

## **Paradigme elektromagnetskih zračenja u tehnici i medicini**

**Sažetak:** Hrvatska legislativa propisuje razine elektromagnetskih zračenja u našem okruženju. Primjeri iz prakse upozoravaju na važnost prepoznavanja razlikovanja elektromagnetskih zračenja koja su rezultat rada elektrotehničkih uređaja odnosno postrojenja koja generiraju zračenje te elektromagnetskih zračenja namjenske uporabe dijagnostičkih uređaja u medicini. Niskofrekvencijska elektromagnetska polja posljedica su izvora zračenja svih komponenata elektroenergetskog sustava frekvencije 50 Hz i nazivnog napona većeg od 1 kV (transformatorske stanice, elektroenergetski vodovi, rasklopna postrojenja...). Ako se promatra svaka pojedinačna komponenta izvora zračenja, onda je formalnim inzistiranjem na udovoljavanju legislativnim zahtjevima zanemarena činjenica i svojstvo da je ta komponenta dio cjeline elektroenergetskog sustava. Elektromagnetska polja analizirana s pomoću elektromagnetskog modela, utemeljenog na primjeni tehnike konačnih elemenata eksperimentalno se provjeravaju mjerenjem i rezultati uspoređuju s graničnim razinama referentnih veličina koje su propisane legislativom. Rezultati istraživanja provedenih u dva smjera na području elektroenergetike i medicine upozoravaju na apsurdnost nekih zahtjeva vezanih uz ponavljanje mjerenja zračenja i ponavljanje zračenja zbog utvrđivanja dijagnostičkih stanja. Kod elektroenergetskih objekata provode se prva mjerenja kako bi potvrdila rezultate proračuna iz elaborata zaštite ili studija. Posebne paradigme dolaze do izražaja za niz tipskih objekata i statističkih obrada dobivenih rezultata koje u fokus stavljaju apsurdnost legislative. U medicini su na primjerima rada dijagnostičkih uređaja, ali i u istraživanjima (UZV, MSCT i MR, frekvencije do 1500 MHz i veličine magnetskog polja preko 45 T) analizirane mogućnosti inteligentnih sustava i obrade rezultata upozoravaju na apsurdnost opetovanih zahtjeva za provedbu određenih postupaka unatoč relevantnim rezultatima i mogućnostima.

**Ključne riječi:** elektromagnetsko, ionizirajuće, polje, zračenje, uređaj, UZV, MSCT, NMR

## Uvod

Rezultati istraživanja provedenih u dva smjera na području elektroenergetike i medicine upozoravaju na apsurdnost nekih zahtjeva vezanih uz ponavljanje mjerenja zračenja i ponavljanje zračenja zbog utvrđivanja dijagnostičkih stanja. Kod elektroenergetskih objekata (EEO) provode se mjerenja kako bi se potvrdili rezultati proračuna iz elaborata zaštite ili studija. Posebne paradigme dolaze do izražaja za niz tipskih objekata i statističkih obrada dobivenih rezultata koje u fokus stavljaju apsurdnost legislative. U medicini su na primjerima rada dijagnostičkih uređaja analizirane mogućnosti inteligentnih sustava obrade rezultata mjerenja koji upozoravaju na apsurdnost opetovanih zahtjeva za ponovnu provedbu zračenja unatoč rezultatima kojima je utvrđeno relevantno stanje za provedbu zahvata. U svim tim slučajevima do izražaja posebno dolazi stručnost osoblja koje rukuje uređajima i obrađuje rezultate mjerenja. To su stručnjaci novog profila, u praksi prepoznati kao ‘inženjeri znanja’.

## 1. Elektromagnetska polja

Električne i magnetske pojave proučavali su mnogi fizičari. Vrijedno je istaknuti bar neke od njih, kao što su Karl Friedrich Gauss, Hans Christian Oersted, André Marie Ampère, Michael Faraday, Joseph Henry i dr. Najznačajniju ulogu u proučavanju elektromagnetskih polja odigrao je škotski fizičar James Clark Maxwell. On je svojim Maxwellovim jednadžbama, koje je eksperimentalno potvrdio njemački fizičar Heinrich Hertz, predstavio Faradayev zakon kojim dokazuje kako promjenjivo magnetsko polje prouzročuje električno polje. Ta je potvrda ujedno Ampèreova veza jakosti struje i magnetskog polja koja uključuje i Coulombov zakon, odnosno njegovo poopćenje u Gaussovu zakonu.

### 1.1. Maxwellova izmjenična harmonijska promjenjiva elektromagnetska polja

Maxwellove diferencijalne jednadžbe za izmjenično harmonijski promjenjivo elektromagnetsko polje (EMP) daju Helmholtzove nehomogene diferencijalne jednadžbe potencijala u sljedećem obliku, [1]:

$$\Delta \bar{\phi} - \bar{\gamma}^2 \cdot \bar{\phi} = \frac{\nabla \bar{J}_s}{\bar{\kappa}} \quad (1)$$

$$\Delta \bar{A} - \bar{\gamma}^2 \cdot \bar{A} = -\mu_0 \cdot \bar{J}_s \quad (2)$$

gdje je:

- $\bar{\phi}$  fazor skalarnog električnog potencijala
- $\bar{\gamma}$  valna konstanta sredstva
- $\bar{J}_s$  fazor vektora gustoće ukupne struje vanjskih izvora
- $\Delta$  Laplaceov diferencijalni operator
- $\nabla$  Hamiltonov operator
- $\bar{A}$  fazor vektorskog magnetskog potencijala
- $\mu_0$  permeabilnost razmatranog sredstva (zraka ili tla)  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Valna konstanta razmatranog sredstva opisana je izrazom:

$$\bar{\gamma} = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \bar{\kappa}} \quad (3)$$

gdje je:

- $\bar{\kappa}$  kompleksna provodnost (specifična električna vodljivost) sredstva
- $\omega$  kružna frekvencija

Moduli su fazori efektivnih vrijednosti pripadnih veličina, a kružna frekvencija opisana je izrazom:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4)$$

gdje je  $f$  frekvencija. Ako je sredstvo linearno i izotropno, kompleksna provodnost takvog sredstva opisana je izrazom:

$$\bar{\kappa} = \sigma + j \cdot \omega \cdot \varepsilon \quad (5)$$

gdje je  $\sigma$  vodljivost sredstva, a  $\varepsilon$  dielektričnost sredstva:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (6)$$

gdje je  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m, dielektričnost zraka, dok je  $\varepsilon_r$  relativna dielektričnost sredstva.

U linearnom homogenom izotropnom neograničenom sredstvu volumena  $V$ , rješenje jednadžbe skalarnog električnog potencijala glasi:

$$\bar{\phi} = - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \bar{\kappa}} \cdot \int_V \nabla \bar{J}_s \cdot \frac{e^{-\bar{\gamma} \cdot R}}{R} \cdot dV \quad (7)$$

dok rješenje jednadžbe vektorskog magnetskog potencijala glasi:

$$\bar{A} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \int_V \bar{J}_s \cdot \frac{e^{-\bar{\gamma} \cdot R}}{R} \cdot dV \quad (8)$$

gdje je  $R$  udaljenost između točke izvora i točke promatranja. Jednadžbe (1) do (8) sadrže sve relevantne parametre kojima se provode analize uporabom elektromagnetskog modela (EMM) na primjerima elektroenergetskih objekata (EEO) [2].

## 1.2. Izvori i vrste zračenja

Pod zračenjem se najčešće govori o ionizirajućem zračenju (IZ) kao pojavi prijenosa energije koja u međudjelovanju s kemijskom tvari ionizira tu tvar. Tako promatrajući IZ promjena je stanja tvari u mikrosvijetu u energiji ili u sastavu atoma ili atomske jezgre, pri čemu se emitiraju različite čestice. U međudjelovanju s tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari (kvanti elektromagnetskog zračenja). IZ pojava je za koju ljudska osjetila nisu razvijena pa otud i razumljiv čovjekov strah od zračenja. Poznavanje osnovnih svojstava IZ, međudjelovanja zračenja s tvari, a posebno djelovanja zračenja na živa bića, neobično je važno u stručnom i psihološkom smislu. IZ se može sastojati od:

- snopa čestica visokih energija (protona, alfa-čestica ili beta-čestica) ili
- elektromagnetskog zračenja visoke frekvencije (gama-zračenje, rendgensko zračenje, ultraljubičasto zračenje).

Elektromagnetsko zračenje niskih frekvencija je zračenje koje se povezuje s EEO-om i ono je neionizirajuće. Elektromagnetsko ionizirajuće zračenje obuhvaća rendgensko zračenje i gama-zračenje. Međutim, ionizaciju nekih tvari može prouzročiti i ultraljubičasto elektromagnetsko zračenje.

Kad se govori o opasnostima od zračenja potrebno je razlikovati neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. Zračenje koje ima dovoljnu energiju da ionizira neke atome u tijelu narušava biokemijske procese u stanicama. Nastali ioni mogu dovesti do različitih poremećaja u njihovu funkcioniranje i dijeljenju, a za čovjeka to znači bolest.

**Alfa-zračenje** širi se brzinom od oko  $1/20$  brzine svjetlosti. To je dovoljno sporo da mogu relativno dugo međudjelovati s tvari i stoga imaju jak ionizirajući učinak. Zbog svoje veličine brzo se sudaraju s nekim od atoma i gube energiju. Njihov je doseg mali, svega nekoliko centimetara, a zaustavlja ih već koža ili komad papira.

**Beta-zračenje** čine elektroni, negativno nabijene čestice koje putuju velikim brzinama. Ionizirajuće djelovanje elektrona puno je slabije od djelovanja alfa-zračenja, ali im je domet u zraku puno veći, sve do nekoliko metara, a zaustavlja ih već metalna ploča od nekoliko milimetara debljine.

**Gama-zračenje** je elektromagnetsko zračenje velike energije koje potječe iz jezgre atoma, a širi se brzinom svjetlosti. Ionizirajuće djelovanje kod gama-zračenja slabije je od djelovanja beta-čestica, ali mu je domet veći. Prolazi kroz ljudsko tijelo, a može se reducirati s pomoću debelog sloja olova, betona ili vode.

**Rendgensko zračenje ili X-zračenje** ima jednaka svojstva kao i gama-zračenje, ali ima veću valnu duljinu. Razlikuje se od gama-zračenja po tome što potječe od elektrona, a ne iz atomske jezgre.

