectul de reducere a câmpului magnetic, în cazul dispunerii orizontale, este de 1,83% mai mic decât câmpul magnetic creat de LES cu ecranele nelegate. Pentru dispunerea treflă efectul de reducere este mai mic, anume 0,41%. Dacă presupunem teoretic că atât conductorii centrali, cât și ecranele funcționează la o temperatură de 20°C (prin urmare prezintă o rezistivitate mai mică), aceste cifre cresc până la 2,76% și, respectiv, 0,62%.

În comparație cu simularea numerică, programul bazat pe formule standard oferă rezultate mult mai rapide, dar poate fi aplicat doar la formațiuni simple în dispunere orizontală și treflă de LES (în condiții de încărcare echilibrată). Pe de altă parte, simularea numerică este mult mai flexibilă, permițând să se ia în considerare diferite aspecte ale cablurilor (armatură, dezechilibru de curent etc.), și poate fi extins cu ușurință la diferite tipuri de aranjamente de cabluri. Două astfel de exemple vor fi prezentat în cele ce urmează.



**Figura 3.13.** Comparații între profiluri laterale ale valorii efective a inducției magnetice obținute prin simulare numerică cu ecranele legate la ambele capete, respectiv cu ecranele nelegate pentru dispunerea orizontală



**Figura 3.14.** Comparații între profiluri laterale ale valorii efective a inducției magnetice obținute prin simulare numerică cu ecranele legate la ambele capete, respectiv cu ecranele nelegate pentru dispunerea treflă

## CAPITOLUL 4

### **Studii de caz privind evaluarea câmpurilor magnetice și electrice de joasă frecvență generate de linii electrice aeriene**

#### **4.1. Câmpuri magnetice și electrice generate de LEA în zone rezidențiale și ocupaționale**

Liniile electrice aeriene de înaltă tensiune (LEA) sunt surse majore de câmpuri electrice și magnetice de frecvență joasă, care pot induce curenți electrici în corpul uman.

În acest capitol, este propusă o abordare simplă, dar eficientă, cu elemente finite pentru a calcula și analiza (din perspectiva expunerii publice) atât câmpurile electrice, cât și câmpurile magnetice asociate cu configurațiile tipice ale LEA utilizate în sistemul energetic românesc.

Este dezvoltat un model 2D ANSYS Maxwell ce va fi utilizat pentru a investiga expunerea la câmpurile electrice și magnetice emise de o selecție de LEA cu tensiuni nominale de 110 kV, 220 kV și 400 kV, luând în considerare factorii de influență precum încărcarea, aranjarea de faze și garda la sol.

Respectarea limitelor de expunere stabilite de Comisia Internațională pentru Protecția împotriva Radiațiilor Neionizante (ICNIRP) pentru publicul larg este evaluată pentru fiecare caz particular. Ca rezultat, toate câmpurile magnetice calculate sunt sub limita ICNIRP de 200  $\mu$ T, în timp ce nivelurile câmpului electric depășesc limita ICNIRP de 5000 V/m numai în zone limitate de sub liniile de 400 kV [19]. Câmpurile electrice și magnetice calculate sunt în conformitate cu cele regăsite în literatura științifică pentru LEA similare [31-34].

Electricitatea a devenit o parte integrantă a vieții moderne, dar generarea, transmiterea, distribuția și utilizarea energiei electrice pot expune oamenii la câmpuri electrice și magnetice (CEM) de frecvență extrem de joasă. Acestea interacționează cu țesuturile umane prin inducerea de curenți electrici. Câmpurile magnetice produse de LEA induc în corp curenți tip buclă, care au valori mari doar în zona de secțiune longitudinală cu arie mai mare (regiunea periferică a trunchiului), spre deosebire de câmpurile electrice alternative ce induc în corp curenți alternativi care circulă pe verticală, prin absolut toate organele corpului.

Vizând prevenirea efectelor stabilite asupra sănătății legate de expunerea pe termen scurt la CEM de valori mari, în principal curenți induși, Comisia Internațională pentru Protecția Radiațiilor Neionizante (ICNIRP) și Institutul Inginerilor Electrotehniști și Electroniști (IEEE) au formulat un ghid de instrucțiuni privind expunerea în 1998 [17], revizuit în 2010 [19] și, respectiv, 2002 [23].

Conform cunoștințelor științifice și informațiilor disponibile în acest moment, expunerea pe termen lung la CEM de frecvență joasă la niveluri sub limitele recomandate de aceste ghiduri este considerată sigură și acceptabilă în scopul protecției sănătății umane. Nu există dovezi stabilite că expunerea la CEM emise de liniile electrice, stații și posturi de transformare sau alte echipamente electrice, indiferent de proximitate, poate provoca orice efecte cunoscute asupra sănătății. Însă, există o dezbatere continuă cu privire la diverse abordări de precauție adecvate la aceste niveluri. În plus, publicul larg își exprimă adesea îngrijorarea cu privire la CEM, frecvent în contextul instalării de noi linii electrice aeriene de înaltă tensiune sau de locuire în vecinătatea acestora [36-38].

LEA sunt surse majore de câmpuri electrice și câmpuri magnetice EJM. Aceste câmpuri sunt mai mari sub linie și scad brusc odată cu distanța față de aceasta. Desigur, pe lângă distanță, există mulți alți factori care influențează CEM produse de LEA, inclusiv tensiunea, curentul, garda la sol, înălțimea deasupra solului, aranjarea fazelor, echilibrul în circuit, echilibrul între circuite, mănunchiul de conductoare, existența de linii paralele, rezistivitatea solului (conductivitate) etc. Mai mult, câmpurile electrice sunt protejate în mare măsură de clădiri, copaci, garduri și alte structuri din vecinătate, dar câmpurile magnetice trec prin majoritatea materialelor și nu pot fi atenuate la fel de ușor ca câmpurile electrice [48, 54-55].

Pentru a determina nivelurile de câmp electric și de câmp magnetic emise de LEA și pentru a evalua conformitatea cu limitele de expunere relevante, pot fi efectuate atât măsurători, cât și calcule [39-42]. Calculele sunt adesea preferabile măsurătorilor, deoarece pot fi efectuate pentru orice condiții dorite, în schimb măsurările sunt limitate la condițiile particulare din momentul măsurării. Calculele pot fi realizate atât prin metode analitice, cât și prin metode numerice, utilizând de obicei modele bidimensionale (2D) datorită simplității lor [43-50]. Foarte des, simulările numerice exploatează metoda elementelor finite (FEM), care este recunoscută pentru capacitatea sa de a genera distribuții precise 2D ale câmpurilor electrice și câmpurilor magnetice în secțiunea transversală a liniilor electrice aeriene și a altor sisteme putere-frecvență [42, 44-45].

În România, LEA sunt utilizate atât pentru transportul de energie, cât și pentru distribuția energiei. Transportul de energie se realizează printr-o lungime totală de 8903,964 km de LEA, cuprinzând [24]: 3,108 km de 750 kV; 4984,594 km de 400 kV; 3875,844 km de 220 kV și 40,418 km de 110 kV, unde 489,04 km servesc ca linii de interconectare. În plus, operatorii de distribuție a energiei folosesc 21759 km de LEA care funcționează la 110 kV.[51]

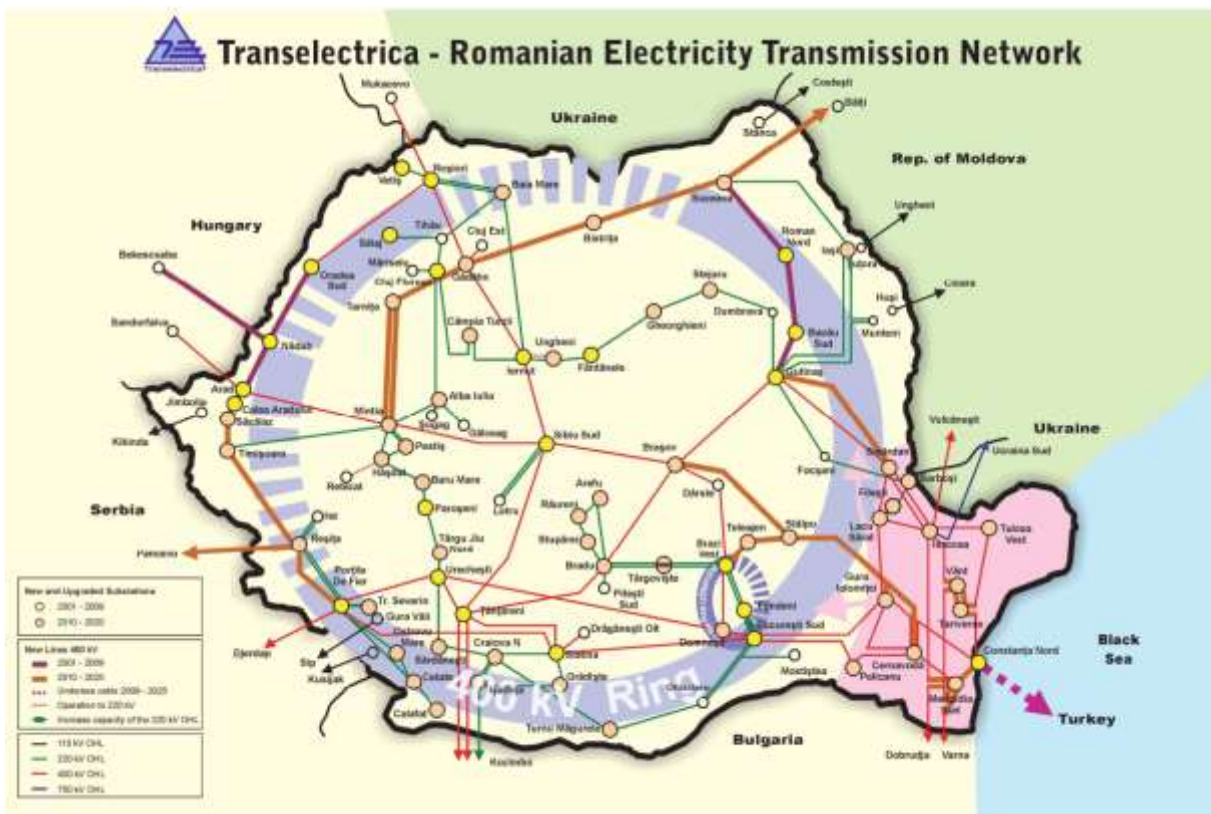


Figura 4.1. Harta națională a rețelei de transport[52]

În acest capitol, este propusă o abordare FEM simplă și totuși eficientă pentru a calcula și analiza (din perspectiva expunerii publice) câmpurile electrice și magnetice asociate cu configurațiile tipice ale LEA utilizate în sistemul energetic românesc. Calcululele numerice sunt efectuate cu software-ul de simulare electromagnetă ANSYS Maxwell 2D, în principal în ceea ce privește profilurile laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric și valoarea efectivă a inducției magnetice la înălțimea standard de 1 m deasupra nivelului solului. Merită să remarcăm că România, ca membră a UE, a transpus în legislația națională Recomandarea Consiliului din 12 iulie 1999 privind limitarea expunerii publicului larg la câmpuri electromagnetice (0 Hz la 300 GHz) [26], care stabilește limite de expunere derivate din ghidurile publicate de ICNIRP în 1998. Pentru câmpurile electrice și magnetice cu frecvență de putere, aceste limite sunt de 5 kV/m și, respectiv, 100  $\mu$ T.

Restul capitolului este organizat după cum urmează. În primul rând, s-a construit un model 2D ANSYS Maxwell pentru calcularea câmpurilor electrice și câmpurilor magnetice din jurul LEA. În continuare, acesta va fi folosit pentru a investiga nivelurile de expunere generate de o selecție de LEA cu tensiuni nominale de 110 kV, 220 kV și 400 kV. După cum s-a menționat deja, o atenție deosebită va fi acordată distribuției câmpului la o înălțime de 1 m deasupra solului, luând în considerare factorii de influență precum încărcarea, aranjarea de faze și garda la sol. Respectarea limitelor de expunere ICNIRP pentru publicul larg va fi evaluată pentru fiecare caz particular.

## 4.2. Model ANSYS Maxwell 2D pentru determinarea câmpului magnetic și câmpului electric generat de LEA

ANSYS Maxwell 2D este un software de simulare a câmpului electromagnetic de joasă frecvență, de înaltă performanță, care utilizează metoda elementelor finite (FEM) pentru rezolvarea problemelor electrice, magnetostatice, curenților turbionari și tranzitorii. Prin urmare, poate servi ca instrument adecvat pentru calcularea expunerii atât la câmpurile electrice, cât și la câmpurile magnetice provenite din LEA, dar astfel de investigații sunt destul de rare și se concentrează în cea mai mare parte doar pe expunerea la câmpul magnetic [53-54]. În continuare se prezintă dezvoltarea unui model Maxwell 2D pentru calcularea câmpurilor electrice și câmpurilor magnetice generate de LEA. Modelul este implementat pentru cazul particular al unei LEA dublu circuit de 110 kV utilizat pentru distribuția primară a energiei, dar poate fi aplicat cu ușurință oricărei alte LEA.

LEA dublu circuit de 110 kV selectată pentru implementarea modelului (adesea găsită în apropierea unor medii urbane) are o geometrie impusă de stâlpi de susținere de tip Sn 110252. Fazele celor două circuite sunt echipate cu conductoare din ACSR (Conductor Oțel-Aluminiu) de secțiune 240/40 mm<sup>2</sup> (21,7 mm diametru exterior), în timp ce conductorul de nul este format dintr-un conductor ACSR de 160/95 mm<sup>2</sup> (20,75 mm diametru exterior). Se consideră că LEA funcționează la o sarcină de 500 A (aproape de curentul nominal maxim), cu fazele celor două circuite perfect echilibrate. În plus, deoarece nivelul câmpului depinde în mare măsură de aranjarea fazelor relativă dintre cele două circuite, au fost considerate atât aranjamente de fază netranspuse (ABC/A'B'C') cât și total transpuse (ABC/C'B'A'), determinând în mod clar expunerea minimă și maximă în părțile laterale ale liniei [55-56], acolo unde este cea mai mare probabilitate ca oamenii să locuiască sau să petreacă timp.

Modelul geometric global FEM este prezentat în Figura 4.2, se consideră că LEA dublu circuit de 110 kV este plasată deasupra unui pământ cu conductivitate electrică  $\sigma = 0,01$  S/m, permitivitatea electrică relativă  $\epsilon_r = 1$  și permeabilitatea magnetică relativă  $\mu_r = 1$ . Distanța liniei față de sol, 9 m, corespunde unei „înălțimi medii” a LEA deasupra solului, calculată ca [57], totodată pentru calculul celorlalte înălțimi (minima și maximă) s-au folosit:

$$h_{min} = h_{max} - f \quad (4.1)$$

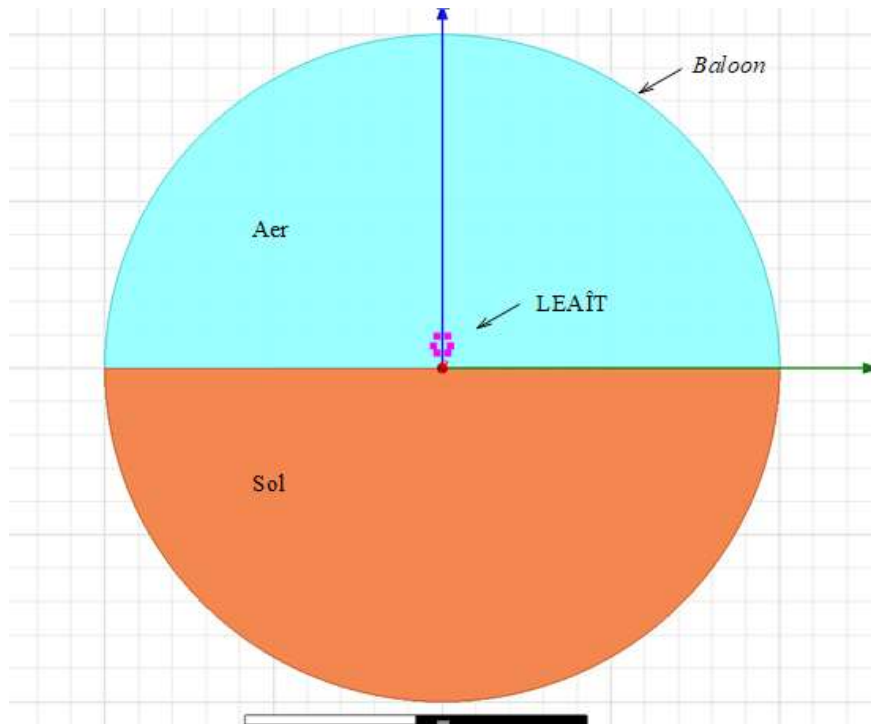
$$h_{med} = h_{max} - \frac{2}{3}f \quad (4.2)$$

$$h_{max} = h_{max} \quad (4.3)$$

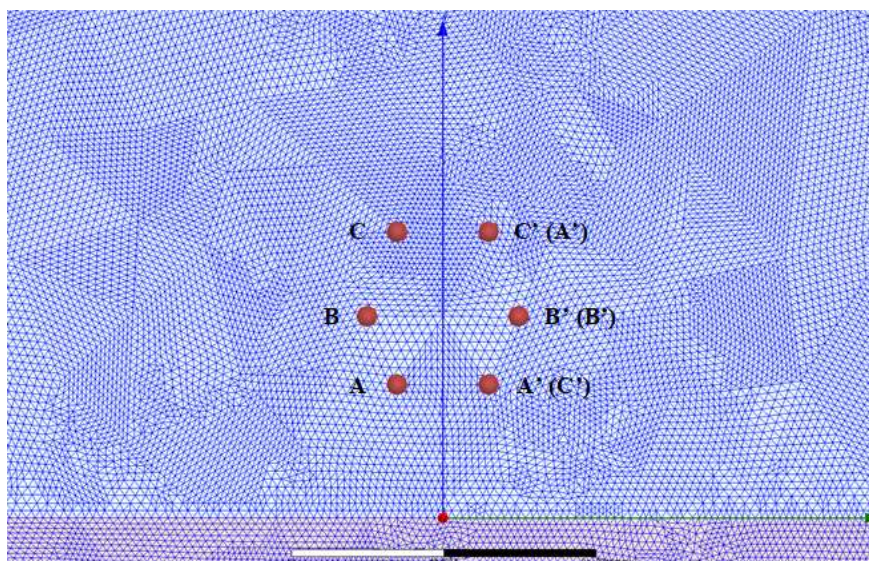
unde  $h_{max} = 15,2$  m reprezintă înălțimea maximă a conductoarelor (la stâlp) și  $f = 9,2$  m este săgeata conductorilor.

