

# O NEIONIZANTNOM ZRAČENJU NAVIGACIJSKOGA RADARA

## *On Non-ionising Radiation of Navigational Radar*

UDK 621.396.96:527.63

Pregledni članak

Review

### Sažetak

Rad započinje definicijom neionizantnog zračenja, kratkim opisom njegovih izvora i mogućih utjecaja na ljudski organizam. Slijedi opis električnih veličina kojima se koristi pri ocjeni utjecaja na organizam, te njihovih temeljnih i graničnih vrijednosti u kontroliranim i nekontroliranim područjima. Zatim se definira vremenska srednja gustoća snage radara. Temeljem usporedbe izračunatih vrijednosti s graničnim vrijednostima, u zaključku se procjenjuje mogući štetni utjecaj radarskoga zračenja.

*Ključne riječi:* neionizantno zračenje, biološki efekti, opasnosti od zračenja, radar, srednja gustoća snage

### Summary

The paper commences with a definition of non-ionising radiation, brief description of its sources and a possible impact onto the human body. This is followed by a description of electric notions considered in the influence assessment to organism, their basic and boundary values within controlled and uncontrolled environment.

Next, time average power density is dealt with. Eventually, the calculated values have been compared with boundary values. In the conclusion, possible harmful effects of radar radiation have been set out.

*Keywords:* non-ionising radiations, biological effects, radiation hazards, radar, average power density

## 1. Uvod

### Introduction

"Life on earth has developed with an ever present background of radiation. It is not something new, invented by the wit of man: radiation has always been there."

Eric J. Hall, profesor radiologije na Sveučilištu Kolumbija, New York, u svojoj knjizi **Radiation and Life**

Najveći dio svoje povijesti ljudski je rod proživio pod utjecajem prirodnih zračenja<sup>1</sup> prilagođujući im svoj genski kod. Većina prirodnih zračenja nalazi se u frekvencijskim područjima od istosmjernih polja do polja frekvencija od 5 kHz te na vrlo visokim frekvencijama višima od 10 THz. Zračenja niskih frekvencija nastaju pri grmljavini ili kolebanju Zemljine magnetosfere za vrijeme snažnih oluja na Suncu, a vidljiva su kao polarna svjetlost. Visokofrekvencijska prirodna zračenja, uglavnom, dolaze sa Sunca. Stanovništvo koje živi na tlu bogatom mineralima (granit) više je izloženo zračenju tla, a ono na višim nadmorskim visinama zračenju iz svemira.

Otkrićem i iskorištavanjem električne energije pojavljuju se ljudskom rukom stvorena zračenja u rasponu frekvencija od 50 Hz do 300 GHz, ali i u području prirodnih zračenja niskih i visokih frekvencija.

## 2. Ionizantno (IR) i neionizantno zračenje (NIR)

### *Ionising and Non-ionising Radiation*

Ovisno o količini energije, elektromagnetna (EM) zračenja dijele se na ionizantna (IR – *Ionising Radiation*) i neionizantna zračenja (NIR – *Non Ionising Radiation*).

**Ionizantna zračenja** valnih su duljina manjih od  $10^{-7}$  m i frekvencija viših od  $3 \cdot 10^{15}$  Hz<sup>2</sup> koja nose u sebi dovoljno energije<sup>3</sup> za razbijanje atomskih veza i pretvaranje atoma u ion. Tu spadaju x i  $\gamma$  zrake koje emitiraju molekule, atomi i atomske jezgre. Zračenja iz okoliša (svemir, tlo, radionuklidi u tijelu, namirnice i sl.) čine alfa, beta i kozmičke zrake, i dominantna su komponenta zračenja kojih je utjecaj na faktore rizika neusporedivo najveći. Tijekom godine otprilike 88 % IR-a čovječje tijelo primi iz prirodnih izvora zračenja, a preostalih 12 % iz umjetnih izvora, pretežito medicinskih dijagnostičkih i terapijskih aparata [10].

**Neionizantna zračenja** protežu se od istosmjernih polja do elektromagnetnih valova frekvencije  $3 \cdot 10^{15}$  Hz.

<sup>\*</sup> dr. sc. Josip Sušan, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka

<sup>\*\*</sup> mr. sc. Branka Milotić, Filozofski fakultet, Rijeka

<sup>1</sup> Zračenje ili radijacija označuje prijenos energije kroz prostor.

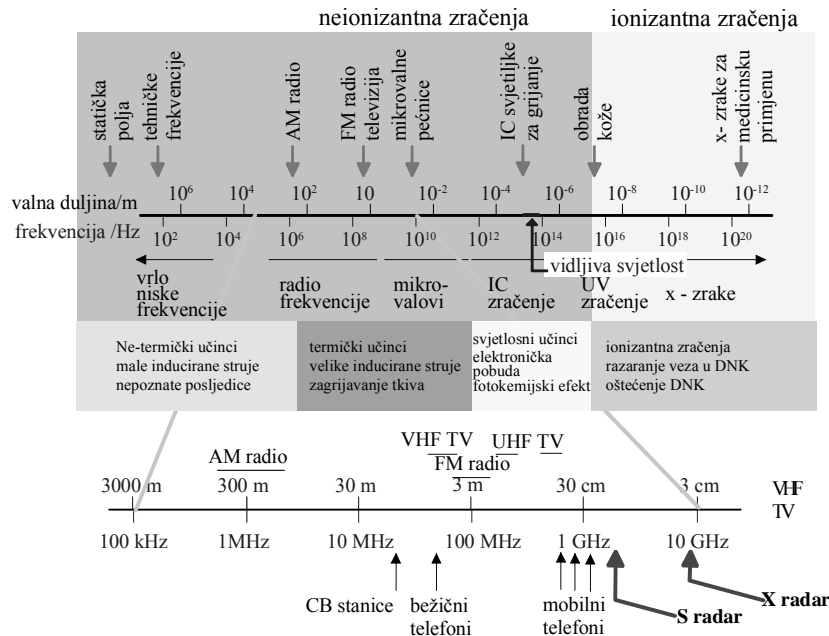
<sup>2</sup> U Zakonu o zaštiti od neionizantnih zračenja, koji je Hrvatski sabor donio 7. listopada 1997., gornja je granica neionizantnoga zračenja postavljena na  $3 \cdot 10^{15}$  Hz.

<sup>3</sup> Energija **jednoga fotona** na području radarskih frekvencija je  $10^{-4}$  do  $10^{-3}$  eV, dok je energija x-zraka (rendgenski aparati) od  $10^4$  do  $10^5$  eV.

Osim za usko frekvencijsko područje vidljive svjetlosti, ta se zračenja ne mogu registrirati ljudskim osjetilima.