**Kozmičko zračenje** čine različite visokoenergetske čestice. Intenzivnije je na većim nadmorskim visinama.

**Neutronska zračenje** javlja se uglavnom u nuklearnim reaktorima, a kao zaštita koristi se voda i beton.

Prema aktualnoj legislativi Republike Hrvatske, pojedinačni izvori niskofrekvencijskih (NF) EMP-a su sve komponente elektroenergetskog sustava (EES) nazivnog napona većeg od 1 kV [3, 4], a to su transformatorske stanice (TS), elektroenergetski vodovi, sklopna postrojenja ili bilo koji drugi EEO-i, komponente ili uređaji pod naponom većim od 1 kV. Za njih su propisane granične razine elektromagnetskog zračenja (EMZ). Formalnim inzistiranjem na udovoljavanju legislativnim zahtjevima za utvrđivanje razine zračenja pojedinačnih izvora zanemarena je činjenica da je EES cjelina čije je elektromagnetsko svojstvo superponirano. Iz tog se razloga problematika EMP-a u EES-u analizira korištenjem EMM-a, utemeljenog na primjeni tehnike konačnih elemenata. Ako se promotre sastavnice EMM-a koji je korišten za izračun raspodjele struje zemljospoja u [1], onda iste sastavnice mogu biti i u analizi utvrđivanja EMP-a.

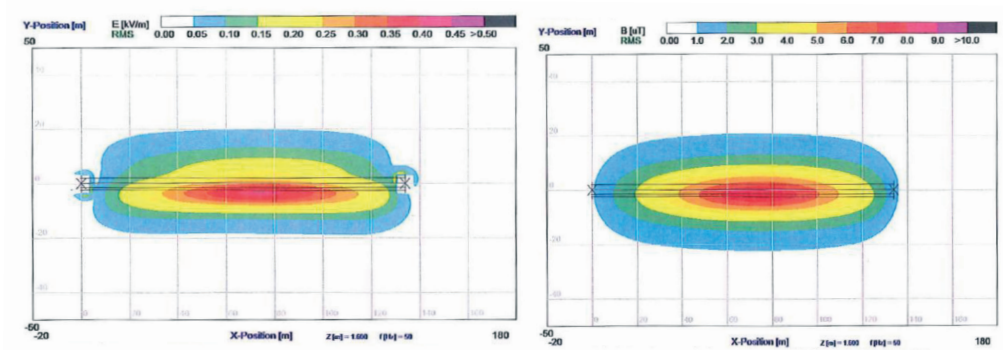
U EMM-u bilo kojeg pojedinačnog izvora tehnički je korektno uzeti u obzir sve sastavnice koje mogu biti međusobno kapacitivno i konduktivno spregnute i kao takve tvore zasebni konačni element. Slično je i sa sastavnicama koje su međusobno induktivno spregnute, jer one također tvore zasebni konačni element. Ovaj pristup bitno odstupa od uobičajenih u praksi reproduciranih dokumenata baziranih na modeliranju komercijalnim programima kao u [3-5], jer obradi problematike pristupa puno kompleksnije, a što je nužno za donošenje zaključaka.

## 2. Elektromagnetska zračenja u elektrotehnici

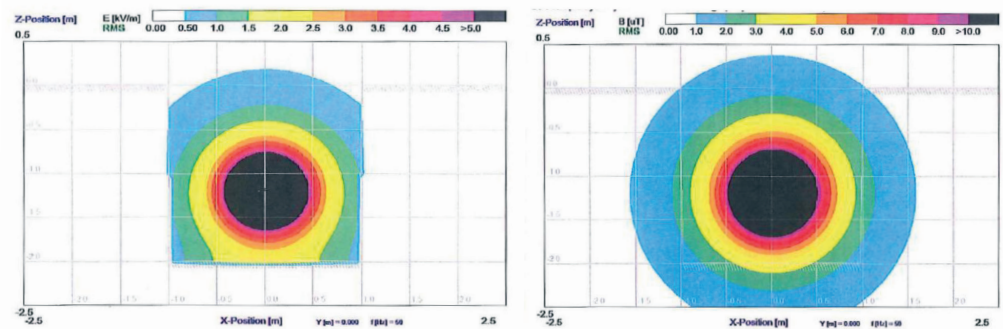
### 2.1. Elaborat zaštite od električnih i magnetskih polja

Elaborat zaštite od električnih i magnetskih polja, za kabelske i zračne vodove (pojedinačne ili rasplete), grafički prezentira u blizini promatranih jediničnih izvora zračenja stanje razdiobe električnog i magnetskog polja, slike 1. – 3.

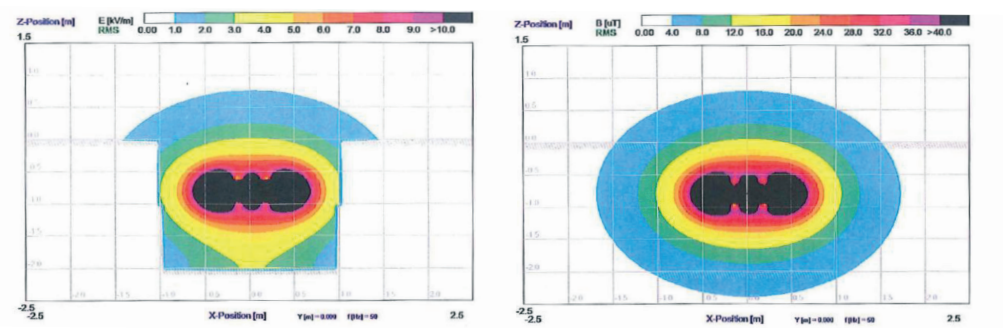
U elaboratima su proračuni maksimalnih vrijednosti jakosti električnih i magnetskih polja za transformatorske stanice (modeliranje se provodi bez modela zidova i ostalih prepreka), proračuni su rezultirali dijagramima koji opisuju trodimenzionalnu ili dvodimenzionalnu raspodjelu gustoće magnetskog toka i jakosti električnog polja u kontinuiranoj raspodjeli s pomoću izosilnica, slike 4. – 6.



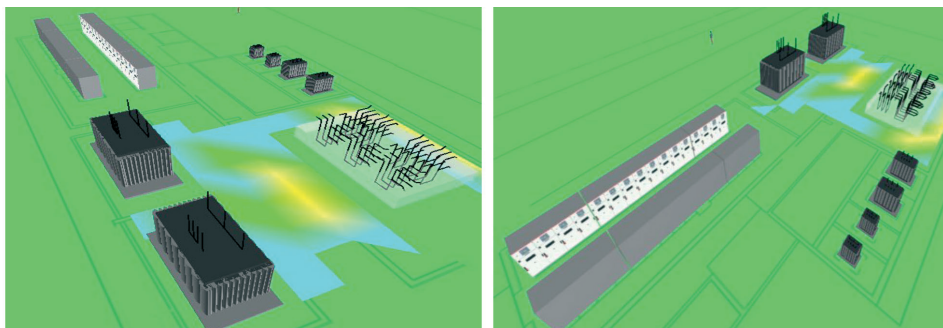
Sl. 1.: Razdioba električnog i magnetskog polja u zoni dalekovoda 35 kV



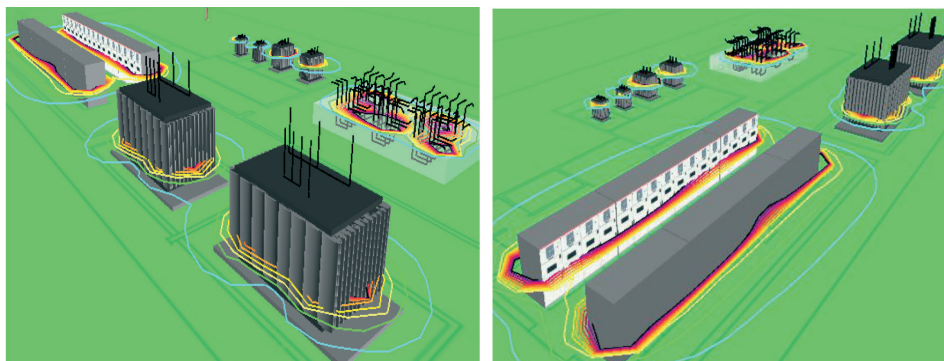
Sl. 2.: Razdioba električnog i magnetskog polja u zoni kabela 35 kV



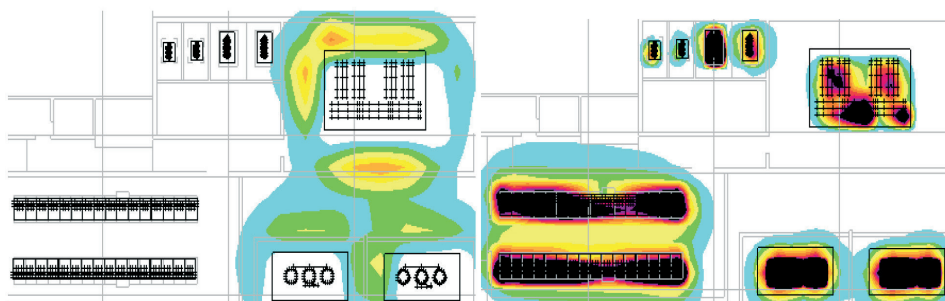
Sl. 3.: Razdioba električnog i magnetskog polja u zoni kabelskog raspleta 20 kV



Sl. 4.: Trodimenzionalni prikaz razdiobe električnog polja svih postrojenja i objekata trafostanice



Sl. 5.: Trodimenzionalni prikaz razdiobe magnetskih polja svih postrojenja i objekata trafostanice



Sl. 6.: Prikaz razdiobe električnih i magnetskih polja na visini 1 m svih postrojenja i objekata trafostanice

Maksimalni napon s kojim se rade proračuni za postrojenje 20 kV iznosi 24 kV. Cjelokupni se proračun provodi modeliranjem i parametrima koji su na strani sigurnosti. Svi proračuni izводе se s maksimalnim vrijednostima strujnog opterećenja, i za vodove i za TS-e koje se u stvarnom pogonu vrlo rijetko javlja. Tako su i ti proračuni na strani sigurnosti.