Conductorii activi sunt modelați așa cum este prezentat în Figura 4.3, ca cilindri simpli de aluminiu cu conductivitate electrică de  $3,8 \cdot 10^7$  S/m, permitivitatea electrică relativă de 1 și

permeabilitatea magnetică relativă de 1, în timp ce influența conductorului de nul asupra distribuției câmpurilor electrice și câmpurilor magnetice este neglijată (conductorul de nul nu este inclus în simulare). Condițiile de frontieră aplicate sunt de tip Balloon, aceasta modelează regiunea din afara spațiului definit ca extinzându-se la infinit. Raza regiunii delimitate este  $R = 200$  m, suficient de mare pentru a determina comportamentul celor două câmpuri în afara spațiului liniilor de alimentare, chiar și pentru LEA cu tensiuni nominale mai mari. Toate calculele efectuate în acest studiu presupun un număr total de elemente de discretizare a modelului de 1223286, dar poate fi redus pentru analize mai rapide și totuși satisfăcătoare.



**Figura 4.2.** Modelul 2D al LEA 110 kV dublu circuit ( $R = 200$  m)



**Figura 4.3.** Discretizarea modelului 2D în imediata vecinătate a LEA

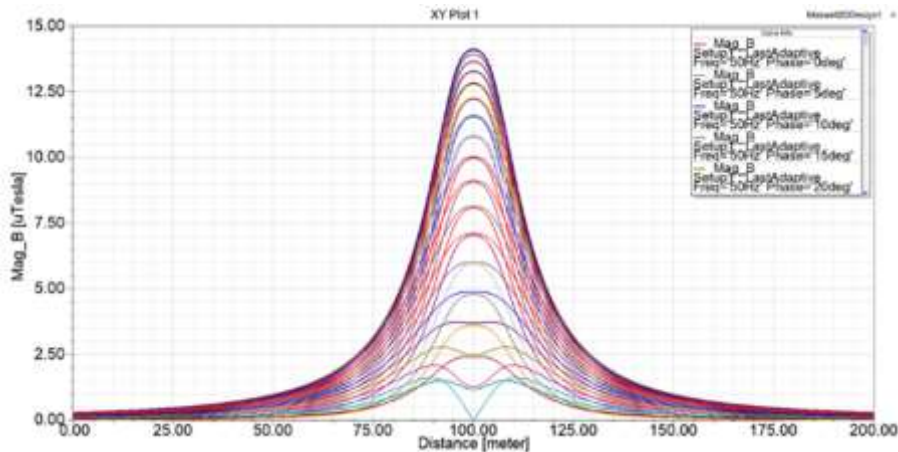
## Calcularea câmpurilor magnetice

Distribuția câmpului magnetic în jurul LEA este obținută folosind solver-ul „eddy current”. Acesta permite calcularea câmpurilor magnetice care oscilează cu o anumită frecvență (în acest caz, 50 Hz). Cu toate acestea, deoarece distribuțiile câmpului magnetic generate cu acest solver sunt raportate în termeni de valori instantanee ale inducției magnetice pe o perioadă de 20 ms, este necesară o post-procesare suplimentară pentru a genera profiluri laterale de valoare efectivă ale inducției magnetice la înălțimea de 1 m deasupra solului, așa cum este adesea folosit pentru evaluarea expunerii la CEM generate de LEA. În consecință, mai multe profiluri de inducției magnetice instantanee au fost importate în Microsoft Excel, unde au fost procesate punct cu punct, conform formulei [48]:

$$B_{RMS}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_N^2(i)} \quad (4.4)$$

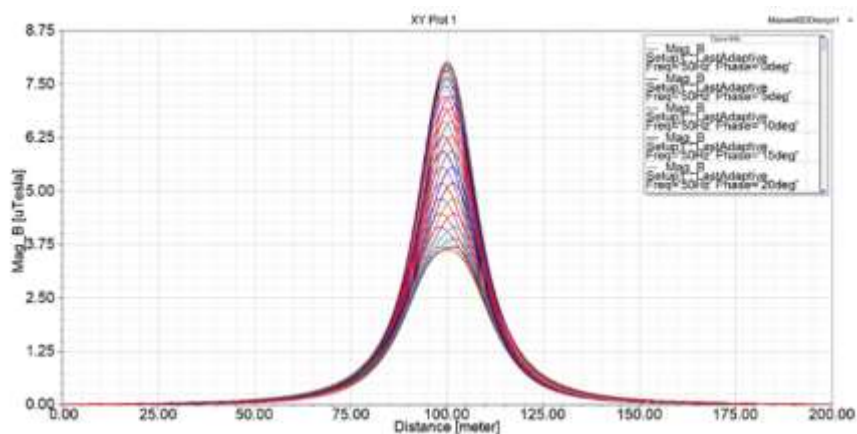
unde  $B_1(i)$ , ...,  $B_N(i)$  reprezintă valorile instantanee ale inducției magnetice corespunzătoare punctului  $i$  al profilului și  $N = 73$  este numărul total de valori.

Figura 4.4 prezintă profiluri laterale ale inducției magnetice instantanee obținut pentru fazarea netranspusă, în timp ce Figura 4.5 prezintă profiluri similare obținute pentru fazarea transpusă. Pornind de la o anumită distanță de linia centrală, orice alt aranjament de fază va genera un profil a valorii inducției magnetice între aceste două grafice limită.



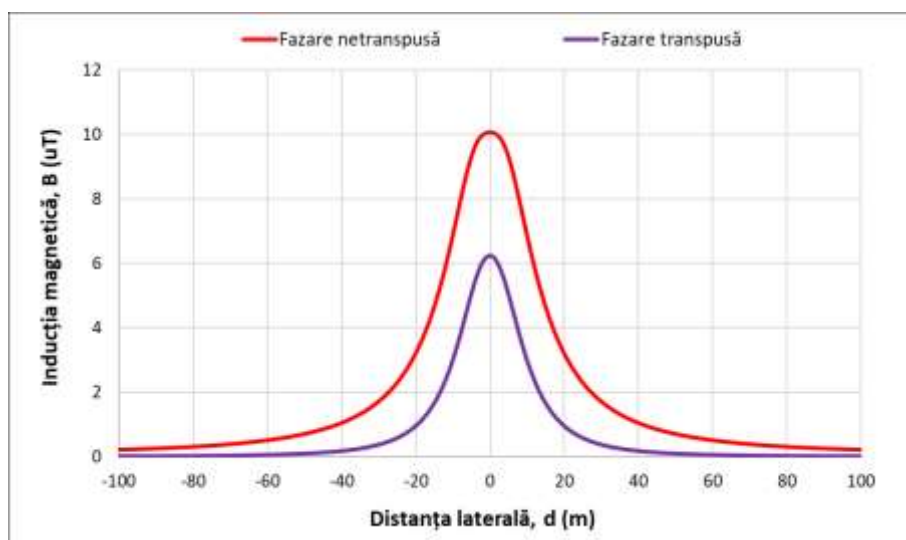
**Figura 4.4.** Profiluri laterale ale inducției magnetice instantanee la înălțimea de 1 m deasupra solului  $I=500$  A, faze netranspuse





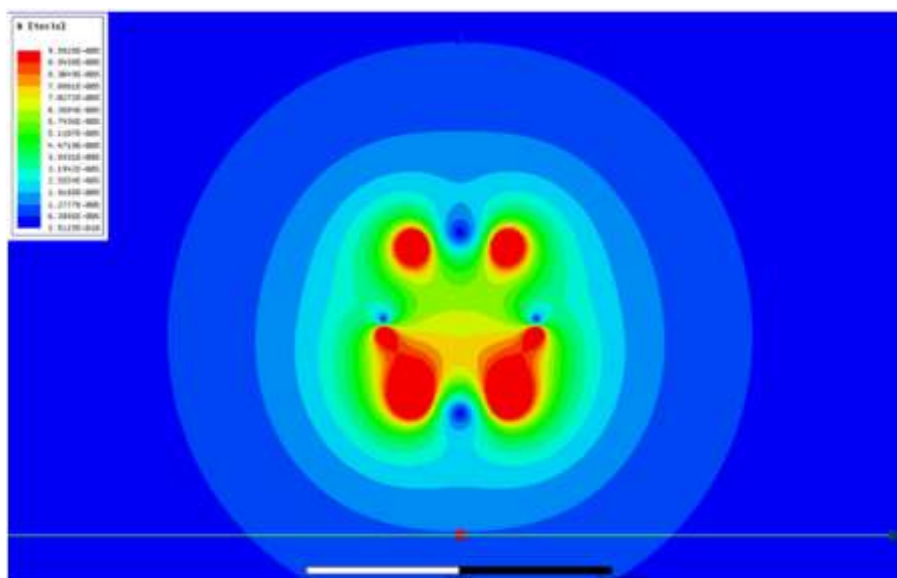
**Figura 4.5.** Profiluri laterale ale inducției magnetice instantanee la înălțimea de 1 m deasupra solului  $I=500$  A, faze transpuse

Profiluri ale valorii inducției magnetice corespundente, calculate cu ecuația 4.2 sunt prezentate comparativ în Figura 4.6.

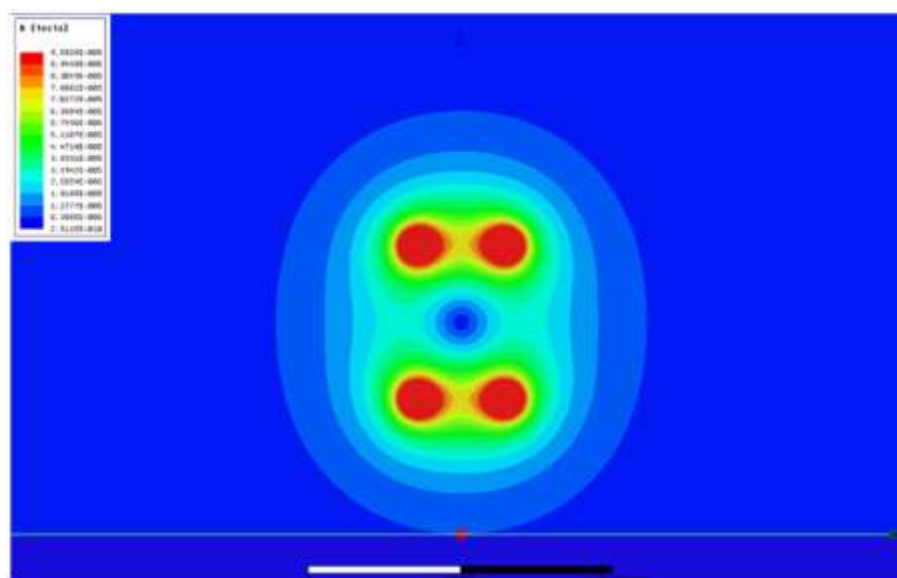


**Figura 4.6.** Profiluri laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru cazurile de transpunere și netranspunere a fazelor

Figura 4.7 prezintă distribuția câmpului magnetic în jurul LEA în momentul de timp corespunzător profilului câmpului maxim din Figura 4.4. În mod similar, Figura 4.8 prezintă distribuția câmpului magnetic în jurul LEA în momentul de timp corespunzător profilului câmpului maxim din Figura 4.5. După cum este evident, un grad suplimentar de anulare între câmpurile magnetice produse de cele două circuite poate fi observat pentru fazarea transpusă. Cele două distribuții de câmp magnetic se extind până la 30 m de linia centrală a LEA.



**Figura 4.7.** Distribuția câmpului magnetic în jurul LEA 110 kV dublu circuit cu fazele netranspuse  
( $t=10.83$  ms)



**Figura 4.8.** Distribuția câmpului magnetic în jurul LEA 110 kV dublu circuit cu fazele transpuse  
( $t=11.66$  ms)

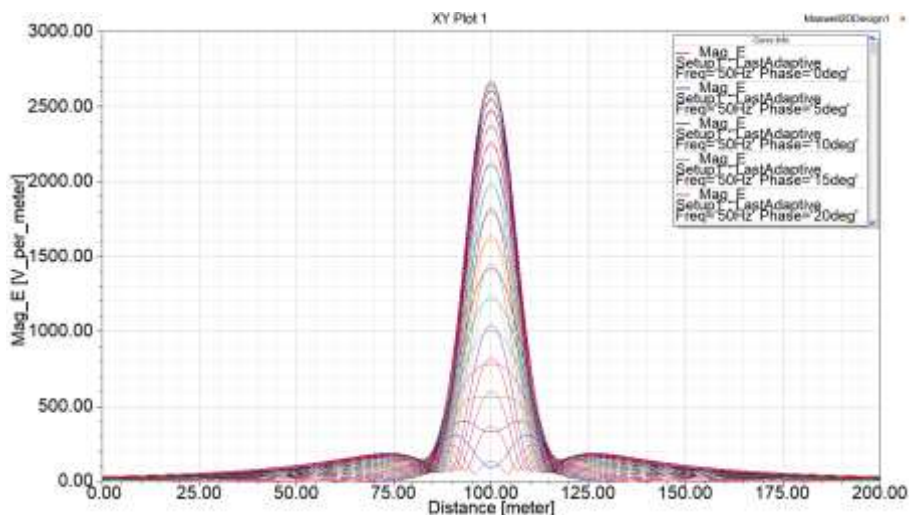
### Calculul câmpului electric

Distribuția câmpului electric în jurul LEA 110 kV dublu circuit este determinată folosind funcția de rezolvare a problemei, “AC Conduction”. Aceasta permite calcularea câmpurilor electrice variabile sinusoidale (aici, variind la 50 Hz). Și de această dată, pentru a genera profiluri laterale ale intensității câmpului electric RMS la înălțimea de 1 m deasupra solului, au fost importate mai multe profiluri de intensitate a câmpului electric instantaneu în Microsoft Excel, unde au fost procesate în același mod, prin aplicarea formulei [48]:

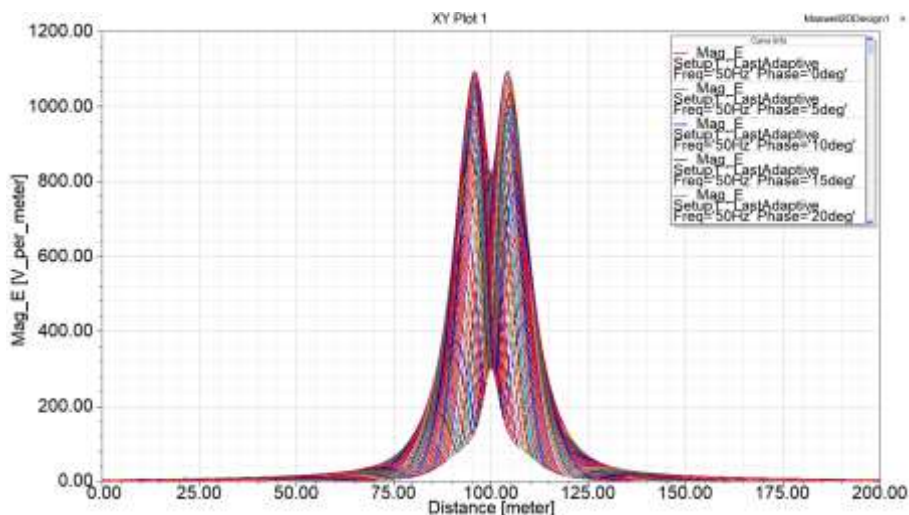
$$E_{RMS}(i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_N^2(i)} \quad (4.5)$$

unde  $E_1(i), \dots, E_N(i)$  reprezintă valorile instantanee ale intensității câmpului electric corespunzătoare punctului  $i$  al profilului și  $N = 73$  este numărul total de valori.

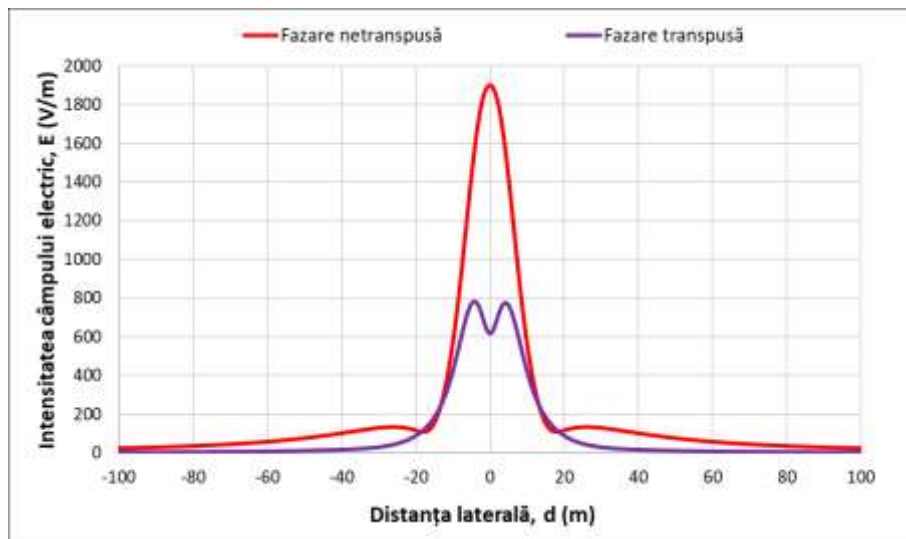
Ca și în cazul câmpului magnetic, Figura 4.9 prezintă profiluri laterale ale intensității câmpului electric instantaneu obținut pentru fazarea netrănspusă, în timp ce Figura 4.10 prezintă profiluri obținute pentru fazarea trănspusă. Profilurile laterale a valorii efective a intensității câmpului electric asociate – calculate cu ecuația 4.3 sunt comparate în Figura 4.11.