NIR se dijeli u dva dijela: optički dio EM-valova s infracrvenim (IC), vidljivim i ultraljubičastim (UV) dijelom spektra te dio EM-valova koji započinje istosmjernim električnim i magnetnim poljima, nastavlja se EM-valovima vrlo niskih frekvencija (do 300 Hz) i radio-

frekvencijama (300 Hz do 300 MHz) i završava mikrovalovima (do 300 GHz). Zračenje navigacijskoga radara nalazi se na gornjem kraju NIR-a. Slika 1. prikazuje vrlo grubu podjelu frekvencija s naznakom granice NIR - IR, područjima uporabe i mogućim biološkim djelovanjima na tkivo. Usporedbe radi, valne duljine EM-zračenja na prijelazu NIR - IR odgovaraju veličini bakterije ili virusa.



**Slika 1. Elektromagnetni spektar zračenja i mogući biološki utjecaji**  
**Figure 1. Electromagnetic radiation spectrum and possible biological influences**

## 2.1. Izvori NIR-a [7]

### Sources of Non-ionising Radiation

Izvori u elektromagnetnom dijelu NIR-spektra jesu istosmjerna polja, energetska postrojenja niskog i visokog napona te svi elektronički sklopovi koji se u svojem radu koriste elektromagnetnim valom.

U korisna zračenja ovoga frekvencijskog područja ubrajaju se različiti medicinski aparati (mikrovalno zagrijavanje, terapijska i kirurška dijatermija, različiti aparati fizikalne medicine, nuklearna magnetska rezonancija i sl.) te industrijska uporaba kao što je obrada drva i priprema hrane.

Izvori iz optičkoga dijela NIR-a jesu Sunčeva svjetlost, IC-svjetiljke, lučno i plinsko zavarivanje i različite svjetiljke s izbojem. U korisne svrhe ubrajaju se UV-fototerapija, kirurški i terapijski laseri, IC-svjetiljke u fizikalnoj terapiji i slično.

## 2.2. Interakcija organizma i NIR-a

### Interaction of Organism and Non-ionising Radiation

Pokusima su dokazana tri različita mehanizma neposredne interakcije živoga organizma i NIR-a:

1. djelovanjem električnoga polja niskih frekvencija (pomicanje naboja i stvaranje struje, stvaranje, polarizacija i usmjeravanje dipola),
2. djelovanjem magnetnoga polja niskih frekvencija (indukcija struja),
3. apsorpcijom energije elektromagnetnoga zračenja (pojava pri radarskom zračenju).

Učinci električnoga i magnetnoga polja niskih frekvencija ovise o upadnom polju, njegovoj polarizaciji, ali i o električnim značajkama tkiva, tj. o ukupnoj energiji koju je organizam primio. Tako će električna vodljivost tkiva utjecati na električnu struju, a njegova permitivnost<sup>4</sup> na stvaranje, tj. orijentaciju dipola. Značajke tkiva ovise o vrsti tkiva i o frekvenciji i jakosti električnoga polja [2].

Tkiva izložena zračenjima EM-polja iznad 100 kHz apsorbiraju dio primljene energije i zagrijavaju se. Pri jednolikom (planarnom) polju apsorbirana se energija raspoređuje po tkivu vrlo nejednoliko, što se može potvrditi dozimetrijskim mjerenjima ili izračunavanjem na modelu.<sup>5</sup> Količina primljene energije ovisi o:

<sup>4</sup> Električna propusnost ili dielektričnost ( $\epsilon$ ) je mjera sposobnosti tvari da smanji elektrostatičke sile između dva nabijena tijela. Što je dielektričnost manja, smanjenje je elektrostatičke sile veće.

<sup>5</sup> Za izračunavanje količine primljene zračenja formiran je «model čovjeka» (Standard Reference Man, ICRP 1994) ili Fantom (Phantom - Radar - Available Phantoms, <http://www.doseinfo-radar.com/RADARphan.html>)

- parametrima upadnoga polja (frekvenciji, intenzitetu, polarizaciji) te udaljenosti izvora od tijela,
- značajkama ozračenoga tijela (veličini, vanjskoj i unutarnjoj geometriji<sup>6</sup> te dielektričnim svojstvima organa),
- kvaliteti uzemljenja tijela,
- reflektirajućim značajkama okolnih predmeta.<sup>7</sup>

Kada je duža os tijela u smjeru polarizacije vala (najčešće je to pri vertikalnoj polarizaciji vala), tijelo ulazi u neku vrstu rezonancije na frekvenciji od oko 70 MHz. Rezonancija bioloških objekata pojavljuje se na frekvenciji valne duljine otprilike 4/10 visine tijela. Zbog toga je rezonantna frekvencija viših osoba nešto niža, dok je rezonancija djece i osoba koje sjede viša od 100 MHz. Za uzemljena tijela rezonancijska je frekvencija otprilike dva puta niža, tj. ozračena se osoba čini dva puta višom.

Osim neposrednih postoje i dva posredna mehanizma međudjelovanja:

- kada tijelo dođe u neposredni dodir s naponom, pojavljuje se kontaktna struja,
- tok struje elektroničkih implantanata.

Navedeni se utjecaji mjere različitim jedinicama:

1. Utjecaji frekvencije do 10 MHz koje uzrokuju biološke promjene, mjere se gustoćom struje u  $A/m^2$ . Gustoća se struje računa s pomoću jednadžbe:

$$J = \sigma \cdot E \quad (A/m^2) \quad (1)$$

gdje je  $\sigma$  električna vodljivost tkiva u  $S/m$ , a  $E$  električno polje u  $V/m$ . Raspodjela inducirane gustoće struje obrnuto je razmjerna presjeku tkiva i može biti vrlo velika u vratu i zglobovima. Za područje profesionalne izloženosti zračenju<sup>8</sup> granica električnoga polja je 10 kV/m, a za nekontrolirano područje ona je dvaput manja, i jednaka je 5 kV/m.

Ako je organizam u promjenljivu magnetnome polju, uz pretpostavku da je električna vodljivost tkiva homogena i izotropna, gustoća struje računa se iz Faradayeve jednadžbe električne indukcije:

$$J = \pi \cdot R \cdot f \cdot \sigma \cdot B \quad (A/m^2) \quad (2)$$

gdje je  $B$  magnetna indukcija u teslama, a  $R$  polumjer kružnice koju čini čovječje tijelo. Nešto složeniji modeli (Reily, 1989., 1992.) čovječje tijelo modeliraju elipsom, što je bliže vanjskom izgledu trupa. Granica magnetnoga polja za područja povećane osjetljivosti<sup>9</sup> područja pet je puta niža od granice za kontrolirana (profesionalna) područja.