Elaborat ima za svrhu potvrditi i zaključiti da su projektirana tehnička rješenja zadovoljavajuća i da će emitirana električna i magnetska polja biti vrijednosti niže od dopuštenih graničnih vrijednosti koje su propisane Pravilnikom. Elaboratima se zaključuje da su proračuni na strani sigurnosti i da će očekivane jakosti električnog i magnetskog polja u normalnom pogonu biti manje od graničnih, a kako je riječ o neionizirajućem zračenju, neće biti nikakvih problema vezano uz zaštitu i zdravlje ljudi.

## **2.2. Proračuni, procjene i mjerenja elektromagnetskih polja u postrojenjima**

Proračuni EMP-a, kao što je prethodno izloženo, modeliranje su za nove EEO-e potvrđeno dokumentom u obliku elaborata. Elaborat zaštite od elektromagnetskih polja jedna je od knjiga glavnog projekta i u upravnom postupku ima svoje mjesto. Svatko može uvidom u glavni projekt doći do rezultata koji mogu biti od koristi svima zainteresiranim.

Procjene EMP-a mogu biti interesantne u nekim slučajevima kad se provode prva mjerenja prije puštanja u pogon sa snagom koja je manja od očekivane. Procjena pogona s maksimalno mogućom snagom može potvrditi zadovoljavajuće stanje po pitanju potrebnog provođenja mjera zaštite.

## **2.3. Paradigme mjerenja na tipskim elektroenergetskim objektima**

U konkretnim hrvatskim primjerima Operatora distribucijskog sustava (ODS) akceptirana je realnost da se za tipske objekte može konstatirati oslobađanje obavljanja prvih i periodičnih mjerenja u EEO-ima, kao što su u konkretnom slučaju tipski TS-i snage do 1000 kVA i podzemni kabelski vodovi do 35 kV, [6] i [7]. No određeni se nesporazumi i nelogičnosti javljaju kad se pokuša povući analogija za slične tipske objekte koji u konačnici pripadaju ODS-u, iako su izgrađeni za potrebe drugog vlasnika kao što je bio primjer prilikom izgradnje elektroenergetske infrastrukture hrvatskih autocesta [8] i [9].

Zaključak bi trebao ići u smjeru kako je za svaki EES bitno uvijek prilikom obrade elektromagnetskih polja u obzir uzimati sve komponente koje su tretirane kao jedinični izvori zračenja. Među razvijenijim članicama EU-a može se

prepoznati bazni smisao brige o zaštiti od EMZ-a. Izloženi pristup baziran na EMM-u izazov je za politehniku kao i reakciju stručne javnosti koja je nakon održanog predavanja izravno završila pritisak na meritorne institucije involvirane u provedbu i uspjela riješiti problem nametanja tipskih mjerenja [10 – 13].

Polemike svih aktivnih članica EU-a, izazvane jedinstvenom direktivom, koja se gotovo 30 godina usklađuje, izgubile su smisao. Pojedine članice EU-a uključene u rješavanje te problematike akcent su stavile na zaštitu zdravlja, ne samo kad je u pitanju profesionalna izloženost zračenju, i svoje su djelovanje prezentirale europskoj javnosti kroz EUSTAT – najveću bazu podataka. Kao zaključak o rješavanju problematike utvrđivanja EMP-a korisno je prenijeti onaj s navedenog simpozija koji upozorava na propisane granične razine NF EMP-a, koje emitiraju svi izvori, komponente EES-a, i koji su stroži nego u većini zemalja EU-a. Formalnim inzistiranjem na udovoljavanju legislativnim zahtjevima zanemarena je činjenica i svojstvo EES-a koji je nužno promatrati u cjelini. Iskustva pokazuju da je problematiku EMP-a u EES-u korisnije analizirati korištenjem EMM-a, utemeljenog na primjeni tehnike konačnih elemenata, nego na komercijalnim programima.

Eksperimentalno dobiveni rezultati mjerenja na EES-u uspoređivani su s rezultatima izračunatim s pomoću EMM-a i rezultatima dobivenim komercijalnim programima. Granične razine referentnih veličina na području profesionalne izloženosti i na području povećane osjetljivosti upozoravaju na potrebu preispitivanja zahtjeva vezanih za prva i periodična mjerenja, izradu elaborata zaštite i izradu studija. To posebno dolazi do izražaja za niz tipskih objekata i statističkih obrada dobivenih rezultata. U svakom slučaju, što se tiče NF EMP-a, kojima su izvori svi elementi EES-a, nazivnog napona većeg od 1 kV, velik je broj što izgrađenih što rekonstruiranih TS-a, elektroenergetskih vodova, kabela i sklopnih postrojenja [14 – 17].

Način na koji se može racionalizirati trošak odabire u prvom redu investitor, ali zbog različitih tumačenja ili nepoznavanja same svrhe provedbe zaštite i mjerenja EMP-a, moguće je da struka izgubi bitku u birokratskim pristupima [18 – 23].

### **3. Zračenja u medicini**

#### **3.1. Medicinska radiologija**

Drugo je važno područje u kojem se pojavljuje problematika zračenja područje zdravstva, medicinskih znanosti i dijagnostike u njoj. Radiologija u širem smislu definira se kao znanost o zračenju, a pojam medicinske radiologije podrazumijeva primjenu zračenja u dijagnostici i liječenju bolesti. U počecima je

radiologija bila grana medicine koja je koristila isključivo rendgenske zrake za prikaz željenih anatomskih struktura. Sedamdesetih godina XX. stoljeća dolazi do ubrzanog razvoja medicinske radiologije, ponajviše zahvaljujući sve većoj prisutnosti tehnoloških i računalnih dostignuća. Implementacija informatičko-tehnoloških znanja i dostignuća u medicinskoj radiologiji uvelike je promijenila način njezina poimanja, ponajviše radi uvođenja novih načina, metoda i modaliteta snimanja, kao i postavljanja novih standarda u dijagnostici i liječenju različitih bolesti. U medicini se upotrebljavaju elektromagnetske ionizirajuće zrake (rendgenske i gama-zrake) te korpuskularna zračenja (alfa, beta, neutron-ske zrake).

IZ mijenja stanje tvari u mikrosvijetu u energiji ili u sastavu atoma ili atomske jezgre, pri čemu se emitiraju različite čestice. U međudjelovanju s tvari dolazi do izmjene energije i izmjene strukture ozračene tvari (kvanti elektromagnetskog zračenja).

### 3.2. Mjerenje ionizirajućeg zračenja

Mjerenje IZ-a moguće je različitim pristupima, a izmjere zračenja mogu se izraziti s pomoću više različitih mjernih jedinica.

- Aktivnost izvora zračenja može se izraziti u broju raspada u sekundi (Ci, kiri) ili (Bq, bekerel).
- Zračenje kojem je neki objekt izložen izražava se u rendgenima. Rendgen (R) označava količinu X-zračenja ili gama-zračenja potrebnu da nastane jedan jedinični naboj po  $\text{cm}^3$  suhog zraka u standardnim uvjetima. Rendgen je ograničen samo na X-zračenje i gama-zračenje s energijom manjom od 3 MeV.
- Mjerne jedinice koje se koriste za izražavanje zračenja koje je neki objekt apsorbirao su grej i rad.
- Mjerne jedinice kojima se izražava doza zračenja su rem i sivert (Sv).
- SI jedinica za radioaktivnost je bekerel (Bq) koji označava jedan raspad u sekundi. Kiri (Ci), originalno definiran kao aktivnost jednog grama radija 226, definira se kao  $3,7 \times 10^{10}$  raspada u sekundi, što znači da je  $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .
- Apsorbirana doza zračenja ili rad je količina apsorbiranog zračenja koja predaje 0,01 J energije po kilogramu izloženog materijala.

Grej (Gy) i sivert (Sv) su SI zamjene za rad i rem. Grej se definira kao 1 J apsorbiranog zračenja po kilogramu materijala, što znači da je  $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$ . Sivert je mjerna jedinica za dozu ekvivalent i vrijedi  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$ . Međutim, jednake doze različitih oblika zračenja imaju različite biološke učinke. Stoga je rem definiran kao količina apsorbiranog zračenja koja proizvodi isti biološki

učinak kao jedan rad terapijskih X-zraka, ili kao umnožak apsorbirane doze u radima i doznog ekvivalenta zračenja RBE. Budući da je teško točno izmjeriti dozni ekvivalent pojedinih vrsta zračenja, biofizičari preferiraju definirati rem kao produkt rada i faktora kvalitete (QF) koji se odnosi na linearni prijenos energije (LPE) pojedinih vrsta zračenja. LPE je količina energije koja se rasipa (izražena u kiloelektronvoltima) po duljini puta (u mikrometrima). Zračenju s visokim LPE-om dodjeljuje se visoki QF jer RBE raste s porastom LPE-a, osim kod vrlo velikih vrijednosti LPE-a. Faktori kvalitete izraženi su kroz tipične vrijednosti.

### 3.3. Medicinski dijagnostički uređaji i njihov razvoj

Otkrićem tzv. X-zraka 1895. godine snimljena je prva rendgenska snimka, da bi već 1905. bile opisane granice normalnog i patološkog tkiva. Unutar prvih 30 godina od otkrića rendgenskih zraka razvija se radiografska metoda s nativnim prikazom, da bi u idućem razdoblju prikaz bio poboljšan uporabom kontrastnih sredstava. Primjena kontrastnih sredstava u medicinskoj radiologiji usmjerila je rendgensku dijagnostiku u smjeru specifičnog prikazivanja različitih organskih sustava kao što su fluoroskopija, linearna tomografija, aortografija, urografija, biligrafija, mijelografija i dr. Tijekom 1960-ih dolazi do razvoja ultrazvučne dijagnostike, da bi 1970-ih konvencionalna angiografija bila zamijenjena digitalnom inačicom s mogućnošću trenutačne suptrakcije dijagnostičkog prikaza (engl. *digital subtraction angiography*, DSA). Prikazivanje radiografske snimke krvnih žila u tijelu (protok krvi) dobiveno s pomoću ubrizganog kontrastnog sredstva kroz kateter (male, tanke cijevi), koji se postavlja obično kroz femoralnu arteriju na preponi ili radijalnu arteriju na podlaktici.

Na ranije ustanovljenim teorijskim osnovama, 1980-ih se razvija CT dijagnostika, a nakon 1990. godine dijagnostika magnetskom rezonancijom (MR). Unutar svih radioloških metoda razvijeni su postupci posebne namjene, s dinamičnim i trodimenzionalnim prikazom (Doppler, CT angiografija, MR angiografija i dr.). Intervencijska radiologija, nova grana radiologije, snažno se razvija u zadnjoj dekadi XX. stoljeća šireći paletu vlastitih originalnih metoda u liječenju, prije svega bolesti krvnih žila, ali i drugih organa i anatomske strukture.