**Figura 4.9.** Profiluri laterale ale intensității câmpului electric instantanee la înălțimea de 1 m deasupra solului, faze netrănsuse

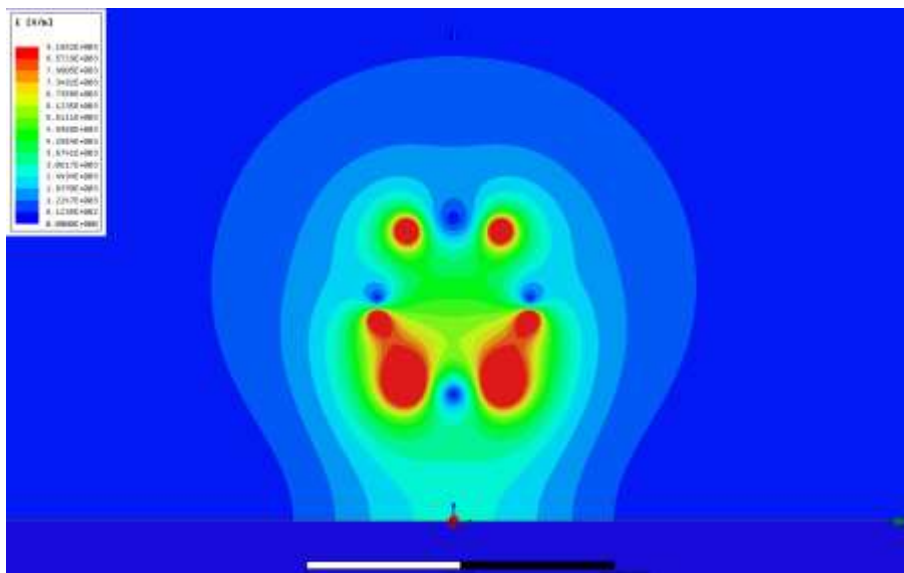


**Figura 4.10.** Profiluri laterale ale intensității câmpului electric instantanee la înălțimea de 1 m deasupra solului, faze trănsuse

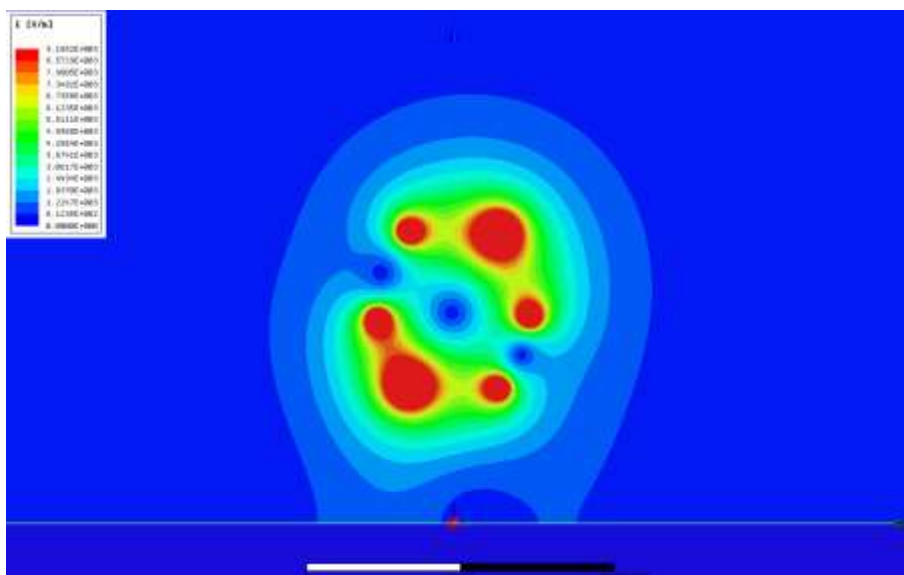


**Figura 4.11.** Profiluri laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru cazurile de transpunere și netranspunere a fazelor

Figura 4.12 și Figura 4.13 ilustrează distribuțiile câmpului electric în jurul LEA 110 kV dublu circuit, corespunzătoare profilurilor de câmp maxim din Figura 4.8 respectiv din Figura 4.9. Încă o dată, se poate observa un grad suplimentar de anulare între câmpurile electrice produse de cele două circuite pentru fazarea transpusă. Cele două distribuții de câmp electric se extind pe o distanță laterală de 30 m față de linia centrală a LEA 110 kV dublu circuit.



**Figura 4.12.** Distribuția câmpului electric în jurul LEA 110 kV dublu circuit cu fazele netranspuse (t=10.55 ms)



**Figura 4.13.** Distribuția câmpului electric în jurul LEA 110 kV dublu circuit cu fazele transpuse (t=20 ms)

Pentru validarea modelului propus toate calculele numerice efectuate în acest capitol au fost comparate cu două programe bazate pe legea Biot-Savart și principiul supoziției, aceste fiind capabile să genereze profile laterale precise ale câmpului electric și magnetic la înălțimea specificată de utilizator față de sol, dar și distribuții 2D de lungul axei y pentru în planul yz pentru câmp electric și magnetic a LEA, între oricare două seturi de coordonate definite de utilizator. Presupunând aceeași geometrie a liniei de alimentare și informații despre tensiune și curent (amplitudine și, respectiv, fază), așa cum se arată în.

### **4.3. Simulări numerice de câmp electric și câmp magnetic generate de LEA 110 kV**

#### **4.3.1. LEA 110 kV simplu circuit stâlp susținere SN 110.102**

LEA selectată pentru analiză este o linie de 110 kV simplu-circuit, tipică, a cărei geometrie este dictată de stâlpi de susținere de tip Sn 110.102 (Figura 4.14). Linia este echipată cu 3 conductoare active OI-Al 185/32 mm<sup>2</sup> și un conductor de nul OI-Al 95/55 mm<sup>2</sup>.

Diametrele conductoarelor și coordonatele geometrice ale acestora, sunt prezentate în Tabelul 4.1, unde  $x_i$  este distanța laterală de la linia centrală la conductorul  $i$ ,  $y_i$  este înălțimea conductorului  $i$ , iar  $h_i$  reprezintă înălțimea față de sol a liniei electrice.

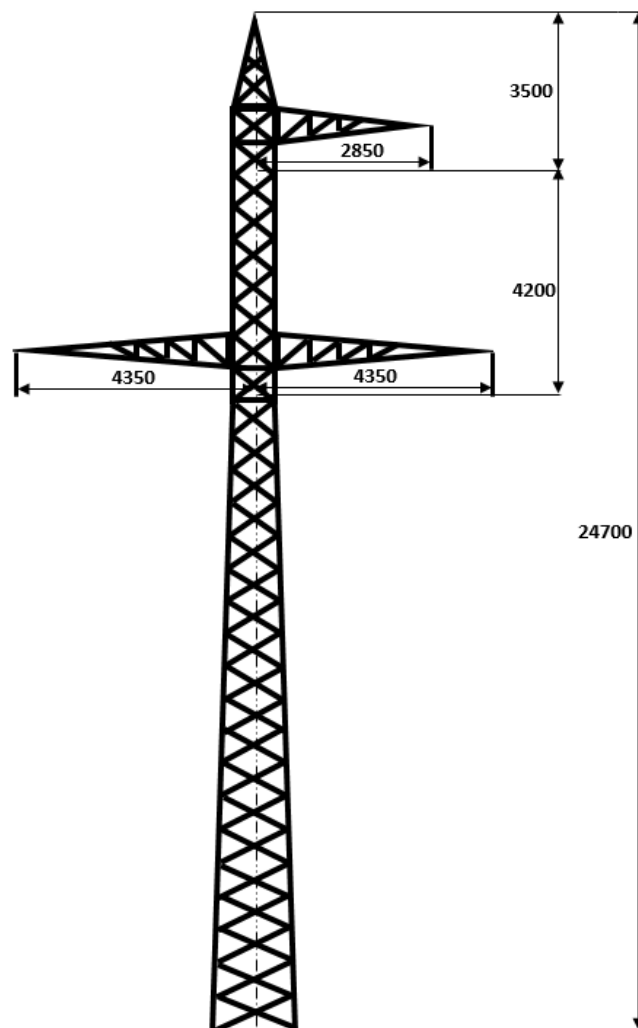
Se consideră că circuitul LEA este perfect echilibrat, adică curenții pe cele trei faze au amplitudini egale și sunt defazați la 120° unul față de altul (în practică, liniile electrice aeriene funcționează cu fazele ușor nesimetrice).

Deoarece intensitatea câmpului magnetic și intensitatea câmpului electric depind de înălțimea liniei față de sol, s-au considerat, pentru calcul, trei înălțimi ale LEA,  $h_i = 6$  m, 9 m și respectiv 15,2 m calculată cu relația 4.1-4.3, unde  $h_{\max}$  reprezintă înălțimea de prindere a conductoarelor (la stâlp), iar  $f = 9,2$  m este săgeata acestora.

De asemenea, deoarece nivelul câmpului magnetic din vecinătatea LEA depinde de intensitatea curentului transportat, în vederea determinării nivelurilor de expunere tipice, s-a considerat o valoare efectivă a curentului  $I = 485$  A (încărcarea maximă a liniei), iar nivelul câmpului electric depinde de valoarea tensiunii de alimentare, valoarea efectivă a tensiunii de fază  $U = 63.51$  kV.

**Tabelul 4.1.** Date de intrare pentru LEA 110 kV simplu-circuit (tip stâlp Sn 110.102)

Conductorul	$i$	$x_i(\text{m})$	$y_i(\text{m})$	$D(\text{mm})$	$I(\text{A})$	$U(\text{kV})$
A	1	-4,35	$h_i$	19,2	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B	2	4,35	$h_i$	19,2	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C	3	2,85	$h_i + 4,2$	19,2	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$



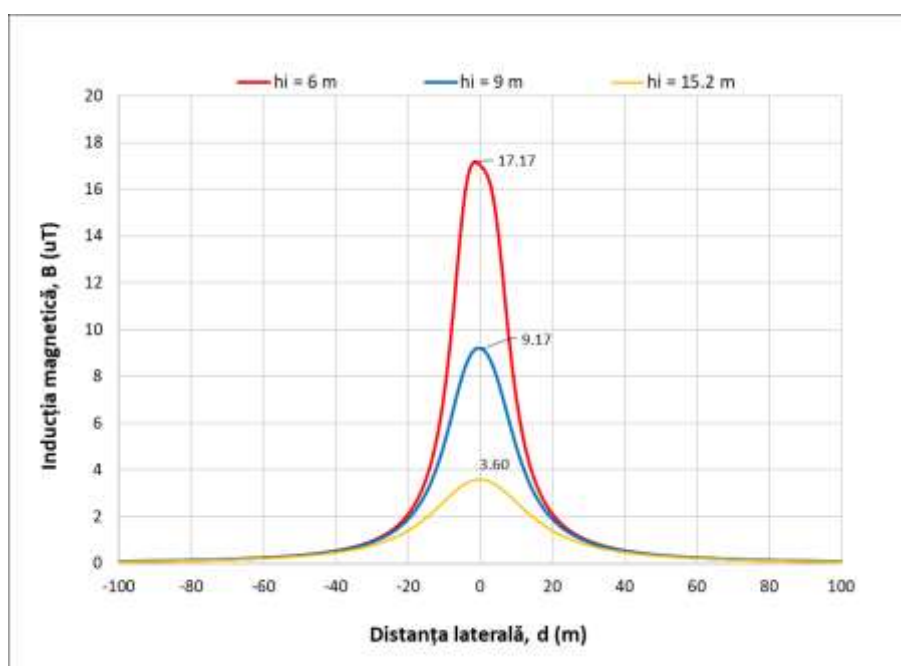
**Figura 4.14** Stâlp de susținere normal Sn 110.102 (dimensiunile sunt în mm)

### Calculul câmpurilor magnetice

Pentru evaluarea câmpului magnetic generat de LEA 110 kV, s-au considerat pentru calculul numeric, trei cazuri ale înălțimii LEA față de sol.

Cazul pentru înălțimea liniei față de sol  $h_i = 6$  m a furnizat cele mai mari valori efective ale inducției magnetice ( $17,17 \mu\text{T}$ ), iar valorile cele mai scăzute au fost înregistrate pentru cazul înălțimii liniei față de sol  $h_i = 15,2$  m ( $3,60 \mu\text{T}$ ). La marginea profilului lateral a liniei electrice, la 18,5 m de la centru LEA 110 kV, conform reglementărilor naționale [58], câmpul magnetic scade la  $2,45 \mu\text{T}$ ,  $2,15 \mu\text{T}$  și, respectiv,  $1,55 \mu\text{T}$ . Valoarea de  $0,4 \mu\text{T}$ , folosită adesea în studiile epidemiologice, este atinsă la o distanță laterală de aproximativ 46,7 m, 46,3 m și respectiv 44,2 m.

Figura 4.15 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice în cele trei cazuri.

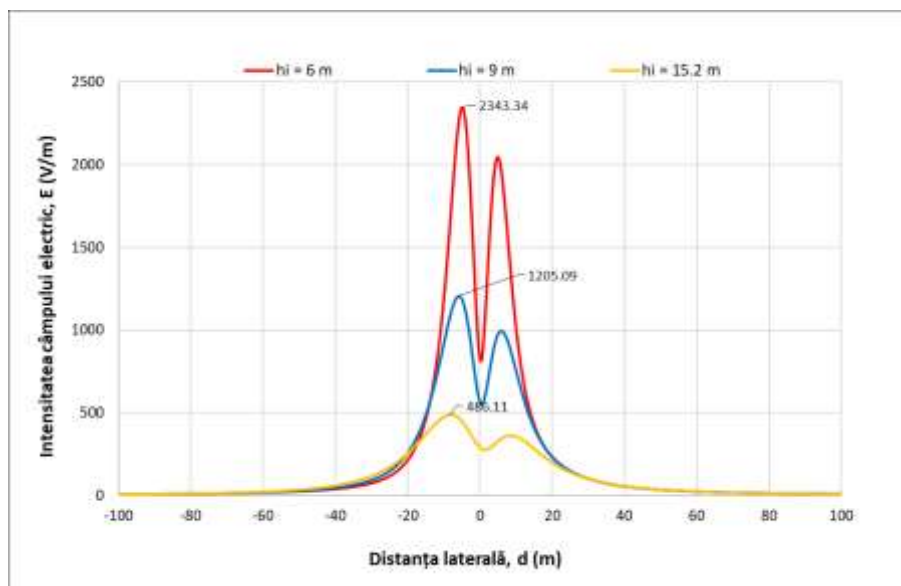


**Figura 4.15.** Comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru cele trei cazurile ale înălțimii față de sol

### Calculul câmpurilor electrice

Similar cu evaluarea câmpului magnetic și pentru câmpul electric generat de LEA 110 kV s-au considerat pentru calculul numeric cele trei cazuri ale înălțimii LEA față de sol.

Figura 4.16 prezintă comparații între profilurile laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric în cele trei cazuri analizate.



**Figura 4.16.** Comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru cele trei cazurile ale înălțimii față de sol

În urma simulării numerice, cele mai mari valori efective ale intensității câmpului electric (2343,3 V/m) au fost obținute în cazul liniei cu înălțimea față de sol  $h_i = 6$  m. Valorile cele mai scăzute au fost înregistrate pentru cazul liniei cu înălțimea față de sol  $h_i = 15.2$  m (486,11 V/m). La marginea profilului lateral a liniei electrice, la 18,5 m de la centru LEA, conform [58], câmpul electric scade la 273,37 V/m, 273,01 V/m și, respectiv, 221,31 V/m.

### 4.3.2. LEA 110 kV dublu circuit stâlp susținere SN 110.252

LEA selectată pentru analiză este aceeași ca cea folosită pentru dezvoltarea modelului, o linie de 110 kV dublu circuit tipică, a cărei geometrie este dictată de stâlpi de susținere de tip Sn 110.252 (figura 4.17). Linia este echipată cu 6 (2x3) conductoare active OI-Al 240/40 mm<sup>2</sup> și un conductor de nul OI-Al 160/95 mm<sup>2</sup>.

Diametrele conductoarelor și coordonatele geometrice ale acestora, sunt prezentate în Tabelul 4.2, unde  $x_i$  este distanța laterală de la linia centrală la conductorul  $i$ ,  $y_i$  este înălțimea conductorului  $i$  și  $h_i$  reprezintă înălțimea față de sol a liniei electrice.

Se consideră că cele două circuite LEA sunt perfect echilibrate, adică curenții pe cele trei faze au amplitudini egale și sunt defazați la 120° unul față de altul (în practică, liniile electrice aeriene funcționează cu fazele ușor nesimetrice).

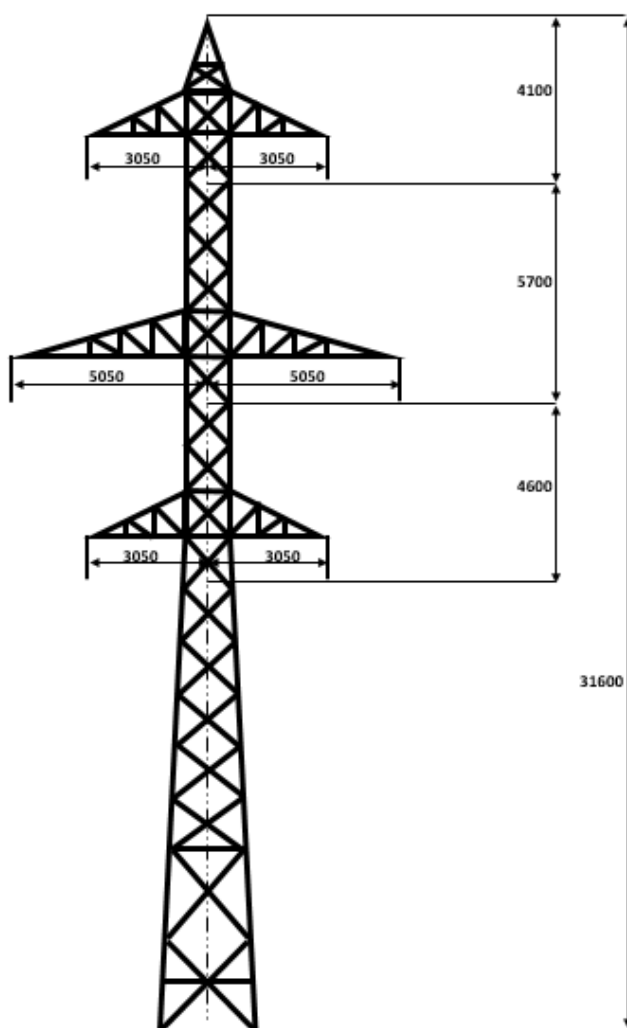
Deoarece intensitatea câmpului magnetic și intensitatea câmpului electric depind de înălțimea liniei față de sol, s-a considerat pentru calcul trei înălțimi ( $h_{\min}$ ,  $h_{\text{med}}$  și  $h_{\max}$ ) a LEA,  $h_i = 6$  m, 9 m, și respectiv 15,2 m calculate cu relațiile 4.1 - 4.3 unde  $h_{\max}$  reprezintă înălțimea de prindere a conductoarelor (la stâlp), iar  $f = 9,2$  m este săgeata acestora.