2. Za frekvencije od 10 do 110 MHz mjeri se struja u A.

3. Za frekvencije od 100 kHz do 10 GHz definira se prijenos energije iz elektromagnetnoga polja na nabijene

čestice ozračenoga tkiva kao specifična brzina apsorpcije ( $SAR - Specific\ Absorption\ Rate$ )<sup>10</sup> u  $W/kg$ :

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) \quad (W/kg) \quad (3)$$

gdje je  $W$  energija promatranog obujma, a  $dW/dm$  apsorbirana doza  $D$  ili  $SA$  (*Specific Absorption*) u  $J/kg$ , pa je  $SAR$  brzina apsorbirane doze.

Matematička definicija lokalnoga  $SAR$ -a u  $W/(kg\ m^3)$  ( $SAR_l$ ) za infinitezimalno mali obujam opisana je jednadžbom:

$$SAR_l = \left( \frac{dW}{dt} \right) \cdot \frac{1}{\rho} \quad (W/kg) \quad (4)$$

gdje je  $\rho$  gustoća tkiva.

Srednji  $SAR$  cijelog organizma ( $\overline{SAR}$ ) računa se prema jednadžbi:

$$\overline{SAR} = \frac{\int_V \overline{P} dV}{M} \quad (W/kg) \quad (5)$$

gdje je  $\overline{P}$  srednja snaga nabijenih čestica ozračenog organizma,  $V$  je njegov obujam, a  $M$  masa. Ispod rezonantne frekvencije,  $SAR$  je razmjernan sa  $f^2$ , a neposredno iznad, sa  $1/f$ .

Za impulsna polja kakvo je radarsko može se vrijeme izloženosti zračenju uzeti kao jedinično, npr. 6 min, i iskazuje se specifična apsorbirana energija  $SA$ .

4. Za frekvencije od 10 GHz do frekvencija ionizantnih zračenja definira se gustoća snage zračenja ( $S - Power\ Density$ ) u  $W/m^2$ . Gustoća EM-polja računa se iz njegovih komponentata prema jednadžbi:

$$S = E \cdot H = \frac{E^2}{Z_o} = H^2 \cdot Z_o \quad (W/m^2) \quad (6)$$

pri čemu je valna impedancija slobodnoga prostora  $Z_o = E/H$  ( $\Omega$ ).

### 2.3. Biološki učinci NIR-a [7]

#### *Biological Effects of Non-ionising Radiation*

O biološkim se učincima NIR-a govori kad se osjetilima organizma ili sensorima instrumenata mogu detektirati promjene tkiva izloženoga zračenju. Postojanje takvih promjena ne znači ujedno i opasnost po zdravlje ili život ozračenog organizma. Opasnost nastaje ako se na organizmu ili njegovu nasljedniku pojavljuju trajna oštećenja tkiva.

Utjecaj se NIR-a ogleda pretežito u tzv. toplinskom učinku, dakle zagrijavanju tkiva izloženoga zračenju gustoće snage reda veličine od  $1\ kW/m^2$  ( $100\ mW/cm^2$ ).<sup>11</sup> Lokalno zagrijavanje nastaje titranjem molekula u

<sup>6</sup> Pod unutarnjom geometrijom misli se na veličinu i raspored pojedinih organa.

<sup>7</sup> Na znanstvenom skupu oftalmologa 7. travnja 2005. u Opatiji prezentiran je rad prof. dr. Bože Vojnikovića o utjecaju UV-zračenja reflektiranoga s morske površine.

<sup>8</sup> Područja profesionalne izloženosti zračenju (*Occupational /Controlled Exposures*) su ona gdje su ljudi upoznati s mogućim zračenjima, a vrijeme boravka u njima obično nije veće od 8 radnih sati.

<sup>9</sup> Područja povećane osjetljivosti (*General Population /Uncontrolled*) su ona gdje se osobe mogu zadržavati 24 sata dnevno, a da pritom nisu upoznate s mogućim zračenjima.

<sup>10</sup> Gustoća snage zračenja Sunca ljeti je na našoj geografskoj širini približno  $900\ W/m^2$ . Ako je površina kože izložene Sunčevim zrakama približno  $1\ m^2$ , a masa tijela  $70\ kg$ , najveći  $SAR$  Sunčeva zračenja je  $900\ W\ m^{-2} \cdot 1\ m^2 / 70\ kg = 12,86\ W/kg$ . Ako je koža svijetla pa odbija dio Sunčevih zraka,  $SAR$  je manji.

<sup>11</sup> Mikrovalna pećnica, dijatermički aparati i slične naprave primjeri su korisnoga djelovanja NIR-a.

ozračenom tkivu, rotacijom svih dipolnih molekula i stimuliranim gibanjem iona. Tako pri SAR-u od 4 W/kg za 30 minuta temperatura poraste za 1 °C. Istraživanja potvrđuju da se pri povišenoj temperaturi, tzv. hipertermiji, djelovanje zračenja pojačava, a to onda opet povećava zagrijavanje, i krug se zatvara. Opasnost je od tih "opeklina" veća za tzv. radiosenzibilne osobe, te za osjetljivija tkiva i organe. Posebno su osjetljivi dijelovi tijela slabo opskrbljeni krvlju, kao što su očne leće (katarakta) i testisi (kratkotrajna neplodnost).

Valja istaknuti i da postoje frekvencijski "prozori" u kojima je djelovanje zračenja štetnije. Naime, ako se frekvencija valova ne mijenja, lako dolazi do rezonancije, a tada i mali podražaj može izazvati veliki učinak.

Osim termičkih uočene su i neke netermičke pojave vezane uz NIR niskih gustoća snage koje su, najvjerojatnije, također posljedice zagrijavanja stanica. Danas većina stručnjaka misli da su ti drugi učinci bitniji. To su promjene u imunološkom sustavu, neurološke promjene i promjene ponašanja, promjene djelovanja hormona, enzima i antitijela, usporena rekombinacija slobodnih radikala koja je ekvivalentna njihovoj povećanoj koncentraciji, što onda, zbog njihove velike reaktivnosti, može posredno trajno oštetiti molekule DNK i gena ili usporiti mehanizam "popravka" oštećenih molekula. Pri povišenoj tjelesnoj temperaturi luči se protein stresa, pa zračenje kao stresor zna biti uzrokom sniženja proizvodnje melatonina u hipofizi, što izaziva nesanicu, napetost, kroničnu depresiju i spontani pobačaj. NIR ponekad djeluje na propusnost membrane

živih stanica, što mijenja njezina svojstva i propusnost tvari bitnih za prehranu, rast i diobu stanica te način djelovanja lijekova.

Kod živčanih stanica odgovornih za prijenos signala i informacija, vanjsko EM-polje može utjecati na tijek i kakvoću tih informacija te izazvati "uspavljanje" aktivnosti živaca.