Moderniji, novi dijagnostički uređaji u medicini su magnetska rezonancija i kompjutorizirana tomografija. Eksperimentalne temelje modernoj spektroskopiji koja se u početku nazivala nuklearna magnetska rezonancija (NMR) postavio je Felix Bloch, koji je za to dobio Nobelovu nagradu 1952. godine. Željmu da postane inženjer na Visokoj tehničkoj školi u Zürichu (engl. *Federal Institute of Technology*, njem. *Eidgenössische Technische Hochschule*, ETH) ostvario je studirajući na Odsjeku za matematiku i fiziku koji je u to vrijeme bio ishodište

Tablica 1.: Kronološki pregled razvoja nuklearne magnetske rezonancije

| Red. br. | God.  | Nositelj                                                                  | Otkriće / Primjena / Spoznaje / Zasluga                                                                                                                                                           |
|----------|-------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | 1882. | Nikola Tesla (1846. – 1943.)                                              | Otkriće rotirajućeg magnetskog polja – povijest oslikavanja magnetskom rezonancijom (mjerna jedinica magnetskog polja – tesla).                                                                   |
| 2.       | 1886. | Pieter Zeeman (1865. – 1943.)                                             | Otkriće cijepanja spektralnih linija natrija u magnetskom polju. Osnove magnetske rezonancije. Nobelova nagrada 1902. za taj rad.                                                                 |
| 3.       | 1895. | Wilhelm C. Röntgen, (1845. – 1923.)                                       | Otkriće X-zračenja koje prodire kroz ljudsko tijelo i ostavlja trag na filmu. Osnove medicinske dijagnostike zračenjem.                                                                           |
| 4.       | 1897. | Joseph Larmor (1857. – 1942.)                                             | Otkriće o gibanju elektrona u atomima koji u magnetskom polju dobivaju jednoliku rotaciju. (Larmorova precesija)                                                                                  |
| 5.       | 1924. | Wolfgang Pauli (1900. – 1958.)                                            | Temelji za otkriće nuklearne magnetske rezonancije (NMR) na teoriji spina i valnoj jednadžbi magnetskog momenta.                                                                                  |
| 6.       | 1939. | Isidor I. Rabi (1898. – 1988.)                                            | Proučavanje sile povezivanja u atomskoj jezgri, što je dovelo do primjene u medicinskoj dijagnostici (Nobelova nagrada za fiziku).                                                                |
| 7.       | 1941. | Yevgeny K. Zavoisky (1907. – 1976.)                                       | Otkriće nuklearne magnetske rezonancije s rezultatima prihvaćeni kao da ih nije moguće ponoviti (doktorski rad).                                                                                  |
| 8.       | 1946. | Felix Bloch (1905. – 1983.)                                               | Otkriće svojstava atomske jezgre. Proton vrtnjom oko vlastite osi stvara magnetsko polje i moment (Blohove jednadžbe).                                                                            |
| 9.       | 1949. | Edward M. Purcell (1912. – 1997.)                                         | Razvoj metode za mjerenje rezonantne apsorpcije magnetizma jezgre (Purcellova metoda).                                                                                                            |
| 10.      | 1952. | F. Bloch (1905. – 1983.)<br>E. M. Purcell (1912. – 1997.)                 | Postavljeni eksperimentalni temelji NMR spektroskopiji (Nobelova nagrada za taj rad).                                                                                                             |
| 11.      | 1960. | Raymond Damadian (1936.)                                                  | Otkriće da maligno tkivo ima različite NMR parametre od zdravog tkiva, što omogućava izradu karakterizacije tkiva.                                                                                |
| 12.      | 1964. | Allan M. Cormack (1924. – 1998.)                                          | Objava rada o teoriji kompjuterizirane tomografije i ideja da se rendgenske zrake mogu upotrijebiti i usmjeriti pod različitim kutovima na tijelo ili mozak (Nobelova nagrada za medicinu 1979.). |
| 13.      | 1969. | Raymond Damadian (1936.)                                                  | Predložen MR skener tijela i spektrometrija za analizu NMR spektra molekularne konfiguracije materijala. Proizveden prvi CT uređaj.                                                               |
| 14.      | 1973. | Allan M. Cormack (1924. – 1998.) i Godfrey N. Hounsfield, (1919. – 2004.) | Uporaba kompjutorske tomografije u dijagnostičke svrhe, ali samo za prikaz struktura mozga (snimljena prva NMR slika tumora kod štakora).                                                         |
| 15.      | 1977. | Raymond Damadian i njegov tim                                             | Konstruirani su prvi superprovodni NMR skeneri i snimljena prva slika ljudskog tijela (skeniranje trajalo 5 h).                                                                                   |
| 16.      | 1977. | Paul C. Lauterbur (1929. – 2007.) i Peter Mansfield, (1933. – 2017.)      | Razvoj opreme za NMR koja se može koristiti za izradu slika (Nobelova nagrada iz medicine za NMR 2003.).                                                                                          |
| 17.      | 1979. | Allan M. Cormack (1924. – 1998.) i Godfrey N. Hounsfield (1919. – 2004.)  | Prvo tomografsko snimanje s rekonstruiranom slikom s pomoću računala. Temelji za proizvodnju tipiziranih MRI 600 – 800 MHz spektrometara, magneti 14,1 – 18,8 T (Nobelova nagrada za medicinu).   |
| 18.      | 1991. | Richard R. Ernst (1933.)                                                  | Razvoj NMR spektroskopije primjenom Fourierove transformacije (Nobelova nagrada za kemiju).                                                                                                       |
| 19.      | 2002. | Kurt Wüthrich (1938.)                                                     | Razvoj NMR metoda za proučavanje bioloških makromolekula (Nobelova nagrada za kemiju).                                                                                                            |

i kljialište ideja znanstvenika kao što su Debye, Scherrer, Weyl, Schrödinger, Pauli, Kramers, Heisenberg, Bohr, Fermi i drugi. Njih, njihove radove i njihov utjecaj potrebno je spomenuti kao potvrdu doprinosa znanosti tog doba koji danas baštinimo, tablica 1.

## Dijagnostički rendgenski uređaji (RTG)

Početak i osnova svih budućih radioloških snimanja je elektromagnetsko zračenje, tzv. X-zrakama (kasnije nazvane rendgenske zrake). Rendgenske zrake oblik su ionizirajućeg elektromagnetskog zračenja valne duljine između 0,001 i 10 nm, čime odgovaraju području između ultraljubičastog i gama-zračenja. Valovi rendgenskih zraka vrlo su kratki ( $10^{-6}$  do  $10^{-9}$  cm), a frekvencija im je visoka ( $10^{17}$  do  $10^{18}$  Hz), [24]. Zbog tih svojstava imaju veliku energiju koja im omogućuje prodiranje kroz tkiva. Za razliku od valova većih valnih duljina, dakle manjih energija, rendgenske zrake u tkivu izazivaju različite promjene od kojih je najvažnija ionizacija neutralnih atoma.

Rendgenske zrake nastaju u vakuumiranoj rendgenskoj cijevi naglim kočenjem brzih elektrona pri njihovom sudaru s nekom zaprekom. Brzi elektroni nose veliku količinu kinetičke energije koja se pri sudaru prenosi na atome od kojih je izgrađena zapreka i izbija elektrone iz njihova omotača. Tako nastaju prazne elektronske ljuske koje se popunjavaju iz vanjskih, energijski bogatijih ljusaka. Prelaskom u ljuske niže energijske razine, ti elektroni predaju višak energije okolini. Najveći dio tako oslobođene energije emitira se u obliku toplinskih zraka, a samo mali dio u obliku elektromagnetskih valova koji po svojoj valnoj duljini i frekvenciji odgovaraju rendgenskim zrakama. Dijagnostički rendgenski uređaji prema namjeni mogu biti:

- radiografski
- dijaskopski
- univerzalni (višenamjenski)
- specijalni rendgenski uređaji (tomografski, mamografski, dentalni itd.).

Zajednička je svim dijagnostičkim rendgenskim uređajima primjena rendgenskih zraka za prikaz željenih anatomskih struktura. U dijagnostičkom snopu rendgenske se zrake šire pravocrtno i pri prolasku kroz različite dijelove tijela one se jednim dijelom apsorbiraju, a drugim dijelom prolaze potpuno nepromijenjene. Na stvaranje rendgenske slike utječu apsorbirane i raspršene zrake. Slabljenje (apsorpcija) rendgenskih zraka u ljudskom tijelu dijelom ovisi o nekoliko čimbenika:

- atomskom broju elemenata od kojih su tkiva građena
- valnoj duljini rendgenskih zraka
- debljini i obliku snimanog dijela tijela i
- gustoći tkiva.



Sl. 7.: RTG uređaj, snimanje i posteroanteriorna (PA) snimka abdomena u frontalnoj projekciji (izvor: radiopaedia.org)

Različita su tkiva u ljudskom organizmu građena od elemenata različitog, ali u pravilu niskog atomskog broja, što je razlog njihove slabe apsorpcije u tkivima. Rendgenske zrake veće valne duljine imaju veću apsorpciju prolaskom kroz objekt jednake gustoće u odnosu na zrake kraćih valnih duljina. Deblji sloj snimanog tkiva jače apsorbira rendgenske zrake nego tanji sloj, ali i tkiva jednake debljine imaju različit koeficijent apsorpcije. Oblik snimanog objekta utječe na kvalitetu slike ne samo zbog geometrijskih parametara nego i zbog njegova utjecaja na specifičnu kontrastnost objekta. Gustoća tkiva (količina tkiva u  $\text{g/cm}^3$ ) zbog različite apsorpcije utječe na gustoću rendgenskih sjena. Najmanju gustoću rendgenskih sjena imaju organi koji sadržavaju veću količinu plina (pluća, želučani forniks, plinovi u tankom i debelom crijevu). S druge strane, koštano tkivo najjače apsorbira rendgenske zrake zbog veće gustoće u odnosu na druga tkiva, kao i zbog specifično većeg koeficijenta apsorpcije zbog visokog sadržaja kalcija i fosfora [25].