De asemenea deoarece nivelul câmpului magnetic din vecinătatea LEA depinde de intensitatea curentului transportat, în vederea determinării nivelurilor de expunere tipice, s-a considerat o valoare efectivă a curentului  $I = 575$  A (încărcarea maximă a liniei), iar nivelul câmpului electric depinde de valoarea tensiuni de alimentare, valoarea efectivă a tensiuni de fază  $U = 63.51$  kV.

**Tabelul 4.2.** Date de intrare pentru LEA 110 kV dublu-circuit (faze netranspuse)

Conductorul	$i$	$x_i(\text{m})$	$y_i(\text{m})$	$D(\text{mm})$	$I(\text{A})$	$U(\text{kV})$
A	1	-3,05	$h_i$	21,7	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B	2	-5,05	$h_i+4,6$	21,7	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C	3	-3,05	$h_i+10,3$	21,7	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
A'	4	3,05	$h_i$	21,7	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B'	5	5,05	$h_i+4,6$	21,7	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C'	6	3,05	$h_i+10,3$	21,7	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$

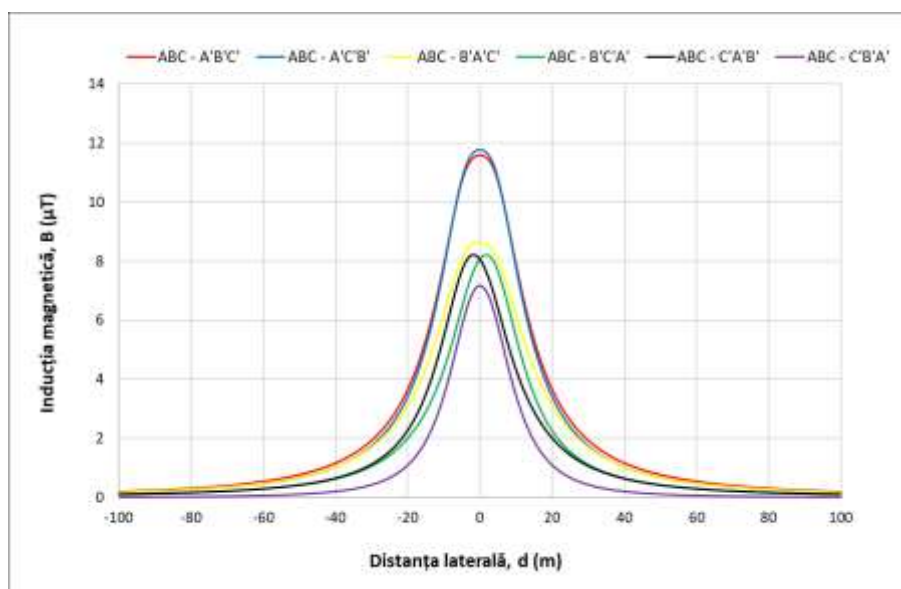


**Figura 4.17.** Stâlp de susținere normal Sn 110.252 (dimensiunile sunt în mm)

## Calculul câmpului magnetic

Pentru evaluarea câmpului magnetic generat de LEA 110 kV dublu circuit, s-au considerat pentru calculul numeric toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor, ABC – A'B'C' a furnizat valori efective ale inducției magnetice de 11,58  $\mu\text{T}$ , iar valorile în cazul fazelor transpuse complet ABC – C'B'A' au fost de 7,14  $\mu\text{T}$ . În timp ce la marginea profilului lateral a LEA 110 kV dublu circuit, la 18,5 m față de centrul LEA 110 kV dublu circuit, conform reglementărilor naționale [58], câmpul magnetic scade la 4,11  $\mu\text{T}$  în cazul fazelor netranspuse, respectiv la 1,31  $\mu\text{T}$  în cazul fazelor transpuse total. Valoarea de 0,4  $\mu\text{T}$ , folosită adesea în studiile epidemiologice, este atinsă la o distanță laterală de aproximativ 70,6 m în cazul fazelor netranspuse și respectiv 31,1 m în cazul fazelor total transpuse

Figura 4.18 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.

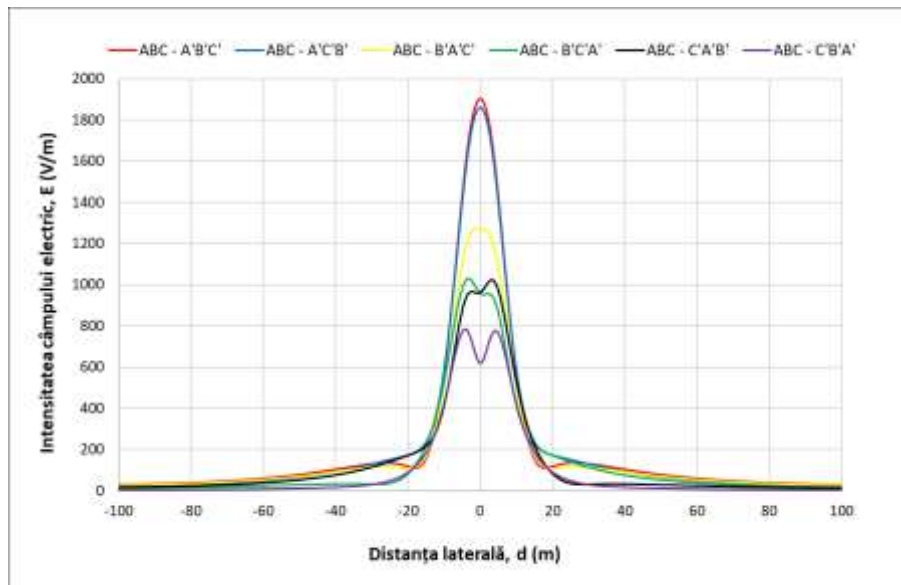


**Figura 4.18.** Comparații ale profiluri laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru toate cele șase cazurile posibile de transpunere a fazelor

## Calculul câmpului electric

Pentru evaluarea câmpului electric generat de LEA 110 kV dublu circuit, s-au considerat, pentru calculul numeric, toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor, ABC – A'B'C' a furnizat cele mai mari valori efective ale intensității câmpului electric (1900,01 V/m), iar valorile cele mai mici au fost furnizate în cazul fazelor complet transpuse ABC – C'B'A' (783,71 V/m). La marginea profilului lateral a LEA 110 kV dublu circuit, la 18,5 m de la centrul LEA 110 kV dublu circuit, conform reglementărilor naționale [58], câmpul electric scade la 109,85 V/m în cazul fazelor netranspuse, respectiv la 111,78 V/m în cazul fazelor transpuse total.

Figura 4.19 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.



**Figura 4.19.** Comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor

### 4.3.3. LEA 220 kV dublu circuit stâlp susținere 220.202

LEA selectată pentru analiză este o linie de 220 kV dublu circuit tipică, a cărei geometrie este dictată de stâlpi de susținere de tip Sn 220.202 (Figura 4.20). Linia este echipată cu 6 (2 x 3) conductoare active OI-Al 450/75 mm<sup>2</sup> și un conductor de protecție OI-Al 160/95 mm<sup>2</sup>.

Diametrele conductoarelor și coordonatele geometrice ale acestora, sunt prezentate în Tabelul 4.3, unde  $x_i$  este distanța laterală de la linia centrală la conductorul  $i$ ,  $y_i$  este înălțimea conductorului  $i$  și  $h_i$  reprezintă înălțimea față de sol a liniei electrice.

Se consideră că cele două circuite ale LEA sunt perfect echilibrate, adică curenții pe cele trei faze au amplitudini egale și sunt defazați la 120° unul față de altul (în practică, liniile electrice aeriene funcționează cu fazele ușor nesimetrice). În plus, se presupune că cele două circuite ale LEA 220 kV transportă curenți egali, dar acest lucru se întâmplă rar în realitate.

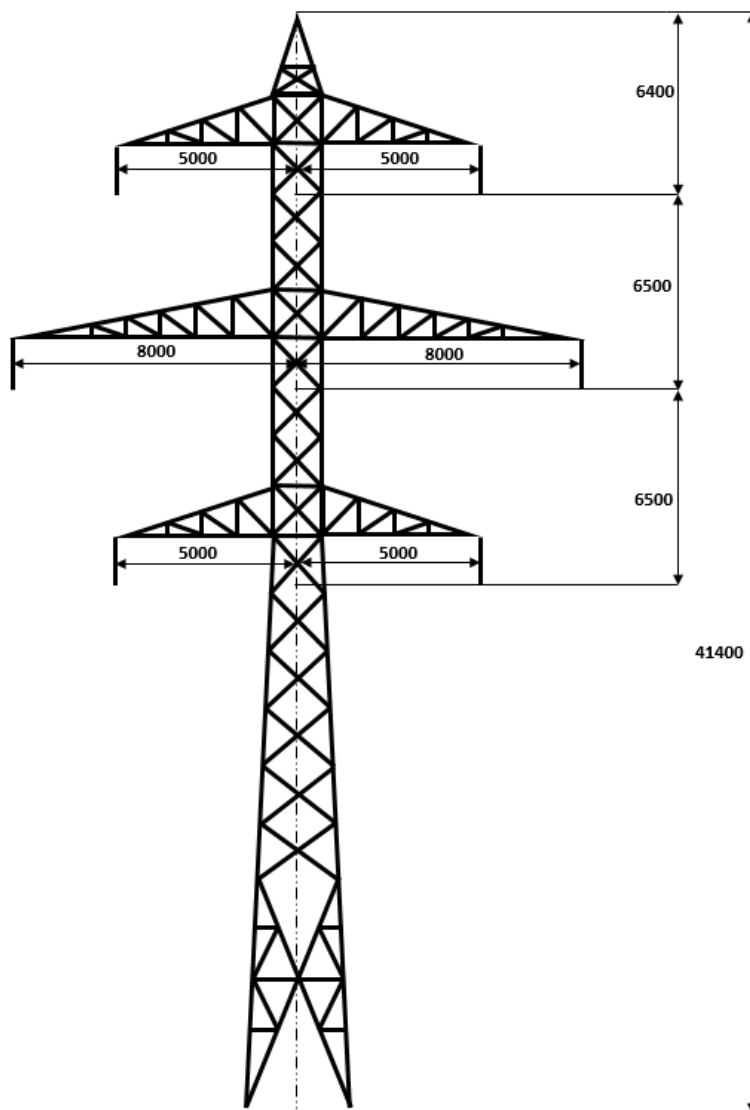
Deoarece intensitatea câmpului magnetic și intensitatea câmpului electric depind de înălțimea liniei față de sol, s-a considerat o înălțime medie a LEA,  $h_{med} = 11$  m, calculată cu relația 4.2, unde  $h_{max} = 19$  m reprezintă înălțimea de prindere a conductoarelor (la stâlp), iar  $f = 12$  m este săgeata acestora.

De asemenea, deoarece nivelul câmpului magnetic din vecinătatea LEA depinde de intensitatea curentului transportat, în vederea determinării nivelurilor de expunere tipice, s-a considerat o valoare

efectivă a curentului  $I = 975$  A (încărcarea maximă a liniei), iar nivelul câmpului electric depinde de valoarea tensiunii de alimentare, valoarea efectivă a tensiunii de fază  $U = 127,02$  kV.

**Tabelul 4.3.** Date de intrare pentru LEA 220 kV dublu circuit (faze netranspuse)

Conductorul	$i$	$x_i$ (m)	$y_i$ (m)	$D$ (mm)	$I$ (A)	$U$ (kV)
A	1	-5,00	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B	2	-8,00	$h_i+6,5$	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C	3	-5,00	$h_i+13$	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
A'	4	5,00	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B'	5	8,00	$h_i+6,5$	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C'	6	5,00	$h_i+13$	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$

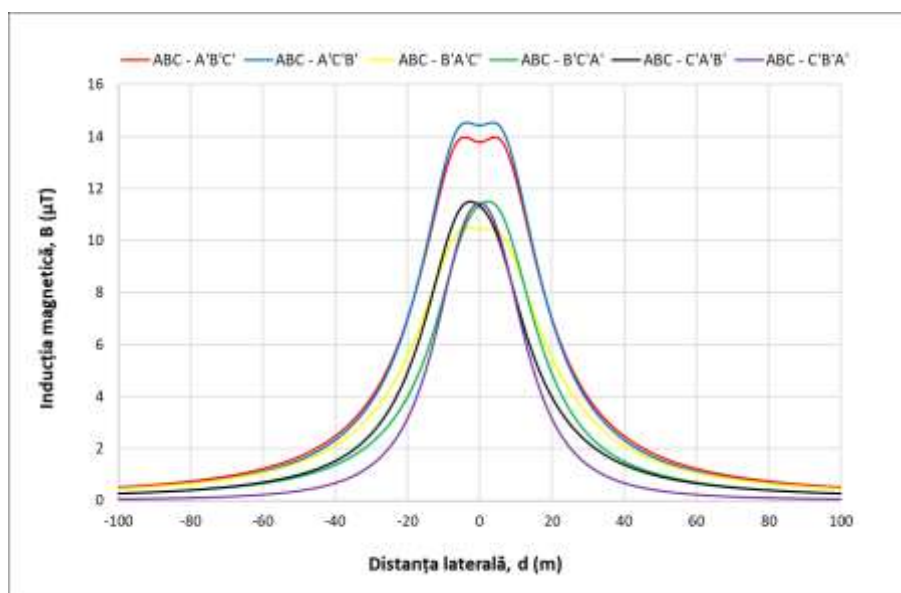


**Figura 4.20.** Stâlp de susținere normal Sn 220.202 (dimensiunile sunt în mm)

## Calculul câmpului magnetic

Pentru evaluarea câmpului magnetic generat de LEA 220 kV dublu circuit, s-au considerat, pentru calculul numeric, toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor, ABC – A'B'C' a furnizat valori efective ale inducției magnetice de 13,97  $\mu\text{T}$ , iar valorile în cazul fazelor transpuse complet ABC – C'B'A' de 11,44  $\mu\text{T}$ , în timp ce la marginea profilului lateral a LEA 220 kV dublu circuit, la 27,5 m de la centrul LEA 220 kV dublu circuit, conform reglementărilor naționale [58], câmpul magnetic scade la 4,52  $\mu\text{T}$  în cazul fazelor netranspuse, respectiv la 1,65  $\mu\text{T}$  în cazul fazelor transpuse total. Valoarea de 0,4  $\mu\text{T}$ , folosită adesea în studiile epidemiologice, nu este atinsă nici la distanța laterală de 100 m în cazul fazelor netranspuse, iar în cazul fazelor complet transpuse aceasta se atinge la 48,7 m.

Figura 4.21 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.

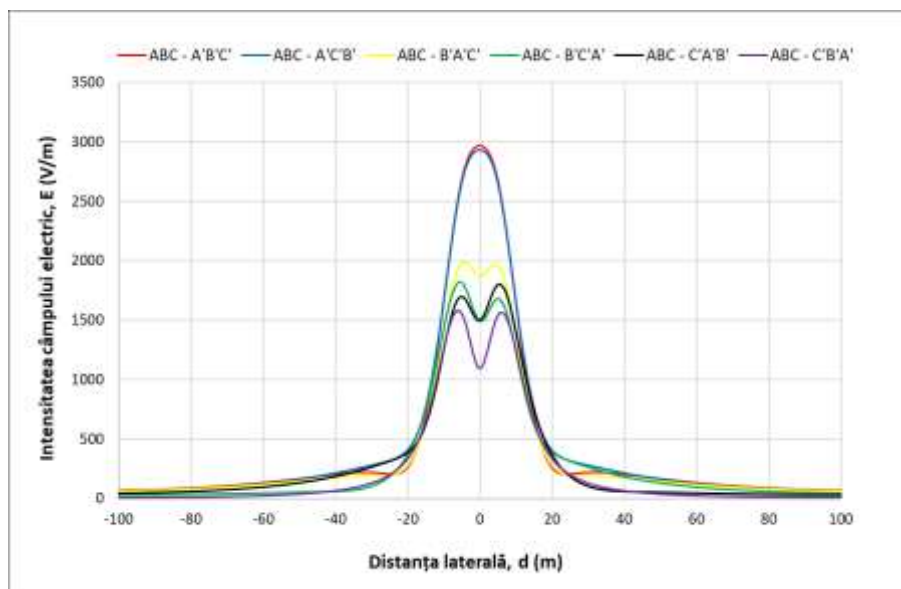


**Figura 4.21.** Comparații ale profiluri laterale ale valorii efective ale intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazurile posibile de transpunere a fazelor

## Calculul câmpului electric

Pentru evaluarea câmpului electric generat de LEA 220 kV dublu circuit, s-au considerat pentru calculul numeric toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor, ABC – A'B'C' a furnizat cele mai mari valori efective ale intensității câmpului electric (2969,82 V/m), iar valorile cele mai mici au fost furnizate în cazul fazelor complet transpuse ABC – C'B'A' (1578,87 V/m), în timp ce la marginea profilului lateral a LEA 220 kV dublu circuit, la 27,5 m de la centrul acesteia, conform reglementărilor naționale [58], câmpul electric scade la 216,43 V/m în cazul fazelor netranspuse, respectiv la 160,64 V/m în cazul fazelor complet transpuse.

Figura 4.22 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.