Šteta od NIR-a još se ne može procijeniti, a pogotovo ne za djecu i buduće generacije jer je biološko djelovanje kumulativno! To znači da organizam "pamti" sve što mu je prethodno učinjeno tako da biološki učinak ne stvara samo veličina SAR-a nego ukupna apsorbirana doza  $D$ , iskazana u J/kg. Naime, iz jednadžbe (3) i definicije apsorbirane doze  $D$  slijedi da je  $SAR dt = dD$ . Integriramo li lijevu stranu od 0 do  $t$ , a desnu od  $D_0$  do  $D$ , pri čemu je  $D_0$  početna doza ozračenosti, dobivamo:

$$D = D_0 + SAR t \text{ (Ws/kg)} \quad (7)$$

koja je dokaz o kumulativnom djelovanju zračenja.

Iz definicije SAR-a slijedi da ukupna apsorbirana doza zračenja ovisi o vremenu izloženosti zračenju i o masi organizma. Dakle, djeca su ugroženija od odraslih osoba temeljem dviju osnova: manje mase i moguće dulje, cjeloživotne izloženosti zračenju. No, valja reći i da su velike individualne razlike osjetljivosti na zračenje. Zbog toga se ne može govoriti o riziku populacijske grupe, već samo o riziku pojedinca. U tablici 1. nabrojena su dosad poznata djelovanja NIR-a kao funkcije valne duljine i frekvencije. Sjenčanim poljima označeni su biološki utjecaji s trajnim posljedicama.

**Tablica 1. Biološki utjecaji NIR-a različitih frekvencija**  
**Table 1. Biological influences of NIR of different frequencies**

Vrsta zračenja	Valna duljina/frekvencija	Biološki utjecaj
UVC	100 nm	Koža – erytherma, pigmentacija
UVB	280 nm	Oko – fotokeratitis (upala rožnice)
		Koža – erytherma, pigmentacija Rak kože
UVA	315 nm	Oko – fotokemijska katarakta
		Koža – fotosenzitivna reakcija Koža – erytherma, pigmentacija Koža – starenje, rak
Vidljivo	400 nm	Oko – fotokemijska i termička ozljeda mrežice
IRA	780 nm	Oko – termička ozljeda mrežice
IRB	1,4 μm	Oko – termička ozljeda mrežice, termička katarakta
		Koža – upala (crvenilo)
IRC	3 μm	Oko – upala rožnice, katarakta
	1 mm	Koža – upala (crvenilo) Oko – upala rožnice, katarakta Zagrijavanje površine tijela
Mikrovalovi	300 GHz	Zagrijavanje površine tijela
	1 GHz	Zagrijavanje do dubine od 10 mm
		Porast temperature tijela
Statička polja	< 100 kHz	Nakupljanje el. naboja na površini tijela
		Poremećaj odziva živaca i mišića
	0 Hz	Poremećaj odziva živaca i mišića Magnetsko polje – vrtoglavica i mučnina Električno polje – električki naboj na površini tijela

### 3. Dopuštene granice NIR-a [1], [3], [7], [10]

#### *Permitted Limits of Non-ionising Radiation*

U pedesetim godinama prošlog stoljeća, odmah nakon pojave radara većih frekvencija i snaga (radari s magnetronom), više je nacionalnih i internacionalnih institucija počelo s mjerenjem NIR-a i njegovih bioloških efekata te postavljanjem gornjih dopuštenih granica zračenja. Procjene neškodljivih razina zračenja dobivale su se ekstrapolacijom rezultata eksperimenata na živim organizmima i na ljudskom organizmu ili korištenjem matematičkim modelom čovjeka. Uočeno je da su granice postavljene u bivšem Sovjetskom Savezu i istočnim zemljama znatno niže od granica u zapadnim zemljama. Razlika se objašnjava činjenicom da su na Istoku postavljene granične razine pri kojima se biološki efekt ne može detektirati, a po zapadnim se norma razina određivala na granici pojave biološkog efekta te se onda u nju ugrađivao faktor sigurnosti.<sup>12</sup>

Najpoznatija međunarodna organizacija koja proučava neionizantna zračenja jest Međunarodna komisija za zaštitu od neionizantnih zračenja (ICNIRP – *International Commission on Non-Ionising Radiation*). Osim nje još nekoliko institucija, kao što su ANSI (*American National Standard Institute*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) i FCC (*Federal Communication Commission*), proučavaju neionizantna zračenja i postavljaju standarde koji se, manje ili više, razlikuju od ICNIRP-standarda. Granice su postavljene uz pretpostavku da je interakcija tijela i NIR-a najveća, što je rezultiralo nižom granicom, tj. većom zaštitom organizma. Pritom se izračunala srednja vrijednost zračenja preko cijelog organizma (*Spatial Averaging*) vodeći računa o tome da ni jedan njegov dio ne dobije veću dozu zračenja od postavljene sigurnosne granice. Na poticaj Njemačke, Europski komitet za elektrotehničku standardizaciju (CENELEC - *European Committee for Electrotechnical Standardization*) u suradnji s elektrotehničkim komisijama 18 zemalja donio je europski prestandard ENV 50166, podijeljen u dva dijela: ENV 50166-1, koji pokriva niske frekvencije, i ENV 50166-2 za visokofrekvencijska elektromagnetna zračenja. Iako ENV preuzima neke pretpostavke ICNIRP--norma, razlike postoje pri nižim frekvencijama i magnetnim poljima.

#### 3.1. Polazne činjenice pri postavljanju sigurnosnih granica zračenja

##### *Starting Facts on setting Safety of Radiation*

Zbog nedovoljnih informacija o utjecaju NIR-a na čovječji organizam i na eksperimentalne životinje te poteškoća u mjerenju primljenih doza, pri postavljanju sigurnosnih granica uzeto je u obzir nekoliko čimbenika koji bi mogli dodatno pojačati učinke zračenja:

- pojačano djelovanje zračenja u otežanim uvjetima kao što je porast temperature okoline ili povećana aktivnost ljudi,
- različit utjecaj zračenja na različite skupine ljudi, kao što su starije osobe, mladež, djeca, bolesne osobe ili osobe koje se koriste lijekovima što utječu na njihov termoregulacijski sustav,
- različita količina apsorbiranoga zračenja ovisno o veličini osobe i njezinu položaju u odnosu prema polju,
- refleksija, fokusiranje ili rasipanje polja kao posljedica utjecaja okolnih objekata, što može znatno povećati jakost polja na pojedinim dijelovima organizma.