Važno je naglasiti kako su snimke napravljene rendgenskim uređajima dvodimenzionalne. Projekcija rendgenske snimke ovisi, dakle, o smjeru rendgenske zrake u odnosu na snimani objekt. Za razliku od radiografskih uređaja kod kojih prilikom eksponiranja nastaje samo jedna dvodimenzionalna snimka, dijaskopski uređaji imaju mogućnost korištenja kontinuiranog snimanja, gdje uz upotrebu elektroničkog pojačala nastaje dijaskopska slika na ekranu. Tako je moguće praćenje fizioloških pokreta organa (srca, gutanja, peristaltike želuca i crijeva itd.). Ipak, valja naglasiti da je nedostatak ove metode slabija mogućnost uočavanja detalja zbog različitih neoštrina, a sve uz višestruko povećanje doze zračenja za bolesnika i osoblje, slika 7.

## Kompjuterizirana tomografija (CT)

Kompjuterizirana tomografija (engl. *computed tomography*, CT), u svijetu se još koristi i naziv kompjutorizirana aksijalna tomografija (engl. *computed*

*axial tomography*, CAT) dijagnostička je metoda koja omogućuje prikaz anatomske detalja organa u unutrašnjosti ljudskog tijela koristeći se poprečnim presjecima. Danas se u praksi koriste CT uređaji sa spiralnim načinom snimanja (za vrijeme rotacije cijevi i detektora putuje i stol s pacijentom) i višerednim nizom detektora na CT uređaju koji se naziva MDCT (engl. *multidetector computed tomography*) i/ili MSCT uređaj (engl. *multislice computed tomography*). Konvencionalna kompjuterizirana tomografija temelji se na načelu prolaska rendgenske zrake kroz tijelo u poprečnom presjeku uz rotaciju rendgenske cijevi oko pacijenta. Elektronički detektori koji su smješteni nasuprot rendgenskoj cijevi s druge strane pacijentova tijela koncentriraju izlazeće rendgenske zrake u električne impulse. Jakost impulsa ovisi o količini neapsorbiranih rendgenskih zraka koje su prošle kroz pacijenta. Rendgenske se zrake prolaskom kroz određeni dio tijela apsorbiraju i prigušuju te nastaje atenuacija koja se izražava brojem atenuacije ili CT brojem. Ova elektronička informacija prenosi se u računalu koje izračunava apsorpciju rendgenskih zraka za svaki volumni element i prikazuje ga kao transverzalni presjek na ekranu. Apsorpcijske vrijednosti relativne gustoće struktura na kompjuteriziranoj tomografiji izražavaju se u Hounsfieldovim jedinicama (engl. *Hounsfield unit*, HU). Apsorpcijske vrijednosti prikazuju se u sivim nijansama od bijele do crne boje na ekranu u rasponu Hounsfieldovih apsorpcijskih vrijednosti od  $-1000$  HU do  $+3074$  HU. Apsorpcijska vrijednost vode je  $0$  HU, zraka  $-150$ , masnog tkiva od  $-10$  do  $-150$  HU, kostiju i kalcija  $+150$  do  $+700$  HU, a metalnih stranih tijela  $+1000$  HU jedinica. Temeljna karakteristika CT uređaja u odnosu na dijagnostičke rendgenske uređaje leži u mogućnosti trodimenzionalnog prikaza snimanog objekta. Rezultat prolaska rendgenske zrake u poprečnom presjeku uz rotaciju cijevi u odnosu na snimani objekt naknadnom se rekonstrukcijom računalno obrađuje. Slike dobivene takvom rekonstrukcijom moguće je detaljnije analizirati u svim anatomskim ravninama. Zahvaljujući upotrebi računala i sofisticiranih softvera, niz je mogućnosti dostupan prilikom pregleda i analize slika, a kao osnovne mogućnosti moguće je navesti promjenu svjetline i kontrastnosti prozora, uvećanje objekta, kao i niz mjerenja i izračunavanja različitih parametara koji mogu uvelike olakšati i poboljšati točnost prilikom analiziranja, slika 8.



Sl. 8.: CT uređaj, prikaz abdomena i bubrega u frontalnoj ravnini (izvor: radiopaedia.org)

Razvoj uređaja za kompjuteriziranu odnosno računalnu radiografiju počeo je prije pola stoljeća s jednim detektorom, da bi se danas koristili uređaji MSCT i MDCT s više redova detektora za generiranje više slojeva po jednoj rotaciji. Kao spiralni i višeslojni način snimanja omogućuje preglede većih dijelova tijela u kraćem vremenu, što direktno utječe na dozu zračenja za pacijenta. Prostorna rezolucija današnjih MSCT uređaja iznosi od 15,5 do 30 lp/mm (engl. *line pair*), te što je veća vrijednost lp/mm, to je moguće prostorno razlučiti više detalja na dobivenoj slici. Debljina aksijalnog sloja može se mijenjati od 0,5 mm do 10 mm, i to nakon samog snimanja iz tzv. “sirovih podataka” (engl. *raw data*). Poželjno je generirati navedene slojeve debljine do 1 mm zbog toga što je kvalitetna osnova za 3D prikaz dobivenih podataka. Razvoj CT uređaja prikazuje tablica 2.

Tablica 2. Pregled razvoja CT uređaja s mogućnostima

| Red. br. | Godina i tip uređaja                 | Vrijeme skeniranja, s | Broj detektora          | Mogućnost snimanja i obrade                                                                                                                                                                    |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | <b>1972. Uređaji I. generacije</b>   | 3 – 5 min             | 1                       | samo mozak                                                                                                                                                                                     |
| 2        | <b>1975. Uređaji II. generacije</b>  | 10 – 60               | do 16                   | glava i tijelo                                                                                                                                                                                 |
| 3        | <b>1977. Uređaji III. generacije</b> | 1,4 – 14              | 380 do 600              | svi organi i oni koji imaju različite fiziološke pokrete (crijeva, ošit, pluća, jednjak)                                                                                                       |
| 4        | <b>1977. Uređaji IV. generacije</b>  | 1 – 3                 | 1200 do 2000            | prсни organi (osobito plućni intersticij, denzitometrija, prikaz struktura piramide temporalne kosti)                                                                                          |
| 5        | <b>Spiralni CT uređaji</b>           | 1 – 2                 | 2500 i >                | organi s fiziološkim pokretima, brzi kontrastni prikaz krvnih žila, virtualne endoskopske pretrage, kvalitetni prikazi plućnog intersticija, uz slike visoke prostorne i kontrastne rezolucije |
| 6        | <b>Višeslojni MSCT uređaji</b>       | 0,5 s                 | do 320 redova detektora | obrade velikog volumena pregledanog dijela tijela, CT koronarografija, obrada cijelog volumena plućnog parenhima u jednom inspiriju                                                            |

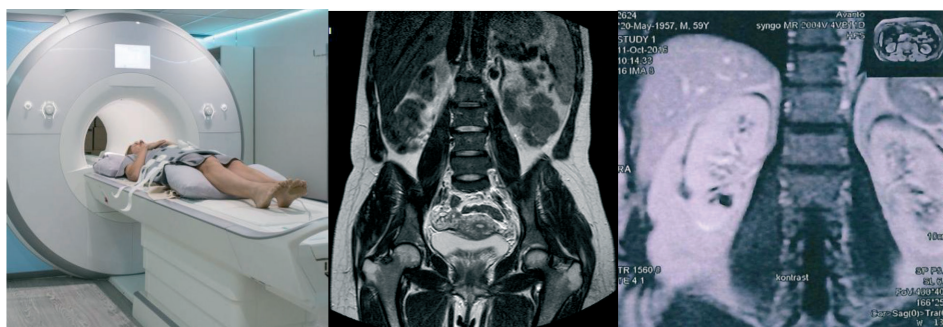
## Magnetska rezonancija (MR)

Magnetska rezonancija (engl. *magnetic resonance*) digitalna je tehnika slikovnog prikaza koja funkcionira na načelu nuklearne magnetske rezonancije (engl. *nuclear magnetic resonance*), (NMR). Za stvaranje slike potrebno je jako, homogeno i stabilno magnetsko polje koje stvara glavni magnet. Glavni magnet

uređaja za MR magnetizira u organizmu male biološke “magnete” – protone u jezgri atoma vodika. Magnetizirano tijelo pritom je izloženo djelovanju radiovalova čija je frekvencija sukladna jakosti magnetskog polja, što prouzročuje rezonanciju atoma u ljudskom tijelu. Po isključivanju radiofrekvencijskih impulsa, atomi nastavljaju s titranjem, a tijelo ispitanika emitira višak energije koje je primilo djelovanjem radiovalova u obliku signala. Signal se zatim procesuirao kroz računalno uređaja za MR i koncentrira u slikovni prikaz snimanog objekta.

Oslikavanje MR-om temelji se na pobudi jezgara atoma vodika u tkivima elektromagnetskim valovima. Zbog široke rasprostranjenosti u ljudskom tijelu i prisutnog jednog protona u jezgri sa snažnim magnetskim momentom, atomi vodika su izvor signala u dijagnostičkoj primjeni. Proton u jezgri atoma vodika rotira se oko vlastite osi i ima vlastito magnetsko polje čija se osovina opisuje magnetskim momentom. Magnetski momenti protona prikazuju se vektorima koji su orijentirani paralelno ili antiparalelno sa smjerom polja, tako da je malen suvišak protona usmjeren paralelno. Taj suvišak protona proizvodi neto magnetski moment, odnosno longitudinalni magnetizacijski vektor (engl. *longitudinal magnetization vector*, LMV). On se rotira oko smjera osnovnog magnetskog polja određenom frekvencijom. Elektromagnetskim valom, odnosno radiofrekventnim (engl. *radio frequency*, RF) impulsom frekvencije jednake frekvenciji precesije protona dolazi do ekscitacije tkiva, tj. do rezonancije protona, čime oni prelaze u stanje više energije i LMV mijenja smjer. RF impuls dovoljnog trajanja i amplitude prouzročuje pomak LMV-a tako da postaje okomit na osnovno magnetsko polje, a takav se impuls naziva  $90^\circ$  RF impuls. Time nastaje mjerljiva transverzalna magnetizacija koja je izvor vidljivog signala MRI (engl. *magnetic resonance imaging*), slika 9.