**Figura 4.22.** Comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazurile posibile de transpunere a fazelor

#### 4.3.4. LEA 400 kV simplu circuit stâlp susținere PAS 400.102

LEA selectată pentru analiză este o linie de 400 kV simplu circuit tipică, a cărei geometrie este dictată de stâlpi de susținere de tip PAS 400.102 (Figura 4.23). Linia este echipată cu două conductoare active OI-Al 450/75 mm<sup>2</sup> pentru fiecare fază, cu o distanță de 40 cm între ele 450/75 mm<sup>2</sup> și două conductoare de nul din OI-Al 160/95 mm<sup>2</sup>.

Diametrele conductoarelor și coordonatele geometrice ale acestora, sunt prezentate în Tabelul 4.4, unde  $x_i$  este distanța laterală de la linia centrală la conductorul  $i$ ,  $y_i$  este înălțimea conductorului  $i$ , iar  $h_i$  reprezintă înălțimea față de sol a liniei electrice.

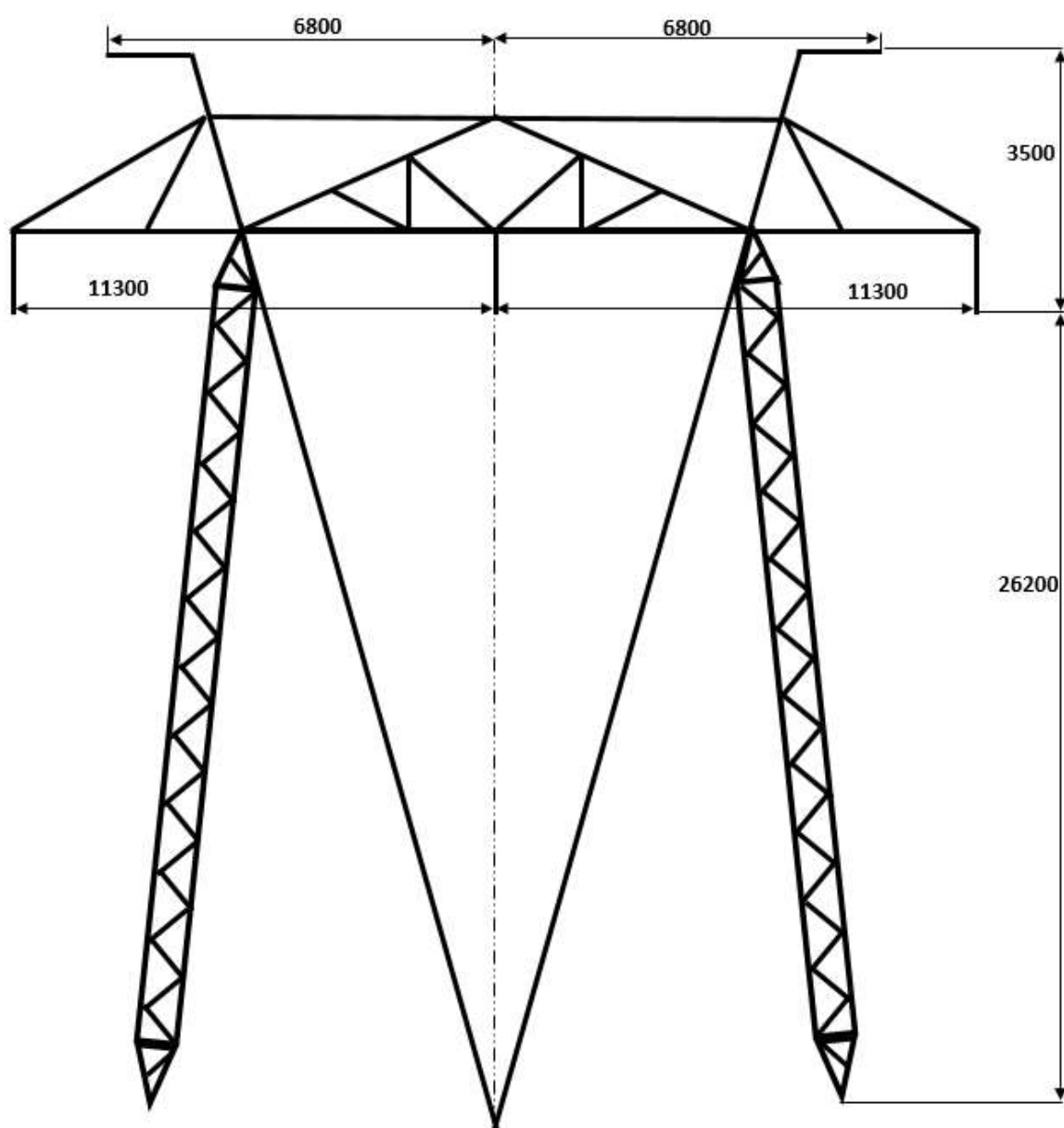
Se consideră că circuitul LEA este perfect echilibrat, adică curenții pe cele trei faze au amplitudini egale și sunt defazați la 120° unul față de altul (în practică, liniile electrice aeriene funcționează cu fazele ușor nesimetrice).

Deoarece intensitatea câmpului magnetic și intensitatea câmpului electric depind de înălțimea liniei față de sol, s-a considerat pentru calculul trei înălțimi a LEA,  $h_i = 8,2$  m, 12,6 m și respectiv 21,4 m calculată cu relația 4.1-4.3 unde  $h_{max}$  reprezintă înălțimea de prindere a conductoarelor (la stâlp), iar  $f = 13,2$  m este săgeata acestora.

De asemenea, deoarece nivelul câmpului magnetic din vecinătatea LEA depinde de intensitatea curentului transportat, în vederea determinării nivelurilor de expunere tipice, s-a considerat o valoare efectivă a curentului  $I = 975$  A (încărcarea maximă a liniei 2 x D), iar nivelul câmpului electric depinde de valoarea tensiunii de alimentare, valoarea efectivă a tensiunii de fază  $U = 230,94$  kV.

**Tabelul 4.4.** Date de intrare pentru LEA 400 kV simplu circuit

Conductorul	$i$	$x_i(\text{m})$	$y_i(\text{m})$	$D(\text{mm})$	$I(\text{A})$	$U(\text{kV})$
A	1	-11,50	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
	2	-11,10	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
B	3	-0,20	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
	4	0,20	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
C	5	11,10	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
	6	11,50	$h_i$	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$

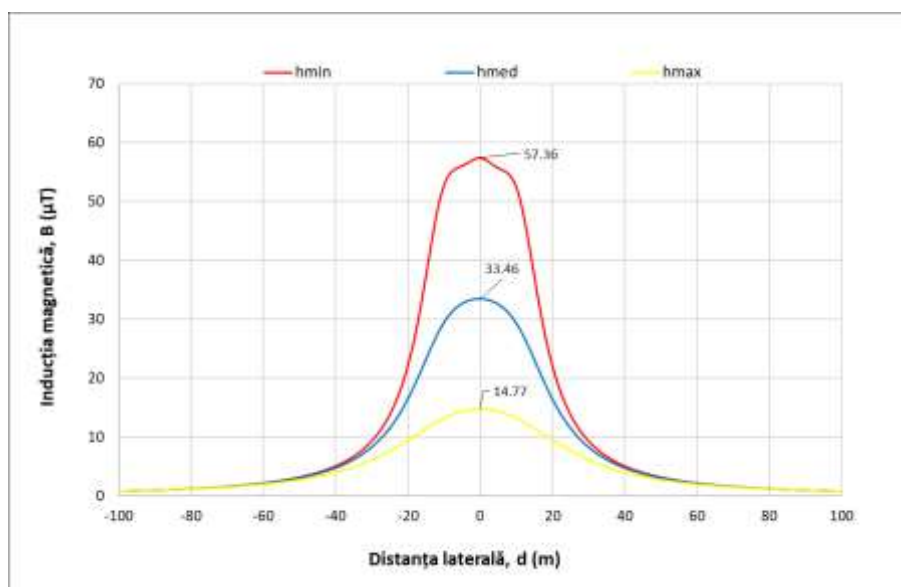


**Figura 4.23.** Stâlp de susținere normal PAS 400.102 (dimensiunile sunt în mm)

## Calculul câmpului magnetic

Pentru evaluarea câmpului magnetic generat de LEA 400 kV, s-au considerat, pentru calculul numeric, cele trei cazuri ale înălțimii LEA față de sol. Cazul pentru înălțimea liniei față de sol  $h_i = 8,2$  m a furnizat cele mai mari valori efective ale inducției magnetice ( $57,36 \mu\text{T}$ ), iar valorile cele mai scăzute au fost înregistrate pentru cazul înălțimii liniei față de sol  $h_i = 21,4$  m ( $14,77 \mu\text{T}$ ), în timp ce la marginea profilului lateral a liniei electrice, la 37,5 m de la centru LEA, conform reglementărilor naționale [58], câmpul magnetic scade la  $5,79 \mu\text{T}$ ,  $5,39 \mu\text{T}$  și, respectiv,  $4,40 \mu\text{T}$ . Valoarea de  $0,4 \mu\text{T}$ , folosită adesea în studiile epidemiologice, pentru toate cele trei distante nu este atinsă nici la 100 m față de centrul liniei.

Figura 4.24 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice în cele trei cazuri.



**Figura 4.24.** Comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru cele trei cazuri ale înălțimii față de sol

O altă abordare pentru calculul câmpului magnetic ar fi utilizarea unui conductor echivalent pentru cele două sub-conductoare pentru fiecare fază.

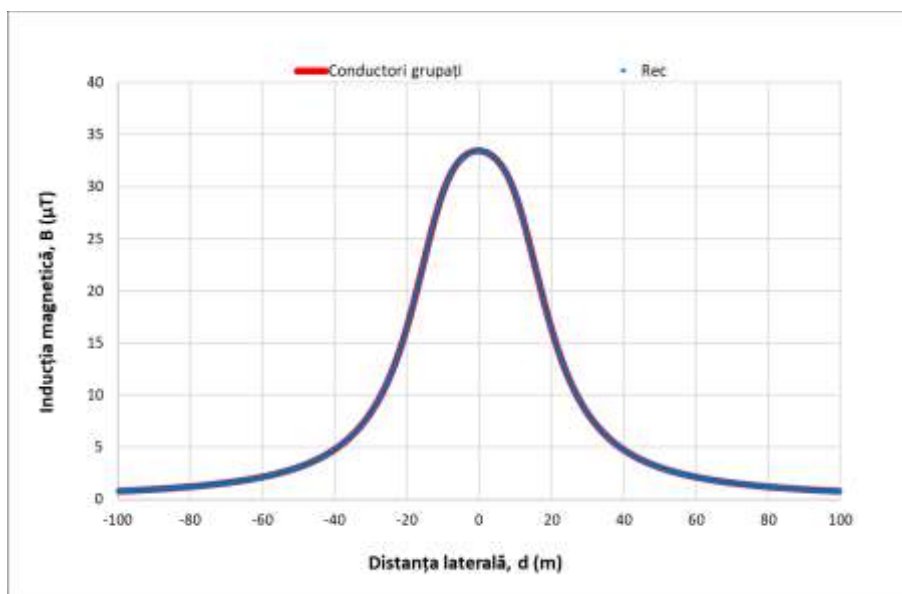
Toate calculele efectuate mai sus presupun că fiecare sub-conductor al LEA 400 kV simplu circuit este modelat separat. Totuși, acest model poate fi simplificat prin înlocuirea fiecăreia dintre cele trei conductoare grupate cu un conductor echivalent de rază  $R_{ec}$ , dat de [59]:

$$R_{ec} = \sqrt[N]{R \cdot D^{(N-1)}} \quad (4.6)$$



unde  $N$  este numărul de sub-conductoare grupate,  $R$  este raza unui sub-conductor și  $D$  este distanța de separare dintre sub-conductoare. Ecuația 4.6 este valabilă doar pentru LEA cu până la trei sub-conductoare pe fază, în cazul LEA 400 kV simplu circuit  $R_{ec} = 76,485$  mm.

Figura 4.25 compară profilurile de valoare efectivă ale inducției magnetice obținute prin simulare numerică prin ambele abordări, la înălțimea linie față de sol  $h_{med} = 12,6$  m după cum se poate observa, există un acord excelent între cele două profiluri de câmp magnetic.

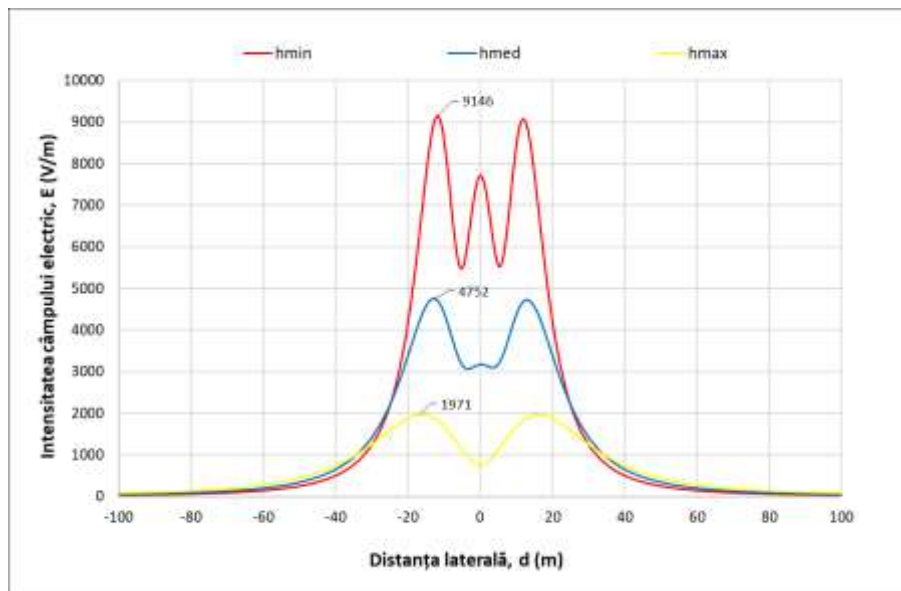


**Figura 4.25.** Comparație între profilurile laterale ale câmpului magnetic obținute prin cele două abordări,  $I = 1950$  A,  $h_{med} = 12,6$  m

### Calculul câmpului electric

Ca și în cazul câmpului magnetic, pentru evaluarea câmpului electric generat de LEA 400 kV, s-au considerat, pentru calculul numeric, cele trei cazuri ale înălțimii LEA față de sol. Cazul pentru înălțimea liniei față de sol  $h_i = 8,2$  m a furnizat cele mai mari valori efective ale intensității câmpului electric (9146,33 V/m), care sunt de aproximativ de două ori mai mari decât limita ICNIRP, iar valorile cele mai scăzute au fost înregistrate pentru cazul înălțimii liniei față de sol  $h_i = 21,4$  m (1971,40 V/m), în timp ce la marginea profilului lateral a liniei electrice, la 37,5 m de la centru LEA, conform reglementărilor naționale, câmpul electric scade la 615,38 V/m, 778,81 V/m și, respectiv, 840,24 V/m.

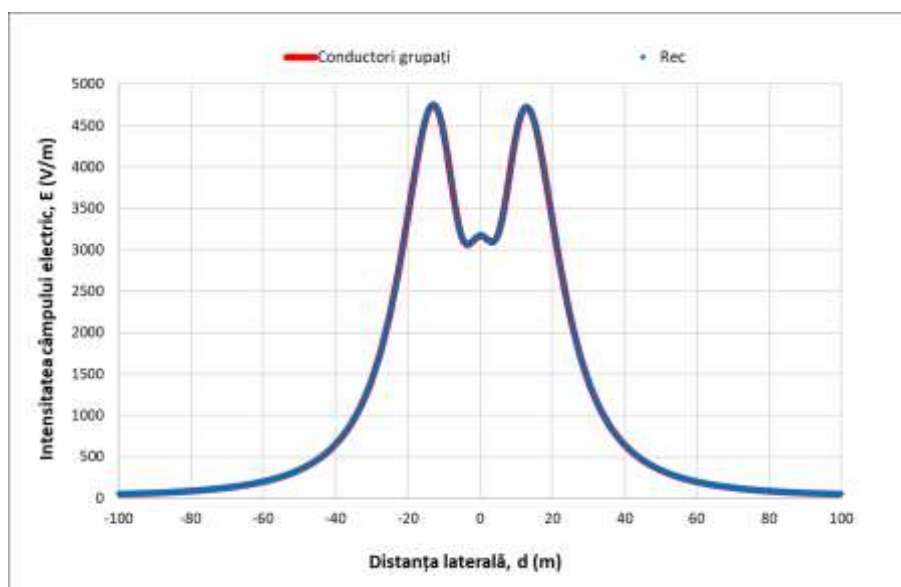
Figura 4.26 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric în cele trei cazuri.



**Figura 4.26.** Comparații ale profiluri laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru cele trei cazuri ale înălțimii față de sol

Similar calcului pentru câmpului magnetic, s-a folosit și abordarea unui conductor echivalent pentru cele două sub-conductoare pentru fiecare fază, utilizându-se aceeași formulă (4.6), pentru calculul razei conductorului echivalent.

Figura 4.27 compară profilurile de valoare efectivă ale intensității câmpului electric prin simulare numerică prin ambele abordări, la înălțimea liniei față de sol  $h_{med} = 12,6$  m după cum se poate observa, există un acord excelent între cele două profiluri de câmp electric.