#### 3.1. Temeljna ograničenja

##### *Basic Safety Limits*

Polazeći od znanstveno potvrđenih činjenica postavljena su temeljna ograničenja zračenja za različita frekvencijska područja koja ni pod kojim uvjetima ne smiju biti prekoračena.

Na frekvencijama od 1 Hz do 10 MHz gustoća struje mora biti manja od one koja izaziva poremećaje živčanog sustava. Na frekvencijama od nekoliko Hz do 1 kHz gustoća struje od 100 mA/m<sup>2</sup> može inducirati potencijale, pa je uz faktor sigurnosti 10 gustoća struje u tom području ograničena na manje od 10 mA/m<sup>2</sup>. Za područje povećane osjetljivosti dopuštena gustoća struje smanjena je još pet puta (2 mA/m<sup>2</sup>). Ispod 4 Hz i iznad 1 kHz rastu dopuštene gustoće u skladu s porastom praga osjetljivosti živčanoga sustava.

Između 100 kHz i 10 GHz SAR je ograničen na vrijednost koja neće izazvati pretjerano zagrijavanje tijela ili termički šok. U području preklapanja frekvencija od 100 kHz do 10 MHz vrijedi ograničenje za gustoću struje ili SAR; ovisno o tomu što je manje. Pri SAR-u od 4 W/kg u vremenu od 30 min očekivano je zagrijavanje tijela 1 °C, pa je granica za kontrolirano područje deset puta manja i postavljena je na 0,4 W/kg. Za nekontrolirano područje ona je smanjena dodatnih pet puta i iznosi 0,08 W/kg, pri čemu će osoba mase od 70 kg u jednoj sekundi primiti 5,6 J energije. Između 10 GHz i 300 GHz postavljeno je ograničenje za gustoću snage, tj. za površinsko zagrijavanje tkiva.

#### 3.2. Granične razine zračenja

##### *Safety Limits of Radiation*

Na temelju polaznih činjenica i temeljnih ograničenja postavljene su granične (sigurnosne) granice NIR-a. Pritom je pretpostavljena najjača moguća veza organizma i polja, što osigurava i najveću razinu zaštite. Te su razine srednje vrijednosti izračunate prostorno preko cijelog organizma, pa lokalne razine zračenja ne smiju premašiti zadane srednje vrijednosti. Granične su razine zračenja prikazane u tablici 2.

<sup>12</sup> «Why are Russian standards so strict? Comparative standard analysis of Russia, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Europe, and the US», Yu.G. Grigoriev, SRC - Institute of Biophysics, Moscow, A. L. Vasin, Bioelectromagnetic Compatibility Center, Moscow

Tablica 2. Temeljna ograničenja za izmjenična električna i magnetska polja do frekvencije od 10 GHz

Table 2. Basic safety limits for alternating electric fields up to the 10 GHz frequency

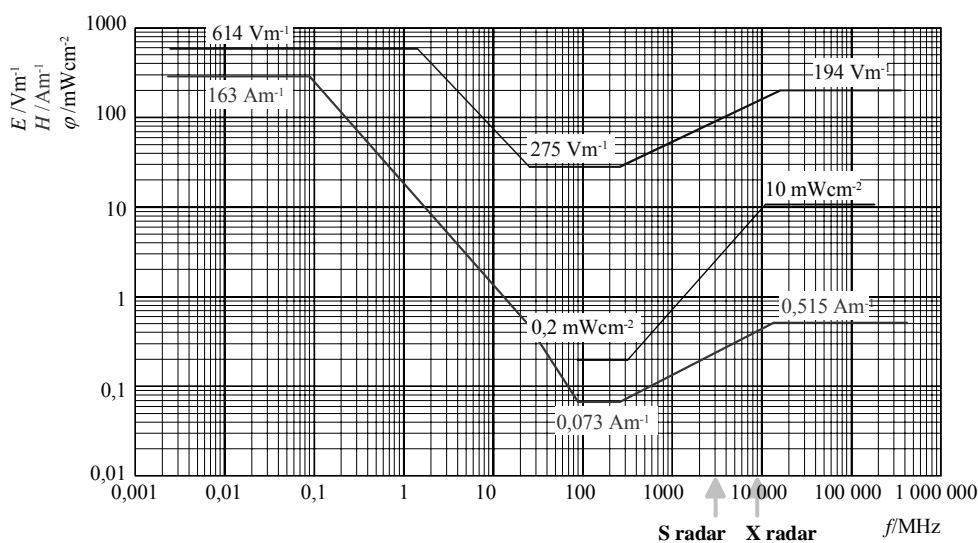
Podr. zračenja	Frekvencijsko područje	Gustoća struje za glavu i trup (mA/m <sup>2</sup> )	Srednja vrijednost SAR-a (W/kg)	SAR glave i trupa (W/kg)	SAR udova (W/kg)	Gustoća snage (W/m <sup>2</sup> )
Kontrolirano područje	do 1Hz	40	-	-	-	-
	1 – 4 Hz	40/f	-	-	-	-
	4 Hz do	10	-	-	-	-
	1 – 100 kHz	f/100	-	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/100	0,4	10	20	-
	10 MHz-10 GHz	-	-	0,4	10	20
Nekontrolirano područje	do 1Hz	8	-	-	-	-
	1 – 4 Hz	8/f	-	-	-	-
	4 Hz do	2	-	-	-	-
	1 – 100 kHz	f/500	-	-	-	-
	100 kHz-10 MHz	f/500	0,08	2	4	-
	10 MHz-10 GHz	-	-	0,08	2	-

Napomene:

- f je frekvencija u hertzima
- Zbog električne nehomogenosti tijela, srednja vrijednost gustoće struje izračunava se na površini od 1 cm<sup>2</sup>
- Do 100 kHz vršna vrijednost struje računa se množenjem efektivne vrijednosti s  $\sqrt{2}$ . Za impulsne pojave vremena trajanja t<sub>p</sub> frekvencija se računa kao:  $f = 1/(2t_p)$
- Za frekvencije do 100 kHz i impulsna magnetska polja, najveća gustoća struje računa se za vrijeme porasta ili pada polja pri najvećoj brzini promjene.
- Srednje vrijednosti SAR-a računaju se u intervalu od 6 min.
- Lokalni SAR računa se na masi od 10 g tkiva; najveći tako izračunati SAR služi za procjenu ozračenosti organizma.
- Od 0,3 GHz do 10 GHz kada je glava izložena zračenju, SA ne smije prelaziti 10mJ/kg za kontrolirana područja i 2 mJ/kg za nekontrolirana područja, mjereno na 10 g tkiva.
- Gustoća snage računa se na površini od 20 cm u intervalima od 68/f,05 minuta (f u GHz) da bi se kompenziralo smanjenje prodiranje vala u tkivo s porastom frekvencije.
- Lokalna srednja vrijednost polja, izračunata na 1 cm<sup>2</sup>, ne smije biti veća od dvadeseterostruke vrijednosti polja izračunate u točki 8.