Nastankom transverznog magnetnog vektora (TMV) protoni vodika su fazno koherentni, odnosno magnetski momenti protona u tom su trenutku na istom mjestu precesijske staze. Kontrast na snimci posljedica je različite brzine



Sl. 9.: MR pregled i prikaz abdominalne regije i bubrega u frontalnom presjeku (izvor: radiopaedia.org, bodygears.com)

oporavka longitudinalne magnetizacije i nestanka transverzalne magnetizacije pojedinih tkiva što se naziva T1 i T2 relaksacijskim vremenom.

Prema magnetskoj indukciji polja koje razvijaju, uređaji za MR razvrstavaju se na uređaje male snage (magnetska indukcija od 0,1 T do 0,3 T), uređaje srednje snage (od 0,5 T do 1 T) i uređaje velike snage (1 T, 4 T i više tesla). U dijagnostičke svrhe koriste se uređaji s magnetskom indukcijom od 0,2 T do 3 T, dok se uređaji s magnetskom indukcijom većom od 4 T koriste uglavnom u istraživačkim institucijama i bolnicama za spektroskopska i visokorezolucijska ispitivanja.

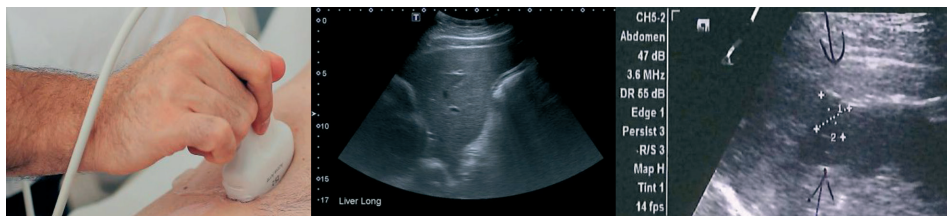
U praksi medicinske dijagnostike za MR u uporabi je opravdano termin ‘magnet’ koji kao osnova svakog MR sustava može biti stalni magnet, elektromagnet ili supravodljivi hibridni magnet. Supravodljivost je pojava iščezavanja električnog otpora na niskim temperaturama. Hlađenjem ispod neke kritične temperature drastično se smanjuje potreba za energijom koja održava magnetsko polje. Budući da otpor zavojnica elektromagneta ovisi o temperaturi, zavojnice se hlade kriogenim tvarima kao što je, npr., tekući helij. Supravodljivi hibridni magneti proizvode snažna magnetska polja koja danas dosežu vrijednosti i do 45 T. Pregled razvoja magneta prikazuje tablica 3.

Tablica 3.: Kronološki pregled razvoja snage magneta za spektrometre

| Red. broj | Godina | Uređaj / Magnet                                 | Frekvencija     |
|-----------|--------|-------------------------------------------------|-----------------|
| 1.        | 1953.  | prvi dijagnostički NMR uređaj, Varian           | 30 MHz          |
| 2.        | 1960.  | spektrometar, magnet od 2,35 T                  | 100 MHz         |
| 3.        | 1970.  | spektrometar, magnet od 9,4 T                   | 400 MHz         |
| 4.        | 1980.  | tipizacija spektrometara, magneti 14,1 – 18,8 T | 600 – 800 MHz   |
| 5.        | 1992.  | komercijalni spektrometri, magnet 17,61 T       | 750 MHz         |
| 6.        | 1995.  | komercijalni spektrometri, magnet 21,1 T        | 900 MHz         |
| 7.        | 1999.  | komercijalni spektrometri, magnet 21,4 T        | 900 MHz         |
| 8.        | 2005.  | magnet 22,3 T                                   | 950 MHz         |
| 9.        | 2009.  | magnet 23,5 T                                   | 1000 MHz        |
| 10.       | 2016.  | magnet 24 T                                     | 1020 MHz        |
| 11.       | 2019.  | magnet 25,9 T                                   | 1100 MHz        |
| 12.       | 2020.  | hibridni magneti 36,1 – 45 T                    | 1500 i više MHz |

## Ultrazvučna dijagnostika (UZV)

Ultrazvuk u medicinsko-radiološkom smislu predstavlja neinvazivnu dijagnostičku metodu za pregled i vizualizaciju unutrašnjosti tijela koristeći visokofrekventne valove zvuka. Ultrazvuk se stvara korištenjem piezoelektričnog



Sl. 10.: Ultrazvučni pregled i prikaz gornjeg abdomena i bubrega (izvor: radiopaedia.org)

učinka prirodnih kristala ili kristala od sintetičke keramike i specijalnih plastika. Najčešće su korišteni materijali kremen (kvarc), turmalin te olovni niobat, olovni cirkonat, barijev titanat i poliviniliden difluorid. Ako je vanjsko električno polje izmjenično, kristal će titrati frekvencijom polja, a ako je ta frekvencija dovoljno visoka, vibracije će biti izvor ultrazvuka. Obratno, ako ultrazvučni val pobudi kristal na titranje, generirat će se promjenjivo električno polje iste frekvencije. Pritom isti piezoelektrični kristal služi i kao izvor i kao receptor ultrazvuka. Ta je pojava najizraženija ako je frekvencija titranja kristala jednaka njegovoj vlastitoj frekvenciji kad kristal rezonira. To se događa kad je valna duljina jednaka polovini njegove debljine.

Kao što je slučaj i kod magnetske rezonancije, a za razliku od dijagnostičkih rendgenskih uređaja i uređaja za kompjuteriziranu tomografiju, ultrazvučni uređaji ne koriste elektromagnetsko zračenje koje može imati štetne učinke na organizam, posebno prilikom duljeg i neopreznijeg izlaganja. Karakterističnost slika snimljenih ultrazvučnim uređajima temelji se na dvodimenzionalnom prikazu tijekom pregleda, tako da je tijekom pregleda dostupna slika “uživo”, s mogućnošću praćenja fizioloških pokreta organa i njihovih stanja. Suvremeni uređaji imaju i mogućnost trodimenzionalne rekonstrukcije, ali primjena ultrazvučne dijagnostike uglavnom je ograničena i nije od velike dijagnostičke vrijednosti, slika 10.

### 3.4. Ekspertnost i inteligentne tehnologije u medicinskoj dijagnostici

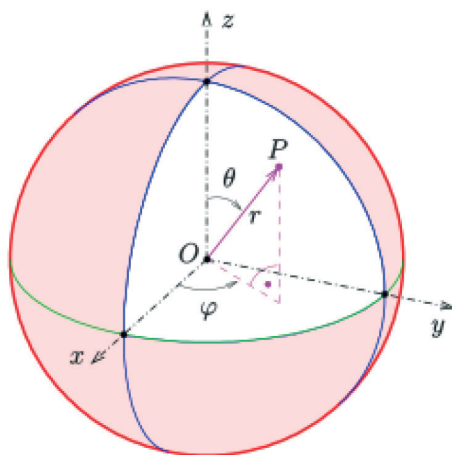
Zdravstvene obrade pacijenata od postavljanja dijagnoze do obrade inteligentnim i ekspertnim sustavima pokazuju savršenu pomoć moderne medicinske dijagnostike, ali i nužnost inženjerskih znanja u proizvodnji i održavanju uređaja i obradi potrebnoj za edukaciju. Na primjeru MR-a, najvažniji je zahtjev za uređaj za učinkovito snimanje magnetskom rezonancijom osiguranje visokog i kvalitetnog magnetskog polja. Relativna vrijednost polja, izražena u bezdimenzionalnim veličinama ppm-a (engl. *parts per million*, milijuntinka  $1/1\,000\,000 = 10^{-6}$ ) treba imati:

- vremensku stabilnost u rasponu od najmanje 0,1 ppm-a i
- homogenost ili uniformnost prostora unutar nekoliko ppm-a.

Prostor u kojem se primjenjuje magnetsko polje matematički se opisuje u sfernom koordinatnom sustavu promjera 50 cm. Određen je ishodištem  $O$  i međusobno okomitim polupravcima  $p$  i  $z$ . Svaku točku takvog prostora opisuju koordinate  $(r, \varphi, \theta)$ . Udaljenost npr. točke  $P$  od ishodišta  $O$  koordinata je  $r$ ; koordinata  $\varphi$  je kut od projekcije vektora  $OP$  na ravninu okomitu na poluos  $z$ , a koordinata  $\theta$  je kut koji vektor  $OP$  zatvara s poluosu  $z$ , slika 11. Sve su točke prostora jednoznačno određene, ako su vrijednosti sfernih koordinata ograničene:  $0 < \rho < \infty$ ,  $-\pi < \varphi < \pi$ ,  $0 < \theta < \pi$ .

Vremenska stabilnost postiže se trajnim hibridnim supravodljivim magnetom pod uvjetom da se u blizini magneta ne nalaze nikakvi feromagnetski materijali. Homogenost se postiže ugađanjem s pomoću zahtjevnog sustava za korekciju koji u osnovi podsjeća na implementaciju feromagnetskih komadića na stupove magneta. Ugađanje je proces koji nadzire računalo sa sofisticiranim softverom koji omogućuje visok stupanj prilagodljivosti različitim situacijama, a koji je osnova i provedbe matematičke analize u četiri koraka:

- proračunavanje polja u točkama trodimenzionalne mreže sfernog prostora
- dekompozicija polja za računalnu 3D-transformaciju i prostornu varijaciju s pomoću skupa koeficijenata
- izračunavanje korekcijskih parametara uz odgovarajuću primjenu feromagnetskih dijelova za ugađanje homogenosti i
- provjera rezultata nakon aktiviranja magneta i ugradnje izračunatih feromagnetskih dijelova.



Sl. 11.: Sferni koordinatni sustav kao prostor primijenjenog magnetskog polja za dijagnostiku

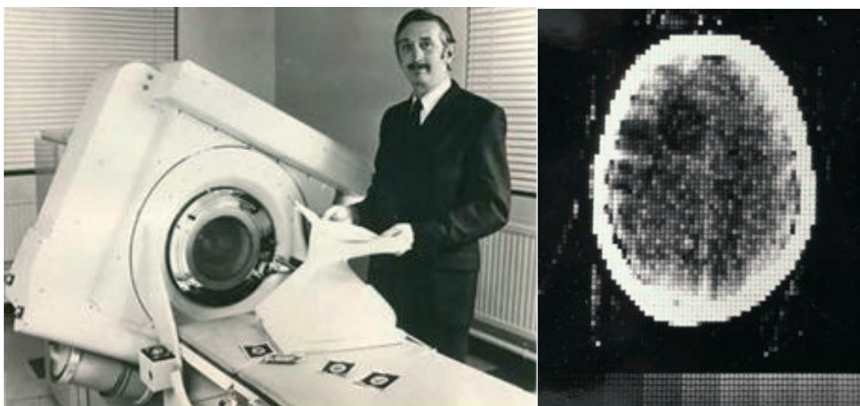
Matematički postupak i ovdje kao i u prethodnom odsječku počinje s istim Maxwellovim jednažbama i rješenjem iz Laplaceovih jednažbi (cijeli je postupak opisao prof. Guy Aubert, voditelj Laboratorija za visoka magnetska polja u Grenobleu), [26].