**Figura 4.27.** Comparație între profilurile laterale ale câmpului electric obținute prin cele două abordări,  $h_{med} = 12,6$  m

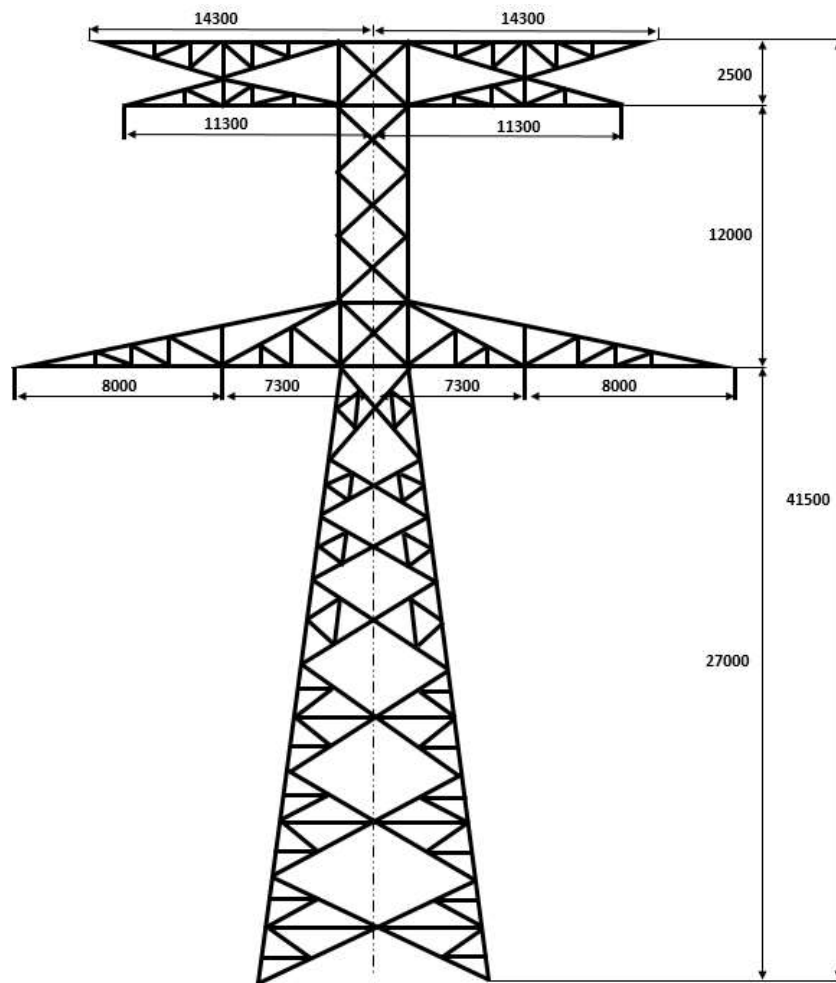
### 4.3.5. LEA 400 kV dublu circuit stâlp susținere Sn 400.231/232

LEA selectată pentru analiză este o linie de 400 kV dublu circuit tipică, a cărei geometrie este dictată de stâlpi de susținere de tip Sn 400.231/232 (Figura 4.28). Linia este echipată cu trei conductoare active OI-Al 450/75 mm<sup>2</sup> pentru fiecare fază, cu o distanță de 40 cm între ele și două conductoare de nul OI-Al 160/95 mm<sup>2</sup>.

Diametrele conductoarelor și coordonatele geometrice ale acestora, sunt prezentate în Tabelul 4.5,  $x_i$  este distanța laterală de la linia centrală la conductorul  $i$ ,  $y_i$  este înălțimea conductorului  $i$ .

**Tabelul 4.5.** Date de intrare pentru LEA 400 kV dublu circuit (faze netranspuse),  $h_{med} = 13,4$  m

Conductorul	$i$	$x_i(m)$	$y_i(m)$	$D(mm)$	$I(A)$	$U(kV)$
<b>A</b>	1	-11,300	25,631	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
	2	-11,100	25,285	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
	3	-11,500	25,285	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
<b>B</b>	4	-15,300	13,631	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
	5	-15,100	13,285	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
	6	-15,500	13,285	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
<b>C</b>	7	-7,300	13,631	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
	8	-7,100	13,285	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
	9	-7,500	13,285	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
<b>A'</b>	10	11,300	25,631	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
	11	11,100	25,285	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
	12	11,500	25,285	29,25	$I \cdot e^{j0^\circ}$	$U \cdot e^{j0^\circ}$
<b>B'</b>	13	15,300	13,631	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
	14	15,100	13,285	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
	15	15,500	13,285	29,25	$I \cdot e^{j240^\circ}$	$U \cdot e^{j240^\circ}$
<b>C'</b>	16	7,300	13,631	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
	17	7,100	13,285	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$
	18	7,500	13,285	29,25	$I \cdot e^{j120^\circ}$	$U \cdot e^{j120^\circ}$



**Figura 4.28.** Stâlp de susținere normal Sn 400.231/232 (dimensiunile sunt în mm)

Se consideră că circuitul LEA este perfect echilibrat, adică curenții pe cele trei au amplitudini egale și sunt defazați la  $120^\circ$  unul față de altul (în practică, liniile electrice aeriene funcționează cu fazele ușor nesimetrice).

Deoarece intensitatea câmpului magnetic și intensitatea câmpului electric depind de înălțimea liniei față de sol, s-au considerat, pentru calcul, trei înălțimi a LEA,  $h_i = 9$  m, 13,4 m și respectiv 22,2 m calculată cu relațiile 4.1-4.3, unde  $h_{\max}$  reprezintă înălțimea de prindere a conductoarelor (la stâlp), iar  $f = 13,2$  m este săgeata acestora.

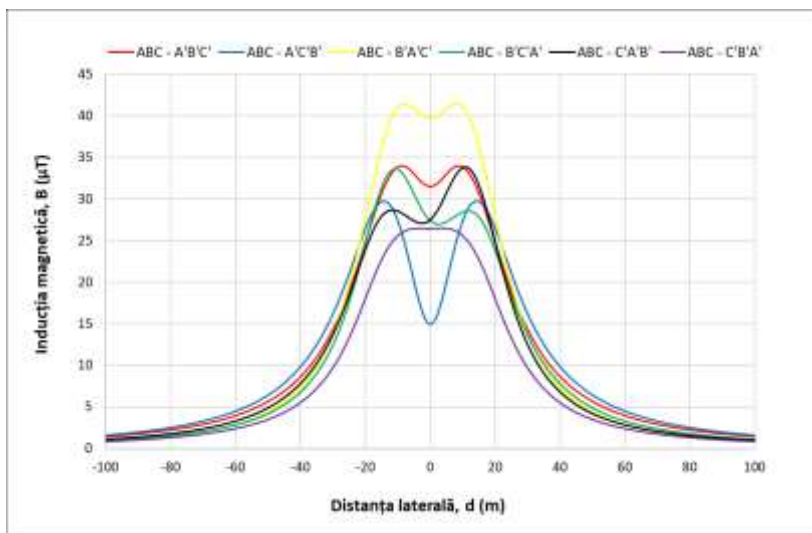
De asemenea, deoarece nivelul câmpului magnetic din vecinătatea LEA depinde de intensitatea curentului transportat, în vederea determinării nivelurilor de expunere tipice, s-a considerat o valoare efectivă a curentului  $I = 975$  A (încărcarea maximă a liniei 3 x I), iar nivelul câmpului electric depinde de valoarea tensiunii de alimentare, valoarea efectivă a tensiunii de fază  $U = 230,94$  kV.

### Calculul câmpului magnetic

Pentru evaluarea câmpului magnetic generat de LEA 400 kV dublu circuit, s-au considerat pentru calculul numeric toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor, ABC – A'B'C' a furnizat valori efective ale inducției magnetice de 34,02

$\mu\text{T}$ , iar valoarea în cazul fazelor transpuse  $ABC - C'B'A'$  este de  $26,42 \mu\text{T}$ , în timp ce la marginea profilului lateral a LEA 400 kV dublu circuit, la 37,5 m de la centrul LEA 400 kV dublu circuit, conform reglementărilor naționale [58]. Câmpul magnetic scade la  $9,71 \mu\text{T}$  în cazul fazelor netranspuse, respectiv la  $6,27 \mu\text{T}$  în cazul fazelor transpuse. Valoarea de  $0,4 \mu\text{T}$ , folosită adesea în studiile epidemiologice, nu este atinsă nici la distanța laterală de 100 m în toate cazurile de transpunere a fazelor.

Figura 4.29 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective a inducției magnetice pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.

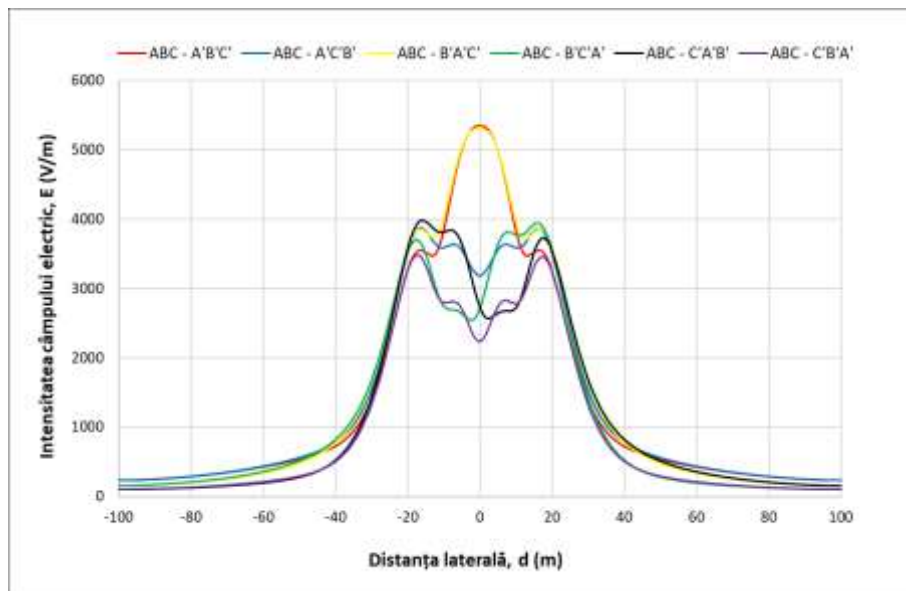


**Figura 4.29.** Comparații ale profiluri laterale ale valorii efective ale intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazurile posibile de transpunere a fazelor

### Calculul câmpului electric

Pentru evaluarea câmpului electric generat de LEA 400 kV dublu circuit, s-au considerat pentru calculul numeric toate cele șase cazuri de transpunere teoretice posibile. Cazul de netranspunere a fazelor,  $ABC - A'B'C'$  a furnizat cele mai mari valori efective ale intensității câmpului electric ( $5353,34 \text{ V/m}$ ), iar valorile cele mai mici au fost furnizate în cazul fazelor complet transpuse  $ABC - C'B'A'$  ( $3483,75 \text{ V/m}$ ), în timp ce la marginea profilului lateral a LEA 400 kV dublu circuit, la 37,5 m de la centrul acesteia, conform reglementărilor naționale [58], câmpul electric scade la  $811,13 \text{ V/m}$  în cazul fazelor netranspuse, respectiv la  $625,34 \text{ V/m}$  în cazul fazelor complet transpuse.

Figura 4.30 prezintă comparații ale profilurilor laterale ale valorii efective ale intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazuri posibile de transpunere a fazelor.



**Figura 4.30.** Comparații ale profiluri laterale ale valorii efective a intensității câmpului electric pentru toate cele șase cazurile posibile de transpunere a fazelor

## CAPITOLUL 5

### Studiu experimental privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență din diferite zone urbane ale orașului Iași

Monitorizarea câmpului magnetic de joasă frecvență se poate realiza atât cu senzori fiși cât și cu ajutorul unor echipamente mobile de măsurare.

În acest capitol este prezentat un studiu în care s-au efectuat o serie de măsurări a câmpului magnetic de joasă frecvență cu ajutorul echipamentului Extech 480826 (Măsurător triaxial de câmp magnetic) [60] prezentat în Figura 5.1, cu scopul determinării nivelului de expunere a publicului general la aceste câmpuri.



**Figura 5.1.** Măsurător triaxial de câmp magnetic Extech 480826 [60]

Toate măsurările s-au efectuat pe teren, în mediul urban al orașului Iași, punctul de măsură fiind întotdeauna la 1 metru deasupra solului. Măsurătorile s-au efectuat în mai multe zone: zona străzilor pietonale, zona piețelor publice, zona parcurilor, zona parcărilor publice, zona vecinătăților posturilor de transformare a energiei electrice și zona vecinătăților stațiilor de transformare și distribuție a energiei electrice.

Măsurările s-au efectuat respectând reglementărilor și normativelor pe plan național, acestea la rândul lor respectând recomandările și directivele instituțiilor internaționale de profil.

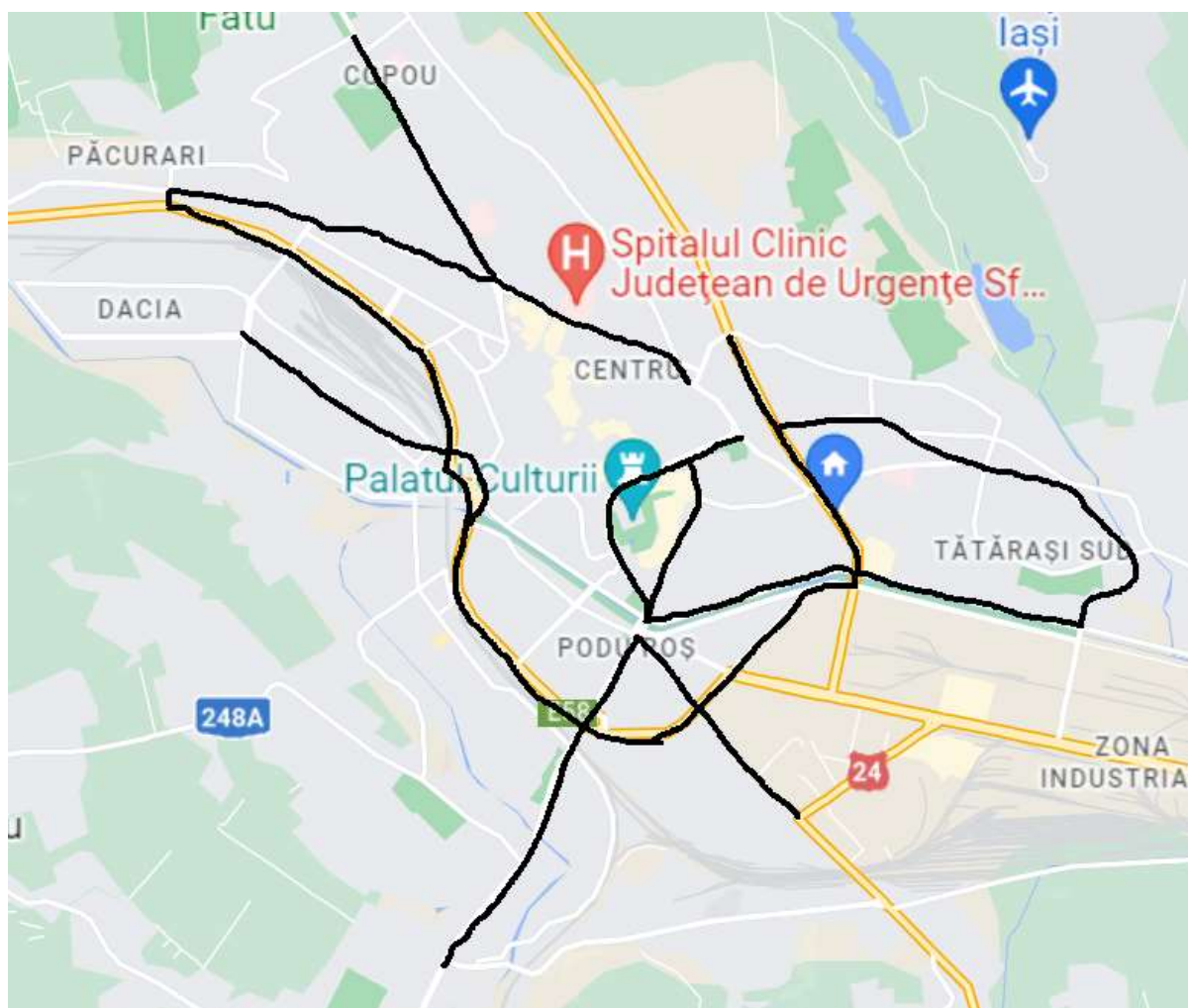
În fiecare punct de măsurare a câmpului magnetic, inducția magnetică totală a fost calculată cu relația 5.1 pe baza valorilor efective măsurate pe cele trei direcții ortogonale, x, y, z, cu ajutorul formulei:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad 5.1$$

## 5.1. Evaluarea câmpului magnetic din zonele stradale pietonale ale orașului

### Iași

Pentru evaluarea câmpului magnetic din zonele stradale pietonale ale orașului Iași, s-au efectuat un număr de 1019 măsurări pe un număr total de 17 străzi pietonale. Harta cu străzile unde au fost efectuate măsurătorile este prezentată în Figura 5.2.



**Figura 5.2.** Harta cu străzile unde au fost efectuate măsurătorile inducției magnetice

Rezultatele măsurărilor efectuate pe străzile pietonale, numărul de măsurări pe fiecare stradă, inducția magnetică maximă sunt prezentate în Tabelul 5.1.

Se poate observa că în majoritatea cazurilor, inducția maximă măsurată depășește valoare de  $0,4 \mu\text{T}$ , ceea ce poate reprezenta posibilitatea apariției unor efecte biologice la expuneri pe termen lung. Valoarea maximă a inducției magnetice măsurată de  $2,30 \mu\text{T}$  este pe strada „Bulevardul Tudor Vladimirescu” reprezentând doar 1,15% din limita ICNIRP.



**Tabelul 5.1. Măsurările câmpului magnetic în zonele stradale pietonale ale oraşului Iaşi**

<i>Nr. crt.</i>	<i>Nume stradă</i>	<i>Nr. total de măsurători</i>	<i>B<sub>max</sub> (µT)</i>
1	Splai Bahlui	26	0,56
2	Strada Palat	26	0,38
3	Strada Anastasie Panu	20	0,48
4	Strada Sfântul Lazăr	20	0,79
5	Bulevardul Carol	19	1,04
6	Strada Independenţei	33	0,42
7	Bulevardul Tudor Vladimirescu (Podul de fier – Bucşinescu)	54	0,72
8	Bulevardul Tudor Vladimirescu (Bucşinescu – Iulius Mall)	30	2,30
9	Bulevardul Socola	56	1,18
10	Strada Vasile Lupu	159	1,01
11	Bulevardul Primăverii	40	0,07
12	Bulevardul Nicolae Iorga	75	0,29
13	Strada Silvestru	94	0,30
14	Strada Păcurari	118	0,64
15	Bulevardul Alexandru cel Bun	84	0,52
16	Şoseaua Nicolina	115	1,10
17	Bulevardul Chimiei	50	0,47

## 5.2. Evaluarea câmpului magnetic din pieţele publice ale oraşului Iaşi

Pieţele publice reprezintă locuri de întâlnire şi de socializare, aglomeraţia din aceste locuri poate varia semnificativ şi este influenţată de mai mulţi factori. Indiferent de nivelul de aglomeraţie, aceste locuri rămân destinaţii preferate de către oameni şi din acest motiv prezintă interes pentru măsurarea inducţiei magnetice, în vederea interpretării rezultatelor şi stabilirii nivelurilor la care aceştia se expun.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din pieţele publice au fost efectuate un număr de 119 măsurări a inducţiei magnetice în patru pieţe publice din oraşul Iaşi.