Frekvencijska ovisnost pojedinih granica tumači se različitim biološkim učincima i interakcijom organizma i zračenja na različitim frekvencijama.

Na slici 2. grafički su predočene IEEE granične vrijednosti polja i gustoće zračenja.



Slika 2. IEEE granične vrijednosti polja i zračenja; standard C95.1-1982  
Figure 2. IEEE boundary field values and radiation C95.1 standard - 1982

ANSI-standard C95.1-1982 određuje najveće vrijednosti električnog i magnetnoga polja za frekencijsko područje od 300 kHz do 100 GHz. Iznad 300 MHz definirana je najveća dopuštena gustoća snage. Vrijednosti su definirane uz pretpostavku ozračenosti cijeloga tijela u vremenu od 6 min i SAR-u od 0,4 W/kg.

Ako se tijelo nalazi u poljima zračenja različitih frekvencija, njihov se ukupan učinak dobiva običnim zbrajanjem učinaka pojedinih polja.

#### 4. Navigacijski radar kao izvor NIR-a Radar Navigator as Non-ionising Source

Navigacijski radar kao izvor NIR-a ima nekoliko značajki:

- Radna frekvencija radara je vrlo visoka (vidi povećano frekencijsko područje na donjem dijelu slike 1.), i nalazi se u **X** opsegu (frekvencija oko 9 GHz, valna duljina oko 3 cm) te u **S** opsegu (frekvencija oko 3 GHz i valna duljina oko 10 cm). Valja naglasiti da se većina navigacijskih radara nalazi u **X**-području.

- Impuls je vrlo kratak i rijetko je duži od  $\tau_i = 1 \mu\text{s}$ .

- Frekvencija impulsa ili broj impulsa u jednoj sekundi (PRF – *Pulse Repetition Frequency*) je u širokim granicama od nekoliko stotina do nekoliko tisuća.

- Radarski snop ima oblik latice i rotira<sup>13</sup> u horizontalnoj ravnini jednolikom kružnom frekvencijom  $\omega$ .

#### 4.1. Srednja snaga emisijskog impulsa

##### Average Power of Emission Pulse

U tekstovima o NIR-u vrlo se često spominje *usrednjavanje*, tj. srednja snaga ili gustoća snage. Pritom se najčešće misli na veličinu gustoće izračunatu za cijelo tijelo ozračene osobe (*Spatial Averaging*; prostorna srednja snaga). Kod radara definiramo dvije vrste *vremenske* srednje snage: srednju snagu unutar

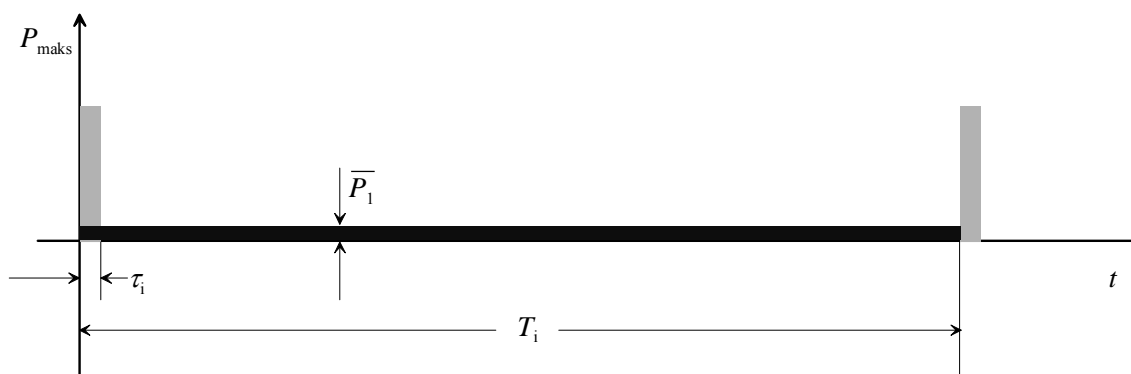
vremena ponavljanja jednog impulsa (antena miruje)  $\bar{P}_1$

i srednju snagu zbog rotacije antene  $\bar{P}_2$ , opisane u odjeljku 4.4.

Vremenska srednja snaga, definirana slikom 3. računa se po jednadžbi (8):

$$\bar{P}_1 = \frac{P_{\text{maks}} \cdot \tau_i}{T_i} \quad (8)$$

Pritom valja posebno istaknuti činjenicu da se u podacima o radaru najčešće spominje izlazna snaga  $P_i$  na izvoru impulsa – magnetronu – dok je izlazna snaga na anteni  $P_{\text{maks}}$  ili nadomjesna emitirana snaga (ERP – *Equivalent Radiated Power*), povećana za dobitak antene ( $G_a$  – *Antenna Gain*);  $P_{\text{maks}} = P_i G_a$ <sup>14</sup>.



Slika 3. Uz definiciju srednje snage odašiljača unutar periode 1/PRF

Figure 3. Accompanied by the definition of average radar power within 1/PRF

<sup>13</sup> Zbog činjenice da radarska antena pretražuje dio po dio prostora, u anglo-američkoj literaturi ona se najčešće zove *scanner*.

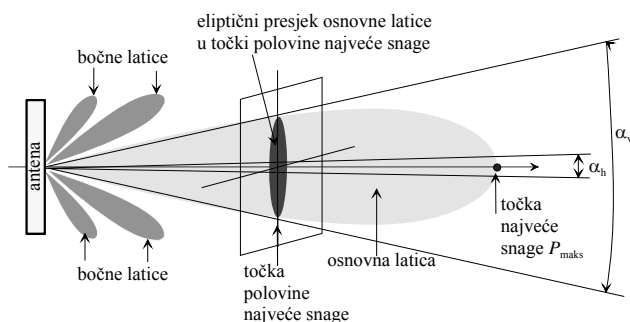
<sup>14</sup> Radari firme Kelvin Hughes imaju snagu na izlazu magnetrona reda veličine od 30 kW. Uz dobitak antene od 30 dB (1000 puta) i zanemarene gubitke u valovodu, snaga u vrhu radarskoga snopa na izlazu antene naraste na impresivnih  $P_{\text{maks}} = 30 \cdot 10^3 \cdot 10^{30/10} = 30 \cdot 10^6 \text{ W} = 30 \text{ MW}$ .

### 4.2. Radarska latica

#### Radar Petal

Dobitak antene definira se kao omjer snaga koje emitiraju usmjerena antena i takozvana svesmjerna<sup>15</sup> antena. Radarske su antene izrazito usmjerene antene.