Nažalost, još uvijek nisu adekvatno valorizirane raspoložive baze podataka koje se mogu koristiti u kreacijama baza znanja. Ekspertnost inteligentnih tehnologija kao i znanja liječnika, medicinskih stručnjaka koji se njima služe, u novije vrijeme pokazuju da je njihova uspješna primjena ovisna i o nizu drugih čimbenika. U suradnji s inteligentnim tehnologijama čovjek profitira spoznajnom razinom integriranog razvoja svojeg uma doprinosom umjetne inteligencije.

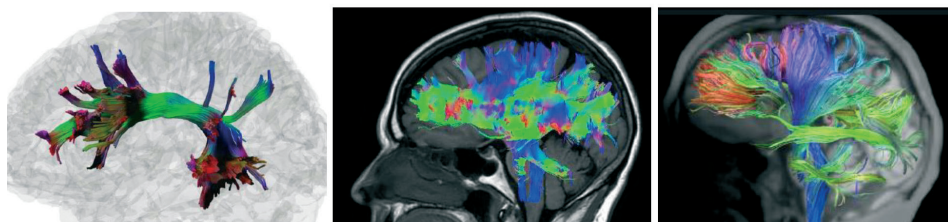
Nakon snimanja, dobiveni slikovni materijal obrađuje se posebnim računalnim programima koji omogućuju prikaz u različitim ravninama i projekcijama. Višeslojna kompjutorizirana tomografija ili samo kompjutorizirana tomografija spada u moderne dijagnostičke metode slojevnog snimanja tijela pri čemu se zračenje detektira na većem broju detektora nakon što se određena količina zračenja apsorbirala u tijelu. Kompjutorizirana tomografija je pretraga kod koje se koriste rendgenske zrake. Zračenje rendgenskim zrakama je štetno, doze zračenja kod CT pregleda su visoke. Kao posljedica zračenja moguće je oštećenje krvotvornog tkiva, a zračenje prouzročuje veću vjerojatnost nastanka nekih zloćudnih bolesti. Uz dijagnostičko snimanje koristi se i snimanje dvostrukom energijom zračenja (engl. *dual energy*) uz uporabu najsuvremenijih računalnih algoritama, koje omogućuje automatizirane i učinkovite intervencije na krvnim žilama i svim tkivima u ljudskom tijelu.

Navedene radiološke metode i modaliteti korišteni u medicinskoj radiologiji imaju svoju svrhovitost koja ponajviše ovisi o indikacijama prema kojima se određuje korisnost svake pojedine pretrage, u cilju bolje i točnije analize snimaka. Iako pojedini uređaji / pretrage koriste ionizirajuće zračenje koje može imati štetan učinak na organizam, nužno je razmotriti sve ostale parametre korisnosti, zbog čega neće nužno biti isključene kao metoda izbora. Korelacija štetnosti za ljudski organizam, trajanja pretrage, stanja pacijenta, specifičnosti svakog pojedinog uređaja, računalnih mogućnosti i osjetljivosti radiološke aparature prema indikacijama i dijagnozi, ali i niz drugih čimbenika, određuju koja će od navedenih metoda biti optimalan izbor prema uputnoj dijagnozi. Tu do izražaja dolazi ekspertnost osoblja i inteligentnost tehnologija.

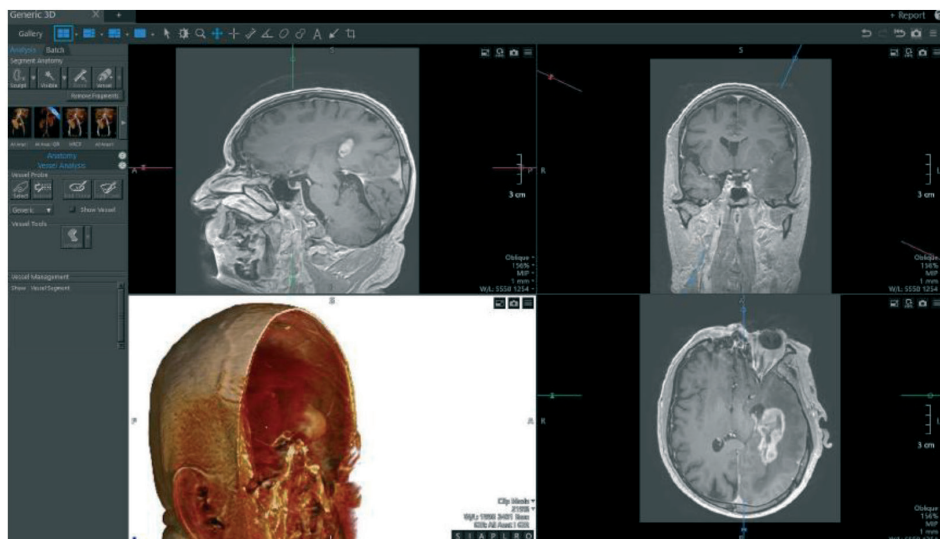
Prvi CT uređaj konstruiran 1969. godine i njegov klinički sken glave iz 1971. prikazuje slika 12. Danas raspoloživo difuzijsko tenzorsko snimanje (DTI) i 3D rekonstrukcijska tehnika za procjenu stanja s pomoću podataka prema literaturi [5 i 24-30], predstavljaju slike 13. – 15.



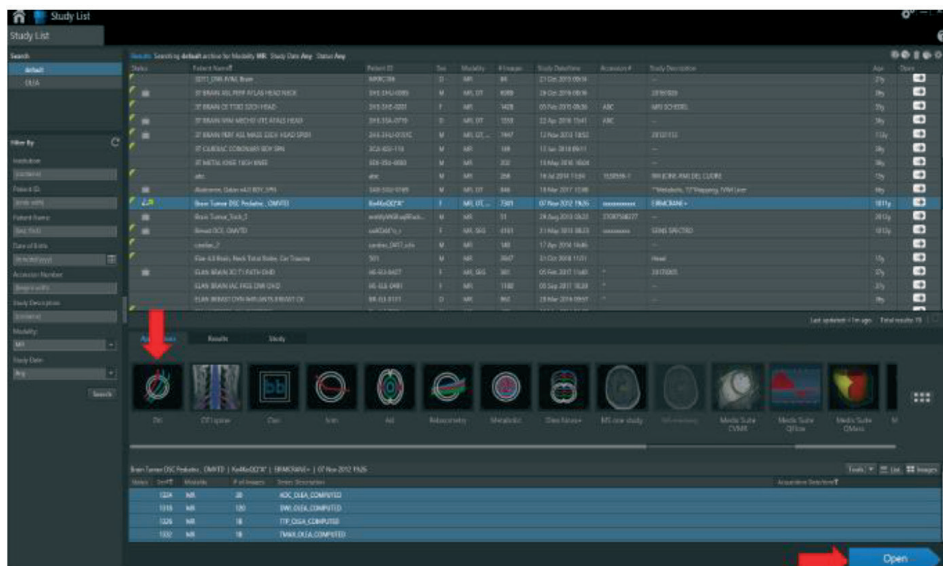
Sl.12.: Izumitelj Sir Godfrey N. Hounsfield uz prvi CT uređaj konstruiran 1969. godine i prvi klinički CT sken glave iz 1971. s matricom veličine 80 ´ 80



Sl. 13.: Difuzijsko tenzorsko snimanje (DTI) i 3D rekonstrukcijska tehnika za procjenu stanja s pomoću podataka



Sl. 14.: Alternativna tehnika: 3D fotorealistični prikaz ljudske anatomije



Sl. 15.: Poslužni izbornik za difuzijsko tenzorsko snimanje

Zadnji raspoloživi uređaji za medicinsku dijagnostiku i kirurgiju poveznica su za proširenu stvarnost. U medicinskoj primjeni intraoperativno navođenje slikama kao pomoć u lokalizaciji lezija koje nisu vidljive golim okom potpuno je zaživjelo. Snimke u 2D tehnici, obrađene za 3D, dobivene uz pomoć CT-a ili MR-a kao preklapanja virtualnog i realnog, tehnika su medicinske “proširene stvarnosti” (engl. *augmented reality*, AR) koja se dobiva kao stvarni pogled na operacijsko polje. Početak seže još u 1938. godinu u Austriji, kad je uz pomoć RTG zraka i zrcala omogućena vizualizacija metka za vrijeme same operacije. Sutherland je 1968. osmislio prvi *head-up* sustav koji je prikazivao crteže izravno u kirurgovo vidno polje. Danas se sustav “proširene stvarnosti” sastoji od:

- virtualne slike
- registracije virtualnog okruženja u stvarnom prostoru i
- zajedničkog prikaza virtualne slike i prave stvarnosti.

Tehnika ide preko monitora, LED ekrana visoke rezolucije koji prikazuje virtualni sadržaj preko videosignala prave stvarnosti i uz pomoć AR optike izravno ubacuje snimku u operacijski mikroskop. Postavljeni poluprozirni zasloni ravno iznad operacijskog polja omogućuju izravan pogled na samo operacijsko polje uz projekciju virtualnih slika na sam zaslon. Mogućnosti i učinkovitost neopisive su i opet povezane s tehnikom i čovjekom.

## Zaključak

Prilikom obrade problematike zračenja preko elektromagnetskih polja u obzir je potrebno uzeti sve čimbenike kao teorijsku razradu i sve tehničke komponente koje su povezane sa zračenjem. Vrste zračenja i zaštite od zračenja neiscrpna su podloga polemika. Stručnjaci koji su izravno ili neizravno uključeni u rješavanje te problematike ili u vezi s njom uvijek akcent stavljaju na zaštitu i očuvanje zdravlja, ne samo kad je u pitanju profesionalna izloženost zračenju nego i sva moguća zračenja u sveopćoj populaciji. Unatoč prepoznatom baznom smislu brige o zaštiti, niz je paradigmi koje otvaraju pitanja lobiranja i interesa. Postavlja se pitanje kad i zašto je potrebno utvrditi ili provesti postupak koji ima veze sa zračenjem?