## 5.3. Evaluarea câmpului magnetic din parcurile oraşului Iaşi

Parcurile sunt zone amenajate în principal pentru recreere, relaxare şi conservarea naturii. Ele pot varia ca dimensiune şi caracteristici, incluzând spaţii verzi urbane, rezervaţii naturale, parcuri naţionale, parcuri de distracţii, grădini botanice sau zoologice.

Prin amenajarea acestor spaţii, se urmăreşte adesea îmbunătăţirea calităţii vieţii locuitorilor, conservarea biodiversităţii, promovarea activităţilor recreative şi sportive în aer liber şi educarea publicului în legătură cu mediul înconjurător. Parcurile pot servi, de asemenea, ca spaţii de întâlnire socială şi de cultură comunitară.

Prin urmare, când oamenii doresc să petreacă timp pentru recreere, relaxare și practicarea de activități sportive în aer liber, parcurile sunt destinațiile preferate de aceștia, ceea ce subliniază interesul real pentru măsurarea inducției magnetice în aceste locuri.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din parcuri au fost efectuate un număr de 112 măsurări ale inducției magnetice, în patru mari parcuri din orașul Iași.

#### **5.4. Evaluarea câmpului magnetic din parcările publice ale orașului Iași**

Parcările sunt zone special amenajate destinate staționării temporare a autovehiculelor. Acestea pot fi amplasate în diverse locații, cum ar fi străzi, piețe, clădiri comerciale sau rezidențiale, aeroporturi, centre comerciale etc. Atunci când oamenii merg la magazin, majoritatea dintre ei o fac cu autoturismul propriu, astfel aceștia au nevoie de un loc parcare pentru a-și asigura accesul ușor și comod la destinația dorită. Chiar dacă timpul petrecut de la parcare și până la intrarea în magazine este relativ destul de scurt, aceștia se expun la câmpul magnetic prezent în astfel de locuri, lucru ce face ca măsurarea inducției magnetice în aceste locuri să fie necesară.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din parcări au fost efectuate un număr de 118 măsurări a inducției magnetice în unele dintre cele mai mari și utilizate parcări din orașul Iași. Trei dintre acestea aparțin unor complexe comerciale, una este deținută de două mari magazine și una este parcare la facultății de Inginerie Chimică și Protecția Mediului "Cristofor Simionescu".

#### **5.5. Evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea posturilor de transformare din orașul Iași**

Posturile de transformare a energiei electrice modifică tensiunea de medie (6, 10, 20 kV) în tensiune joasă (0,4 kV). Majoritatea posturilor de transformare a energiei electrice din orașul Iași sunt în construcție zidită și în anvelopă metalică. Acestea, de obicei, sunt amplasate în apropierea zonelor locuite sau tranzitate de către om. În cazul posturilor de transformare în construcție zidită, majoritatea sunt amplasate lângă peretele blocului de locuințe sau chiar în interiorul acestuia. Din acest motiv măsurarea inducției magnetice este imperios necesară în vederea interpretării rezultatelor și stabilirii nivelurilor la care locuitorii se expun.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea posturilor de transformare aflate în orașul Iași, s-au efectuat un număr de 259 măsurări la 25 de posturi de transformare a energiei electrice.

S-au considerat trei cazuri în vederea măsurării distanței din vecinătatea postului de transformare (lângă acesta, la 1 metru și 2 metri față de acesta). Aceste distanțe s-au păstrat pe toate cele patru laturi ale postului de transformare. În anumite cazuri, o latură sau mai multe a acestuia este

lipită de un bloc de locuințe sau accesul pe una dintre aceste este blocat, deci măsurările s-au efectuat pe laturile libere.

**Tabelul 5.2.** Măsurările câmpului magnetic în vecinătatea posturilor de transformare

<i>Nr. crt.</i>	<i>Denumire PT</i>	<i>Nr. total de măsurări măsurători</i>	<i>B<sub>max</sub> (μT) lângă PT</i>	<i>B<sub>max</sub> (μT) la distanța de 1m față de PT</i>	<i>B<sub>max</sub> (μT) la distanța de 2m față de PT</i>
1	PT 681	10	0,70	0,43	0,13
2	PT 341	6	0,27	0,17	0,09
3	PT 392	12	11,45	2,80	1,41
4	PT 180	9	1,18	0,50	0,08
5	PT 416	12	22,27	5,07	3,11
6	PT 523	15	18,33	5,05	1,34
7	PT 389	11	4,36	0,47	0,13
8	PT 154	9	10,63	2,17	0,64
9	PT 482	10	16,23	1,18	0,59
10	PT 483	13	21,33	2,60	1,32
11	PT 468	10	0,29	0,10	0,06
12	PT 469	10	2,00	0,55	0,23
13	PT 453	10	0,65	0,38	0,14
14	PT 467	10	1,04	0,41	0,19
15	PT 474	10	0,48	0,26	0,11
16	PT 478	10	4,64	1,88	0,51
17	PT 454	10	4,42	1,15	0,47
18	PT 452	10	1,52	0,38	0,19
19	PT 602	10	3,94	1,10	0,36
20	PT 605	12	5,24	1,22	0,35
21	PT 606	10	5,23	1,40	0,43
22	PT 795	10	7,19	3,22	0,70
23	PT 914	10	1,76	0,90	0,33
24	PT 604	10	15,75	4,62	1,05
25	PT 603	10	4,42	1,55	0,72

Se poate observa că cele mai mari valori ale inducției magnetice sunt lângă acesta, valoarea maximă este de 22,27 μT, măsurată la postul de transformare a energie electrice, PT 416, reprezentând 11,14 % din limita de expunere de 200 μT. Cea mai mică valoare măsurată lângă post este de 0,27 μT, măsurată la postul de transformare a energie electrice, PT 341, reprezentând 0,14 % din limita de expunere de 200 μT.

La distanța de 1 metru față de postul de transformare a energie electrice, valorile măsurate sunt de la 5,07 μT până la 0,10 μT, iar la distanța de 3 metri față de acesta, valorile măsurate sunt de la 3,11 μT până la 0,08 μT. Se poate observa cum valoarea inducției magnetice scade foarte rapid cu distanța față de postul de transformare.

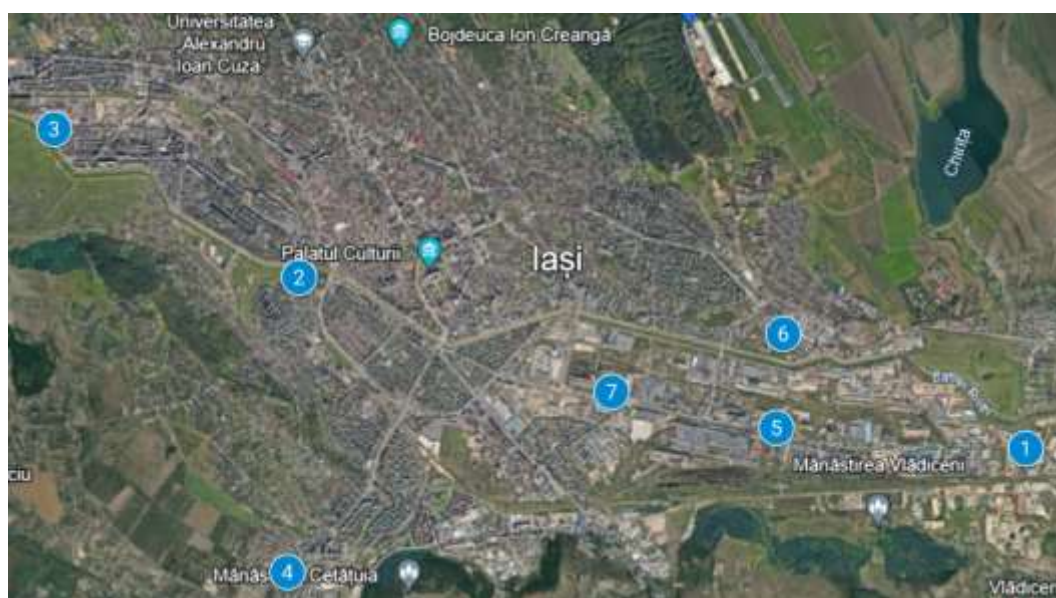
## 5.6. Evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea stațiilor de transformare din orașul Iași

Stațiile de transformare a energiei electrice sunt considerate noduri într-o rețea electrică, acestea se împart în două mari categorii:

- Stații de transformare ÎT/ÎT (întă tensiune/întă tensiune), acestea sunt situate în punctele strategice, modificând nivelul de tensiune pentru a facilita transportul energiei electrice pe distanțe lungi.
- Stații de transformare ÎT/MT (întă tensiune/medie tensiune), acestea sunt localizate în zonele urbane sau în apropierea acestora și sunt folosite pentru a reduce nivelul de tensiune utilizat la transportul energiei electrice (110, 220, 400 kV) până la nivelul de tensiune folosit pentru distribuția acesteia (6, 10, 20 kV).

Stațiile de transformare a energiei electrice pot fi surse puternice de câmp magnetic, mai ales în vecinătatea acestora, deoarece intrările acestora sunt liniile electrice de transport a energiei, iar ieșirile lor sunt linii electrice de distribuție a energiei. Câmpul magnetic produs de echipamentele stației în special de transformatorul sau transformatoarele acesteia scade rapid cu distanța, ajungând foarte reduse în vecinătatea acestora.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea stațiilor de transformare a energiei electrice au fost efectuate un număr total de 215 măsurări ale inducției magnetice, în șapte stații din orașul Iași. Toate aceste stații sunt în gestiunea operatorului de distribuție din regiunea Moldovei (Delgaz Grid S.A.). În Figura 5.3 se poate observa că acestea sunt amplasate pe suprafața întregului municipiu.



**Figura 5.3.** Harta cu amplasarea stațiilor de transformare a energiei electrice în orașul Iași

# CAPITOLUL 6

## Concluzii finale, contribuții, direcții viitoare

### Concluzii finale

În **Capitolul 1** am prezentat aspectele generale privind câmpul electromagnetic, unde au fost aduse în discuție spectrul electromagnetic și divizarea lui în cele două mari categorii de radiații ionizante și neionizante, urmat de o clasificare a radiațiilor electromagnetice în funcție de frecvență, lungimea de undă, energia fotonului și acronimele internaționale.

De asemenea am făcut o scurtă prezentare a stadiului actual și a actualității temei, unde am prezentat câteva studii care prezintă posibilitatea asocierii dintre expunerea la câmpuri magnetice de joasă frecvență și riscul de leucemie în special la copii, dar și riscul de apariție a cancerului de sân, cancerului cerebral și leucemie la adulți.

În finalul acestui capitol este prezentată organizarea tezei de doctorat pe capitole.

În **Capitolul 2** am făcut o clasificare a surselor reprezentative de câmp electromagnetic de joasă frecvență, trecând în revistă liniile electrice (aeriene și subterane) pentru transportul și distribuția energie electrice, stațiile de transformare a energiei electrice, posturile de transformare de la medie tensiune la joasă tensiune, instalații electrice interioare și aparatele electrocasnice.

În a doua parte a acestui capitol am prezentat reglementările și nivelurile de referință pentru limitarea expunerii umane la câmpuri electromagnetice de joasă frecvență, aceste reglementări și niveluri sunt recomandate de către Comisia Internațională pentru Protecția împotriva Radiațiilor Neionizante (ICNIRP), adoptate la nivelul Uniunii Europene prin Directiva Europeană 35/2013 și la nivelul României prin Hotărârea nr. 520 din 2016.

În **Capitolul 3** am dezvoltat și validat un model FEM simplu și eficient bazat pe software-ului ANSYS Maxwell 2D, pentru calcularea și analiza câmpurilor magnetice de joasă frecvență generate de cablurile electrice subterane (LES). Comparațiile cu calculele analitice bazate pe legea Biot-Savart și principiul suprapunerii, dezvoltate cu ajutorul software-ului Labview, atât pentru dispunere orizontală cât și pentru dispunere treflă au evidențiat un acord foarte bun între rezultate, astfel încât la înălțimea de 1 metru deasupra solului diferențele inducției magnetice la centrul axei LES, este de numai 2 nT pentru dispunere treflă și de 26 nT pentru dispunere orizontală.

De asemenea am investigat și efectul ecranelor cablurilor asupra reducerii câmpului magnetic, la curentul nominal maxim în condițiile de încărcare echilibrată. Rata de reducere a câmpului magnetic datorată curenților induși în ecran este în mod clar mai mare pentru dispunerea orizontală, dar câmpul magnetic total este semnificativ mai mare față de dispunerea treflă. O situație similară am observat și în cazul aranjamentului a două LES-uri adiacente, atât pentru dispunere orizontală cât și

pentru dispunerea treflă. Cu toate acestea, în ambele cazuri investigate aici, cea mai mare rată de reducere a câmpului magnetic datorată curenților induși în ecran nu este obținută pentru transpunerea totală a fazelor pentru cele două circuite.

Am arătat prin simulare numerică, că valoarea câmpului magnetic rezultat este, de obicei, mai mic decât câmpul magnetic asociat cu conductoarele centrale, ceea ce confirmă afirmațiile unor autori străini, dintr-o lucrare anterioară [61].

Modelul 2D ANSYS Maxwell pe care l-am propus și realizat în acest capitol poate fi adaptat pentru a calcula distribuțiile câmpului magnetic pentru orice configurație de cablu, precum și pentru diferite tipuri de grupări de cabluri, ținând seama de factorii de influență cum ar fi distanța dintre cabluri, adâncimea de îngropare, transpunerea fazelor, permeabilitatea magnetică a solului. Modelul poate fi utilizat ca instrument precis pentru determinarea nivelurilor de expunere la câmp magnetic, dar și pentru optimizarea amplasamentului și locației cablurilor pentru a atenua câmpul magnetic.

În ansamblu, nivelurile de câmp magnetic calculate sunt în concordanță cu rezultatele raportate pentru alte linii subterane de 12/20 kV, în câteva studii anterioare [62,63]. În ceea ce privește câmpurile calculate, acestea se situează cu mult sub limita de expunere ICNIRP, chiar și la nivelul solului. În realitate, deoarece calculele sunt efectuate pentru încărcarea maximă permisă a LES-ului, nivelurile tipice de expunere vor fi chiar mai scăzute.

În **Capitolul 4** am dezvoltat și realizat un model FEM simplu și eficient bazat pe software-ului ANSYS Maxwell 2D, pentru calcularea și analiza câmpurilor electrice și magnetice de joasă frecvență generate de către liniile electrice aeriene (LEA). Modelul este destinat în principal verificării conformității cu limitele de expunere stabilite prin reglementările cu privire la sănătate, dar și alte aplicații pot fi identificate cu ușurință. Comparațiile cu calculele analitice au relevat un acord excelent între rezultate.

Pentru calcularea și analiza câmpurilor electrice și magnetice de joasă frecvență am luat în considerare toate cele trei tensiuni de transport a energie electrice (110 kV, 220 kV și 400 kV). Am considerat că liniile funcționează la încărcare maximă, iar fazele sunt perfect echilibrate.

Pentru LEA 110 kV am simulat câmpul electric și magnetic pentru configurațiile stâlpilor de susținere:

- Stâlp de susținere Sn 110.102 - LEA 110 kV simplu circuit
- Stâlp de susținere Sn 110.252 - LEA 110 kV dublu circuit

Cea mai mare valoare a câmpului electric pentru LEA 110 kV simplu circuit (Sn 110.102) este de 1205 V/m, ceea ce reprezintă 24,1 % din limita de expunere, iar cea mai mare valoare a inducției magnetice este de 9,21  $\mu$ T, ceea ce reprezintă 4,61 % din limită.

Cea mai mare valoare a câmpului electric pentru LEA 110 kV dublu circuit (Sn 110.252), am înregistrat-o pentru cazul de netranspunere a fazelor (ABC – A'B'C) de 1900 V/m, ceea ce reprezintă

38,24 % din limita de expunere, iar cea mai mare valoare a inducției magnetice a fost de 11,78  $\mu\text{T}$ , ceea ce reprezintă 5,89 % din limită înregistrată pentru cazul de transpunere a fazelor (ABC – A'C'B').

Pentru LEA 220 kV am simulat câmpul electric și magnetic pentru configurația stâlpului de susținere:

- Stâlp de susținere Sn 220.202 -LEA 220 kV dublu circuit

Cea mare valoare a câmpului electric pentru LEA 220 kV dublu circuit (Sn 220.202), am înregistrat-o pentru cazul de netranspunere a fazelor (ABC – A'B'C) de 2969 V/m, ceea ce reprezintă 59,38 % din limita de expunere, iar cea mai mare valoare a inducției magnetice a fost de 14,54  $\mu\text{T}$ , ceea ce reprezintă 7,27 % din limită înregistrată pentru cazul de transpunere a fazelor (ABC – A'C'B').

Pentru LEA 400 kV am simulat câmpul electric și magnetic pentru configurațiile stâlpilor de susținere:

- Stâlp de susținere PAS 400.102-LEA 400 kV simplu circuit
- Stâlp de susținere Sn 400.231/232 -LEA 400 kV dublu circuit

Cea mai mare valoare a câmpului electric pentru LEA 400 kV simplu circuit (PAS 400.102), este de 4752 V/m, ceea ce reprezintă 95,04 % din limita de expunere, iar cea mai mare valoare a inducției magnetice este de 33,46  $\mu\text{T}$ , ceea ce reprezintă 16,73 % din limită.