Na slici 4. je polarni dijagram isijavanja radarske antene ili takozvana radarska latica. Horizontalni i vertikalni kut definiraju se na polovini najveće snage. Bočne laticice, koje su posljedica konačne duljine antene, stvaraju vrstu lažnih jeka u radarskoj slici, a na zračenje radara nemaju znatnijeg utjecaja.



Slika 4. Polarni dijagram snage radara (radarska latica)

Figure 4. Polar Diagram of Radar Power (Radar Petal)

Za standardnu antenu navigacijskoga radara duljine od 6 stopa<sup>16</sup>, horizontalni je kut snopa 1° a vertikalni 18°. Uži je snop moguće postići ugradnjom duže antene s više proreza.

### 4.3. Gustoća emitirane snage

#### Density of Radiated Power

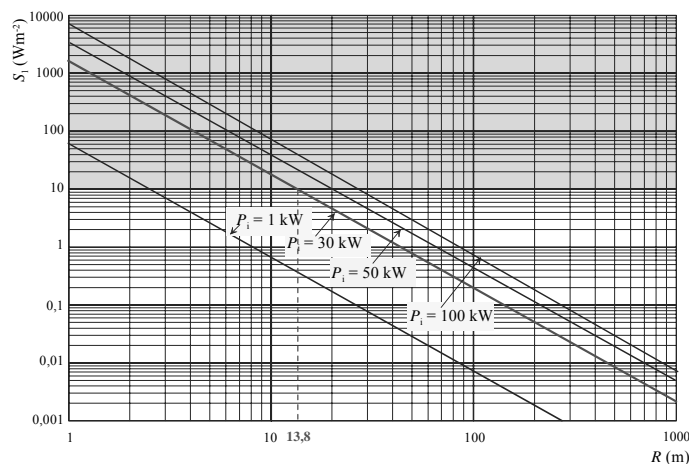
Već je u prvome dijelu rečeno da se na radarskim frekvencijama mjeri gustoća snage koja izaziva neki od bioloških učinaka. Za svesmjerne antene što emitiraju kuglast val, na udaljenosti  $R$  gustoća snage  $S$  dobiva se dijeljenjem emitirane snage  $P_i$  ploštinom kugle:

$$S = \frac{P_i}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \tag{9}$$

Za usmjerene antene snagu valja pomnožiti dobitkom antene, pa je gustoća snage u smjeru emitiranja:

$$S_{maks} = \frac{P_i \cdot G_a}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \tag{10}$$

Radi brže procjene gustoće snage, na slici 5. dijagramom su prikazane gustoće polja do udaljenosti od 1 km za nekoliko radara nazivnih snaga na izlazu magnetrona od 1, 30, 50 i 100 kW, za dobitak antene od 30 dB, trajanje impulsa 0,25 μs te odnos trajanja impulsa i stanke (Duty Cycle- DC) 0,0008<sup>17</sup>. Pogledamo li krivulju za snagu prosječnoga navigacijskog radara od 30 kW, gustoća snage dostiže graničnu vrijednost od 10 W/m<sup>2</sup> na udaljenosti od 13,8 m.<sup>18</sup> Valja istaknuti da su gustoće snage na slici 5. izračunate za mirujuću antenu, uz pretpostavku da je osoba neprekidno u radarskome snopu.



Granična razina referentnih veličina za područje profesionalne izloženosti zračenju u sjenčenom polju prelazi 10 (W/m<sup>2</sup>) (Ministarstvo zdravstva RH, "Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja", str. 12, tablica 2)

Slika 5. Srednje gustoće snage radara različitih snaga magnetrona s obzirom na udaljenost ozračene osobe od radarske antene

Figure 5. Mean density of magnetron radar power considering the distance between the radiated person and radar antenna

<sup>15</sup> Svesmjerna antena ili antena koja emitira kuglasti val (Omnidirectional Antenna) jednako u svim smjerovima, teorijski je zamisliva, ali praktički neizvediva.

<sup>16</sup> 1 stopa = 0,3048 m. Po tradiciji, duljina antena mjeri se u stopama.

<sup>17</sup> Za radare firme KELVIN HUGHES na malim je dometima trajanje impulsa od 0,25 μs pri frekvenciji ponavljanja od 3.200 impulsa u sekundi, a na velikim dometima duljina impulsa raste na 1 μs, a frekvencija pada na 800. Zanimljivo je da je u oba slučaja omjer ovih veličina (Duty Cycle)  $\tau_i / T_i$  (slika 3.) isti i jednak 0,0008.

<sup>18</sup> Vrlo je često oko jarbola radarske antene nacrtan žuti krug polumjera od desetak metara kao oznaka područja opasnog zračenja.



#### 4.4. Rotacija radarske latice

##### Rotation of Radar Petal

Radarska antena rotira konstantnom kutnom brzinom pretražujući tako okolinu. To znači da će ozračena osoba biti u radarskome snopu samo povremeno, pa možemo govoriti o još jednom usrednjavanju gustoće snage. Pri  $n$  okretaja u minuti, horizontalnom kutu  $\alpha_h$  i frekvenciji od  $PRF$  impulsa u sekundi, osoba je ozračena  $t$  sekundi:

$$t = \frac{\alpha_h}{6 \cdot n} \quad (11)$$

Za to vrijeme radar u smjeru ozračene osobe emitira  $n_i$  impulsa:

$$n_i = t \cdot PRF = \frac{\alpha_h}{6} \cdot PRF \quad (12)$$

Preostalo vrijeme osoba nije ozračena radarom. Definiramo li sada drugu vremensku srednju snagu radara kao visinu pravokutnika kojemu je ploština jednaka ploštini  $n_i$  impulsa što ih osoba primi u jednom okretu antene (slika 6.), dobivamo:

$$\bar{P}_2 = \frac{n_i \cdot \tau_i \cdot P_{maks}}{T} = \bar{P}_1 \cdot \frac{\alpha_h}{360} \quad (13)$$

i za srednju gustoću snage:

$$S_2 = \frac{\bar{P}_2}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (14)$$

#### 4.5. Gustoća snage u impulsu

##### Power Density in the Pulse

Pouzdana podaci o utjecaju snažnih kratkotrajnih impulsa s velikom periodom ponavljanja postoje uglavnom za frekvencije u okolini 2,45 MHz (mikrovalne pećnice) [5]. Dokazano je da na toj frekvenciji gustoća polja u impulsu  $S_{maks}$  od 13 kW/m<sup>2</sup> stvara kod ozračenih osoba slušni efekt. Osim toga, mikrovalni impulsi mogu proizvesti nelagodu i stres. Bez obzira na to što nije dokazano da slušni efekt i popratne pojave stvaraju trajne štetne promjene na organizmu, navedena je vrijednost gustoće snage uzeta kao polazište za postavljanje graničnih vrijednosti u frekvencijskome rasponu od 0,1 do 300 GHz.