Ako se rezultati nekih proračuna, npr. za EEO, usporede s primjerima modeliranja i rezultatima mjerenja, opravdano se nameće potreba akceptiranja i utvrđivanje stvarnog pogonskog stanja. Postoje baze podataka kao neupitne činjenice koje mogu biti osnova novoj legislativi oslonjenoj na ekspertnost i čvrstu osnovu za baze znanja. Stoga, ako postoje dokazi da je neupitno da nema posljedica od zračenja za neki objekt, onda nema ni potrebe ponovno mjeriti i utvrđivati stanje zračenja za isti takav novi objekt. Također, ako je na temelju provedenog zračenja utvrđena neupitna dijagnostička činjenica, onda nema potrebe ponovno provoditi dijagnostiku zračenjem!

## Popis kratica

|        |                                                                                 |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|
| AR     | proširena stvarnost (engl. <i>augmented reality</i> )                           |
| Ci     | kiri, SI jedinica radioaktivnosti za gram radija                                |
| CT     | kompjutorizirana tomografija                                                    |
| Bq     | bekerel, SI jedinica za radioaktivnost                                          |
| DSA    | engl. <i>digital subtraction angiography</i>                                    |
| DTI    | difuzijsko tenzorsko snimanje                                                   |
| EEO    | elektroenergetski objekti                                                       |
| EES    | elektroenergetski sustav                                                        |
| EMM    | elektromagnetski model                                                          |
| EMP    | elektromagnetska polja                                                          |
| EMZ    | elektromagnetsko zračenje                                                       |
| ETH    | Eidgenössische Technische Hochschule                                            |
| EU     | Europska unija                                                                  |
| EUSTAT | baza statističkih podataka Europske unije                                       |
| Gy     | grej, jedinica definirana kao 1 J apsorbiranog zračenja po kilogramu materijala |

|        |                                                                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HU     | Hounsfieldova jedinica za gustoću tkiva                                                                                     |
| ICNIRP | Međunarodna komisija za zaštitu od neionizirajućeg zračenja (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) |
| IZ     | ionizirajuće zračenje                                                                                                       |
| LMV    | longitudinalni magnetni vektor                                                                                              |
| LPE    | linearni prijenos energije                                                                                                  |
| MeV    | mega elektronvolt                                                                                                           |
| MR     | magnetska rezonancija                                                                                                       |
| MRI    | snimka magnetske rezonancije                                                                                                |
| MSCT   | višeslojna kompjutorizirana tomografija                                                                                     |
| NF     | niskofrekvencijski                                                                                                          |
| NMR    | nuklearna magnetska rezonancija                                                                                             |
| ODS    | operator distribucijskog sustava                                                                                            |
| Rem    | jedinica za dozu zračenja                                                                                                   |
| RBE    | dozni ekvivalent zračenja                                                                                                   |
| RTG    | dijagnostički rendgenski uređaj                                                                                             |
| R      | rendgen, jedinica izloženosti zračenju                                                                                      |
| Sv     | sivert, jedinica za dozu zračenja                                                                                           |
| SI     | sustav međunarodnih jedinica                                                                                                |
| T      | tesla, jedinica jakosti magnetskog polja                                                                                    |
| TMV    | transverzalni magnetni vektor                                                                                               |
| TS     | transformatorska stanica                                                                                                    |
| UZV    | ultrazvuk                                                                                                                   |
| VF     | visokofrekvencijski                                                                                                         |
| QF     | faktor kvalitete                                                                                                            |
| 5G     | peta generacija mreža mobilnih komunikacija                                                                                 |

## Literatura

- [1] Z. Balaž: *Elektromagnetski model za izračun raspodjele struje zemljospoja*, doktorska disertacija, mentor S. Vujević, FESB, Split, 2015.
- [2] Z. Balaž: Troškovi mjerenja niskofrekventnih elektromagnetskih polja u elektroenergetskim sustavima, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.
- [3] Pravilnik zaštite od neionizirajućeg zračenja
- [4] Zakon o zaštiti od elektromagnetskih polja
- [5] G. Aubert: *Field Mapping and Shimming MRI Magnets with the Metrolab Field-Aligner*, Grenoble High Magnetic Field Laboratory, METROLAB Instruments SA Geneva – Switzerland, February 2000.

- [6] Z. Balaž: *Proračuni elektromagnetskih polja na EEO HAC-a za izdavanje odobrenja za stacionarne izvore "NF" elektromagnetskih polja*, Razvojni projekt HAC Br. 700-013-002-2, Zagreb 2012.
- [7] ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, 74, 494-522, 1998.
- [8] ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Physics*, 99(6):818-836; 2010.
- [9] Council of EU: *Directive 2004/40/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*, April 2004.
- [10] Council of EU: *Council Recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)*, Bruxelles, 1999.
- [11] Council of EU: *Directive 2004/108/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility and repealing Directive 89/336/EEC*, April 2004.
- [12] Elaborat zaštite od električnih i magnetskih polja, Prelaganje i zaštita postojećih instalacija, autocesta A12, Dalekovod EMU, 2012.
- [13] Elaborati zaštite od električnih i magnetskih polja, Elektroenergetski objekti sjeverne i južne pristupne ceste i Tunel sv. Ilija, Dalekovod EMU, 2013.
- [14] Zaštite od magnetskih i električnih polja TS 110/20(10)kV Zagvoz, Dalekovod EMU, 2007.
- [15] TS 110/20(10)kV Ploče, Zaštite od električnih i magnetskih polja, Dalekovod EMU, 2012.
- [16] Rješenje Ministarstva zdravstva od oslobađanja obavljanja prvih i periodičkih mjerenja elektromagnetskih polja za podzemne elektroenergetske vodove do uključivo 35 kV, KLASA: UP/I-542-04/10-04/10, UR. BROJ: 534-08-1-2/3-10-10, Zagreb, 16. studeni 2010.
- [17] Rješenje Ministarstva zdravstva od oslobađanja obavljanja prvih i periodičkih mjerenja elektromagnetskih polja za transformatorske stanice snage ne veće od 1000 kVA, KLASA: UP/I-542-04/05-01/3, UR. BROJ: 534-07-01/4-05-02, Zagreb, 5. srpnja 2005.
- [18] Rješenje Ministarstva zdravlja za procjenu elektromagnetskih polja za tipske transformatorske stanice HAC-a na temelju prvih mjerenja, KLASA: UP/I-542-04/12-01/10, UR. BROJ: 534-08-1-5/3-12-02, Zagreb, 29. ožujka 2012.
- [19] Rješenje Ministarstva zdravlja za procjenu elektromagnetskih polja za tipske transformatorske stanice HAC-a na temelju prvih mjerenja, KLASA: UP/I-542-04/12-01/10, UR. BROJ: 534-09-1-1-2/3-12-4, Zagreb, 24. listopada 2012.
- [20] S. Vujević, R. Lucić, I. Jurić-Grgić, D. Lovrić, T. Modrić, Z. Balaž: *Izrada pravila i mjera sigurnosti za osiguranje mjesta rada na elektroenergetskim vodovima*, FESB Split, Studija, veljača 2013.
- [21] Opći tehnički uvjeti za izvođenje radova na cestama, Zagreb, 2001.
- [22] Z. Balaž: *Prijedlog mjerenja elektromagnetske kompatibilnosti na primjeru opreme hrvatskih autocesta*, elaborat – razvojni projekt br. 700-013-001, Zagreb, 2012.

- [23] Directive 2012/11/EU of the European Parliament and of the Council of 19 April 2012 amending *Directive 2004/40/EC on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)* (18th individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC).
- [24] N. Barnjak: *Instalacija i puštanje u rad uređaja magnetske rezonance*, Završni rad, mentor: Vladimir Tudić, Veleučilište u Karlovcu, 2019.
- [25] B. Štoos: *Primjena zračenja u medicini*, završni rad, mentor: dr. sc. Slaven Lulić, Veleučilište u Karlovcu, 2018.
- [26] G. Aubert: *Field Mapping and Shimming MRI Magnets with the Metrolab Field-Aligner* METROLAB Instruments Magnetic Field Camera MFC – 3045, User's Manual, Included.
- [27] A. Hebrang, R. Klarić-Čustović: *Radiologija*, Medicinska naklada, Zagreb, 2007.
- [28] M. Frković, K. Višković: *Radiološka oprema*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2013.
- [29] Z. Klanfar i suradnici: *Radiološke i nuklearno-medicinske dijagnostičke metode*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2013.
- [30] Z. Klanfar: *Teorija i praksa radiološke tehnologije*, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2013.

## Electromagnetic Radiation Paradigms in Technics and Medicine

*Zdenko Balaž, Dario Gluvačević, Niko Barnjak, Anton Jelić*

**Abstract:** Croatian legislation prescribes the levels of electromagnetic radiation in our environment. Examples from practice indicate the importance of recognizing the difference between electromagnetic radiation that is a consequence of the operation of electrical devices or plants that generate radiation and electromagnetic radiation for the intended use of diagnostic devices in medicine. Low frequency electromagnetic fields are the consequences of radiation sources of all elements of the power system, frequency 50 HZ and rated voltage greater than 1 kV, (transformer stations, power lines, switchgear,...). If each individual element of the radiation source is observed, then the formal insistence on meeting the legislative requirements neglects the fact and the property that this element is part of the whole power system. Electromagnetic fields analysed using an electromagnetic model, based on the application of the finite element technique, are experimentally verified by measurement and the results are compared with

the limit levels of reference quantities prescribed by legislation. The results of research conducted in two directions in the field of power engineering and medicine indicate the absurdity of some requirements related to the repetition of radiation measurements and repetition of radiation to determine diagnostic conditions. In the case of power facilities, the first measurements are carried out in order to confirm the results of the calculation from the protection study or study. Special paradigms are expressed for a number of typical objects and statistical processing of the obtained results that focus on the absurdity of legislation. In medicine on the examples of diagnostic devices (ultrasound, MSCT and MR, frequencies up to 1500 MHz and magnetic field sizes over 45 T), the analysed possibilities of intelligent measurement results processing systems indicate the absurdity of repeated radiation implementation requirements despite relevant results and possibilities.

**Keywords:** electromagnetic, ionizing, field, radiation, device, ultrasound, MSCT, NMR