Cea mare valoare a câmpului electric pentru LEA 4000 kV dublu circuit (Sn 400.231/232), am înregistrat-o pentru cazul de netranspunerea a fazelor (ABC – A'B'C) de 5353 V/m, ceea ce reprezintă 107,06 % din limita de expunere, iar cea mai mare valoare a inducției magnetice a fost de 41,52  $\mu\text{T}$ , ceea ce reprezintă 20,76 % din limită înregistrată pentru cazul de transpunere a fazelor (ABC – B'A'C').

Se poate observa că pentru LEA 400 kV (Sn 400.231/232), limita de expunere a câmpului electric este depășită cu 7,06 % exact la centrul ei, majoritatea stâlpilor de LEA 400 kV sunt în afara zonelor rezidențiale ceea ce face ca accesul sub ele să fie mai dificil.

În **Capitolul 5** am realizat un studiu experimental exhaustiv privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență în mediul urban, în condiții *outdoor*, înregistrând peste 1800 de măsurări a inducției magnetice pentru tipurile de medii investigate: stradal, parcuri, piețe publice, parcuri de agrement, parcuri de joacă, în vecinătatea posturilor de transformare 20 kV / 0,4 kV, în vecinătatea stațiilor de transformare și în vecinătatea LEA.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din zonele stradale am efectuat un număr de 1019 măsurări a inducției magnetice pe un număr de 17 străzi din județul municipiul Iași, cea mai mare valoare a inducției magnetice pe care am măsurat-o este de 2,30  $\mu\text{T}$  pe strada „Bulevardul Tudor Vladimirescu” aceasta reprezintă 1,15 % din limita de expunere.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din piețele publice am efectuat un număr de 119 măsurări a inducției magnetice în patru piețe publice din municipiul Iași, cea mai mare valoare a inducției magnetice pe care am măsurat-o este de  $0,22 \mu\text{T}$  în piața publică “Piața Voievozilor” aceasta reprezintă  $0,11 \%$  din limita de expunere.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din parcuri am efectuat un număr de 112 măsurări a inducției magnetice în patru cele mai mari parcuri din municipiul Iași. Cea mai mare valoare a inducției magnetice pe care am măsurat-o este de  $1,13 \mu\text{T}$ , în parcul public “Elena Doamna” și aceasta reprezintă  $0,57 \%$  din limita de expunere.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din parcările publice am realizat 116 măsurări a inducției magnetice în cinci parcări publice din municipiul Iași. Cea mai mare valoare a inducției magnetice pe care am măsurat-o este de  $0,15 \mu\text{T}$ , realizată în parcare publică “parcarea principală a complexului comercial Iulius Mall”. Aceasta reprezintă  $0,08 \%$  din limita de expunere.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea posturilor de transformare a energiei electrice, am efectuat un număr de 259 de măsurări a inducției magnetice pentru 25 de posturi de transformare ( $20 \text{ kV} / 0,4 \text{ kV}$ ) a energiei electrice. Cea mai mare valoare pe care am măsurat-o este de  $22,27 \mu\text{T}$  la postul PT 416, reprezentând  $11,14 \%$  din limita de expunere.

Pentru evaluarea câmpului magnetic din vecinătatea stațiilor de transformare, au fost realizate 215 măsurări a inducției magnetice, în vecinătatea a șapte stații de transformare (înalta tensiune / medie tensiune) a energiei electrice. Cea mai mare valoare a inducției magnetice pe care am măsurat-o este de  $0,76 \mu\text{T}$  și se află în vecinătatea stației “Bularga”, reprezentând  $0,38 \%$  din limita de expunere.

## **Contribuții**

Contribuțiile din cadrul tezei de doctorat aduse în domeniul cercetat sunt:

- Studiul literaturii în vederea caracterizării metodelor de măsurare dar și instrumentației de măsurare a anumitor surse de câmp electromagnetic de joasă frecvență. Totodată, am realizat o sinteză a celor mai reprezentative surse de câmp electromagnetic de joasă frecvență. De asemenea, am pus în evidență nivelurile de expunere atât pentru publicul larg cât și pentru publicul ocupațional.
- Propunerea, realizarea și validarea unui model FEM cu software-ul ANSYS Maxwell 2D pentru calcularea și analiza câmpurilor magnetice de joasă frecvență generate de cablurile electrice subterane (LES)
- Dezvoltarea și validarea unui instrument software pentru calculul analitic al câmpului magnetic generat de LES, ce ține seama și de curenții induși în ecranele cablurilor, atunci când ambele capete ale ecranului sunt legate la pământ.



- Propunerea, realizarea și validarea unui model FEM cu software-ul ANSYS Maxwell 2D pentru calcularea și analiza câmpurilor electrice și magnetice de joasă frecvență generate de liniile electrice aeriene (LEA) folosit pentru a investiga nivelurile de expunere de la diferite selecții de LEA cu tensiuni nominale de 110 kV, 220 kV și 400 kV
- Realizarea unui studiu experimental exhaustiv cu peste 1800 de măsurări în diferite locații privind evaluarea expunerii populației la câmpuri magnetice de joasă frecvență în mediul urban, în condiții *outdoor*, structurate pe câteva tipuri principale de medii investigate (stradal, parcuri, piețe publice, parcuri de agrement, parcuri de joacă, în vecinătatea posturilor de transformare 20 kV / 0,4 kV, în vecinătatea stațiilor de transformare și în vecinătatea LEA).

### **Direcții viitoare**

Printre direcțiile de cercetare vizate în continuare, se numără:

- Studiu comparativ, prin modelare numerică cu software-ul ANSYS Maxwell 3D și măsurări experimentale asupra câmpului electric și magnetic generat de LEA de înaltă tensiune
- Studiu comparativ între câmpurile electrice și magnetice generate de linii electrice aeriene și subterane având tensiuni nominale identice (în principal, linii de distribuție)
- Studiul influenței permeabilității relative a solului asupra distribuției câmpului magnetic generat de LES
- Studiu pentru investigarea efectului curenților neechilibrați asupra câmpului magnetic generat de către liniile electrice aeriene prin simulare numerică
- Studiu pentru investigarea efectului tensiunilor neechilibrate asupra câmpului electric generat de către liniile electrice aeriene prin simulare numerică
- Realizarea unui sistem triaxial pentru măsurarea câmpului magnetic cu banda de frecvență 20 Hz – 2 kHz

## **BIBLIOGRAFIE**

1. ANRE, *Raport anual privind activitatea Autorității Naționale de Reglementare în domeniul energiei, 2020*, <https://arhiva.anre.ro/ro/despre-anre/rapoarte-anuale> , accesat iunie 2023
2. C. Rucareanu, P. Militaru, V. Hotoboc, *Linii electrice aeriene si subterane* , Ed Tehnica, Bucuresti, 1989;
3. ANRE, Normă tehnică privind delimitarea zonelor de protecție și de siguranță aferente capacităților energetice, Anexa Ordin ANRE 239/2019
4. *Factors affecting the field from a power line*, <http://www.emfs.info/sources/overhead/factors/> , Accesat Iunie 2019
5. *Planul de Dezvoltare a RET*, perioada 2020 – 2029, pag. 49, disponibil la: [https://www.transelectrica.ro/documents/10179/11109053/Planul+de+dezvoltare+a+RET+2020\\_2029.pdf/5524ca56-0166-4964-8bf9-b1d2cfaddea0](https://www.transelectrica.ro/documents/10179/11109053/Planul+de+dezvoltare+a+RET+2020_2029.pdf/5524ca56-0166-4964-8bf9-b1d2cfaddea0)
6. Transelectrica, *Raport privind realizarea indicatorilor de performanță pentru serviciile de transport, de sistem și de distribuție a energiei electrice și starea tehnică a rețelelor electrice de transport și de distribuție*, 2021
7. G. Visan, I. T. Pop and C. Munteanu, *Electric and magnetic field distribution in substations belonging to transelectrica TSO*, 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2009.528187
8. A. Hazi, G. Hazi, *Stații și posturi de transformare*, Universitatea din Bacău, Facultatea de Inginerie, 2006
9. <https://www.emfs.info/sources/distribution/uk/>, accesat noiembrie 2022
10. <https://www.emfs.info/sources/distribution/>, accesat noiembrie 2022
11. <https://www.emfs.info/sources/house-wiring/>, accesat decembrie 2022
12. National Radiological Protection Board, National Radiological Protection Board Volume 365: debated on Friday 23 March 2001
13. G. Pedrazzi, C. Galli, M. Mattioli-Belmonte, S. Guizzardi, *Response to: Comment on “The Use of Pulsed Electromagnetic Fields to Promote Bone Responses to Biomaterials In Vitro and In Vivo*, International Journal of Biomaterials, vol. 2020, Article ID 9801420, 3 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9801420>
14. [www.icnirp.org](http://www.icnirp.org), accesat ianuarie 2024
15. 1999/519/EC: *Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)* (OJ L 199 30.07.1999, p. 59, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reco/1999/519/oj>)

16. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 74, 1998, pp. 494-522
17. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of on the *minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*, (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC, 26 June 2013
18. Hotărâre nr. 520/2016, *Cerințele minime de securitate și sănătate referitoare la expunerea lucrătorilor la riscuri generale de câmpuri electromagnetice*, Monitorul Oficial, 2016, nr. 576
19. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)*, Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp. 818-836, 2010
20. S.A. Annestrand, Power Transmission, High-Voltage, Editor(s): Robert A. Meyers, *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, Academic Press, 2003, Pages 35-55, ISBN 9780122274107, <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00608-6>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105006086>)
21. EMFs.info, *Underground power cables*, online at <https://www.emfs.info/sources/underground/> (Accessed April 2022).
22. S. Vornicu, E. Lunca, A. Salceanu, *Computation of the Low Frequency Magnetic Fields Generated by a 12/20 kV Underground Power Line*, 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 2018, pp. 0630-0633.
23. National Instruments, *Getting Started with LabVIEW*, June 2013, 373427J-01.
24. Gouda, O.E. *Environmental Impacts on Underground Power Distribution*, 1st ed.; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2016.A
25. Ocłó ´n, P.; Cisek, P.; Pilarczyk, M.; Taler, D. *Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil*, Energy Conv. Manag. 2015, 95, 352–370Aa
26. ANRE, NTE 007/08/00; *Normative Document Regarding the Design and Execution of the Electrical Cable Networks*, Bucharest, Romania, 2008. Available online: [https://anre.ro/wp-content/uploads/2023/04/ORDIN\\_38\\_NTE\\_007\\_Normativ.pdf](https://anre.ro/wp-content/uploads/2023/04/ORDIN_38_NTE_007_Normativ.pdf) (accessed on 20 April 2023).
27. Maxwell Help, Release 2021 R1; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2021
28. IEC 60287-1-1; *Electric Cables—Calculation of the Current Rating—Part 1-1: Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculation of Losses—General, Edition 2.1*. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2014

29. E. Lunca.; B.C. Neagu.; S. Vornicu, *Finite Element Analysis of Electromagnetic Fields Emitted by Overhead High-Voltage Power Lines*. In *Numerical Methods for Energy Applications*, 1st ed.; Mahdavi Tabatabaei, N., Bizon, N., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2021; Volume 1, pp. 795-821
30. A. Salceanu, S. Vornicu, D. F. Bordeianu and C. D. Neagu, "Study Upon the Influence of Bundle Configurations on Corona Losses," 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2020, pp. 674-679, doi: 10.1109/EPE50722.2020.9305562.
31. S. Vornicu, E. Lunca, B. C. Neagu and F. C. Baiceanu, *Assessment of Extremely Low-Frequency Magnetic Field from Multiple High-Voltage Overhead Power Lines in Parallel Configuration*, 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 723-726, doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959750
32. E. Lunca, S. Vornicu, I. Pavel and M. Andrusca, *Measurement and Numerical Simulation of the Low-Frequency Electric Field Generated by an Overhead Power Line*, 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2022, pp. 719-722, doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959872
33. Pavel, I.; Petrescu, C.; David, V.; Lunca, E. Estimation of the Spatial and Temporal Distribution of Magnetic Fields around Overhead Power Lines—A Case Study. *Mathematics* 2023, 11, 2292. <https://doi.org/10.3390/math11102292>
34. IEEE (2002) C95.6-2002 IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields 0 to 3 kHz, New York Aa
35. J.T. Porsius, L. Claassen, T. Smid et al., *Health responses to a new high-voltage power line route: design of a quasi-experimental prospective field study in the Netherlands*, *BMC Public Health* 14(237):1-12. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3975333/#B8>. Accessed 28 Sep 2019.Aa
36. S.M. Elhabashi, J.E. Ehtaiba, *Electric Fields Intensity around the New 400 kV Power Transmission Lines in Libya*, In: *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control and Signal Processing*, Cairo, 29-31 December 2007, pp 390-398
37. EMFs.info, *Factors affecting the field from a power line*, 2019, <http://www.emfs.info/sources/overhead/factors/>. Accessed 28 Sep 2022.A
38. E. Fuchs, M.A.S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier Academic Press, Burlington, 2008.
39. R.G. Olsen, D. Deno, Baishiki RS et al (1988) Magnetic fields from electric power lines: theory and comparison to measurements. *IEEE Trans. Power Delivery* 3(4):2127-2136.

40. S. Vujević, T. Lovrić, T. Modrić, *2D Computation and Measurement of Electric and Magnetic Fields of Overhead Electric Power Lines*, In: Proceedings of the Joint 3rd International Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization (INDS'11) & 16th International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET'11), Klagenfurt, 25-27 July 2011, pp 1-6.
41. D. Medved, L. Mišenčik, M. Kolcun et al., *Measuring of Magnetic Field around Power Lines*, In: Proceedings of the 8th International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2015, Stará Lesná, 16-18 September 2015, pp 148-151.
42. W. Tourab, A. Babouri, *Measurement and Modeling of Personal Exposure to the Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of High Voltage Power Lines*, Saf Health Work 7(2):102-110, 2016
43. G. Filippopoulos, D.K. Tsanakas, *Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines*, 2005. IEEE Trans. Power Delivery 20(2):1474-1482.
44. F. Moro, R. Turri, *Fast Analytical Computation of Power-Line Magnetic Fields by Complex Vector Method*, 2008, IEEE Trans. Power Delivery 23(2):1042-1048
45. I.N. Ztoupis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, *Calculation of Power Frequency Fields from High Voltage Overhead Lines in Residential Areas*, In: Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, 25-30 August 2013, pp 61-66
46. E. Lunca, M. Istrate, A. Salceanu et al., *Computation of the Magnetic Field Exposure from 110 kV Overhead Power Lines*, In: Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Power Engineering, Iași, 25-27 October 2012, pp 628-631.
47. [63] E. Lunca, M. Istrate, A. Salceanu, *Comparative analysis of the extremely low-frequency magnetic field exposure from overhead power lines*, 2013, Environ Eng Manag J 12(6):1145-1152.
48. A. Salceanu, E. Lunca, M. Paulet, *Affordable evaluation of low frequency electric fields from the standpoint of Directive 2013/35/EU*, 2017, ACTA IMEKO, 6(4):37-45.
49. Lunca E, Vornicu S, Salceanu A (2018) 2D Finite Element Model for computing the electric field strength-rms generated by overhead power lines. J Phys Conf Ser, 1065:1-4.
50. Transelectrica (2022) Power Transmission Grid. <http://www.transelectrica.ro/en/web/tel/date-generale-management>, accesat Iulie 2022.
51. Salceanu A., Ursache S., Asiminicesei O.M., Lazarescu C., *Phasing Effect on the Electric Fields Generated by High Voltage Overhead Power Lines*, 2018, Proceedings of 10-th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 18-19 October 2018, Iasi, Romania, pp 0759-0764

52. Transelectrica (2022) Power Transmission Grid [https://www.transelectrica.ro/documents/10179/25146/Harta+RET\\_EN.pdf/37ef21da-8490-4504-b6f5-81baf0a68542](https://www.transelectrica.ro/documents/10179/25146/Harta+RET_EN.pdf/37ef21da-8490-4504-b6f5-81baf0a68542), accesat August 2022
53. S.F. Braicu, L. Czumbil, D. Șteț, D.D. Micu (2017) Evaluation of the Electric and Magnetic Field near High Voltage Power Lines. In: Vlad S, Roman NM (eds) MEDITECH 2016. 5th International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology, Cluj-Napoca, October 2016. IFMBE Proceedings, vol. 59, Springer International Publishing, p 141.
54. S.A Ghani, M.S. Ahmad Khair MS, I.S. Chairul, M. Y. Lada and N. H. Rahim, (2014) Study of magnetic fields produced by transmission line tower using finite element method (FEM). In: Proceedings of the 2nd International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment, Bandung, 19-21 August 2014, pp 64-68.
55. EMFs.info (2019) Phasing – How the phasing affects the field produced by an overhead line. <http://www.emfs.info/sources/overhead/factors/phasing/>. Accessed 28 Sep 2019.
56. Ponnle AA, Adedeji KB, Abe BT et al (2017), Variation in Phase Shift of Phase Arrangements on Magnetic Field Underneath Overhead Double-Circuit HVTLs: Field Distribution and Polarization Study. Prog Electromagn Res M, 56:157-167.
57. Lunca E, Ursache S, Salceanu A (2017) Characterization of the Electric and Magnetic Field Exposure from a 400 kV Overhead Power Transmission Line in Romania. In: Proceedings of the 22nd IMEKO TC4 International Symposium and 20th International Workshop on ADC Modelling and Testing, Iasi, 14-15 September 2017, pp 239-243.
58. ANRE (2007) Technical norm regarding the delimitation of the protection and safety zones associated with energy capacities – Revision I of 09 March 2007.
59. Grigsby LL (2012) Electric Power Generation, Transmission, and Distribution, Third Edition. CRC Press, Boca Raton.
60. Extech 480826 datasheet.
61. V. Grinchenko, O. Tkachenko, K. Chunikhin “Magnetic Field Calculation of Cable Line with Two-Point Bonded Shields”, 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, YSF-2017
62. G. Rosu and O. Baltag, “The Analysis of Magnetic Field Measurements in a Public Access Area,” Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 40, pp. 135-140, 2016.
63. T. Keikko, J. Isokorpi, S. Reivonen, T. Ruoho, and L. Korpinen, “Magnetic field measurements and calculations with 20 kV underground power cables,” WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol. 21, pp. 27-36, 1999.