Na temelju jednadžba o SAR-u opisanih u Priručniku dozimetrije (*Dosimetry Handbook*) te dokazanim promjenama u ponašanju ozračene osobe pri 500 kW/m<sup>2</sup> i faktoru sigurnosti 10, postavljene su sljedeće granice za gustoću snage impulsa:

- za područje 1 od 0,1 do 3 GHz:

$$\{S_{maks}\} = 50 \text{ kW/m}^2 \quad (15)$$

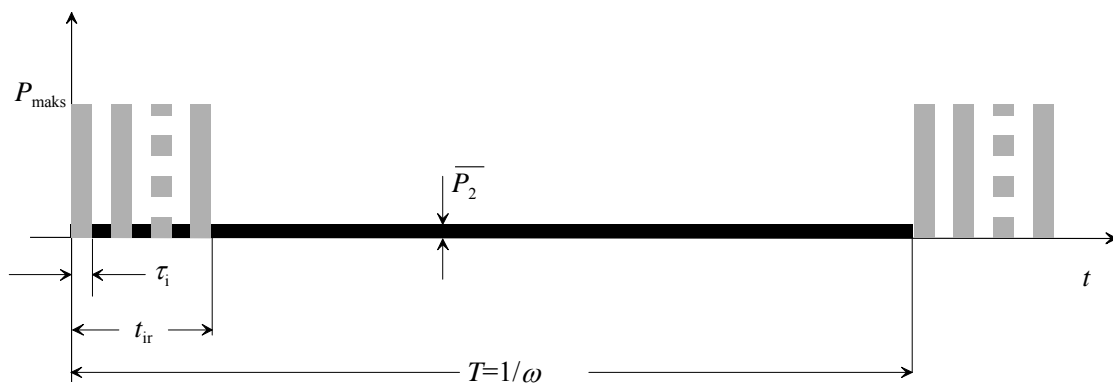
gdje vitičaste zagrade znače brojčane iznose veličina;

- za frekvencijsko područje navigacijskih radara (3 - 10 GHz) (područje 2):

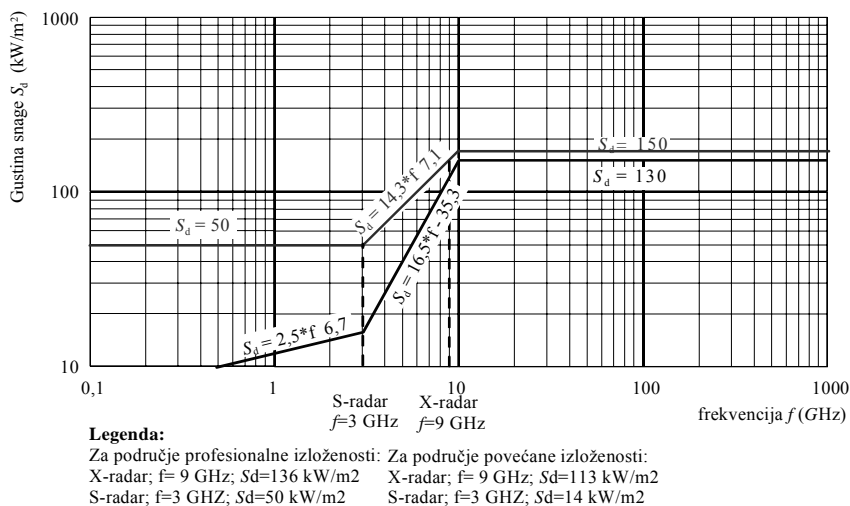
$$\{S_{maks}\} = (14,3 \cdot \{f\} \cdot 10^9 + 7,1) \quad (16)$$

- za područje 3 iznad 10 GHz, na temelju pokusa na mačkama, granica je postavljena na 150 kW/m<sup>2</sup>.

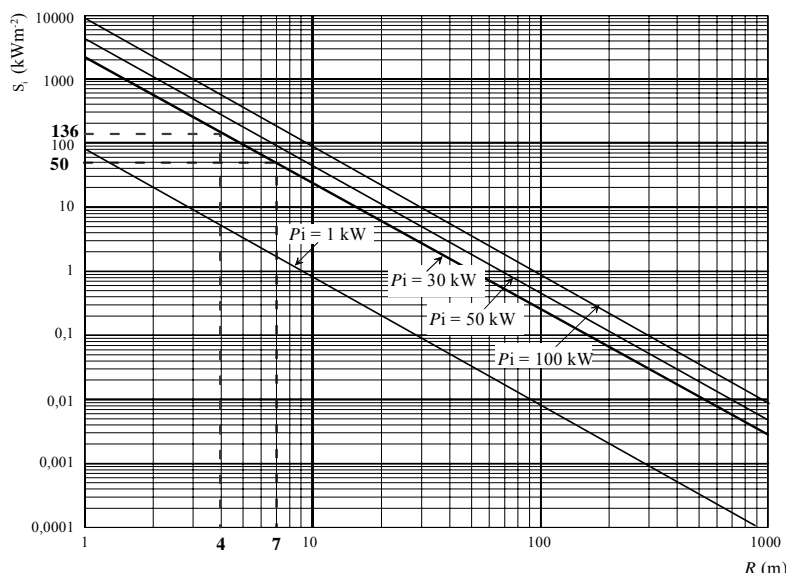
Navedene granice prikazane su na slici 7. a slikom 8. izračunate gustoće snage u impulsu prije spomenutih radara. Iz slike 8. i jednadžbe (16) slijedi da je opasno područje za X-radar krug polumjera od 4 m, a za S-radar 7 m.



Slika 6. Uz izračunavanje srednje snage zračenja unutar jednog okreta antene  
Figure 6. Accompanied by calculating the average radiation power within one antenna rotation



**Slika 7. Granične vrijednosti gustoće snage u impulsu**  
**Figure 7. Boundary values of power density in the pulse**



**Slika 8. Gustoće snage u impulsu ovisno o udaljenosti**  
**Figure 8. Power density in the pulse depending on the distance**

Prema ICNIRP-normama i DIN VDE 0848, ako je odnos impuls - mirovanje (*Duty Cycle*) veći od 1:1000, za procjenu štetnosti radara bitna je srednja snaga - jednađžba (10), slika 5. U primjeru iz odjeljka 4.3. DC je 0,0008 < 1/1000, pa bi kritično područje bilo unutar 4 i 7 m. No, kako se DC promjenom duljine impulsa može promijeniti, korisno bi bilo kao sigurnosnu zonu uzeti 14 m prema slici 5.

**5. Zaključak**

**Conclusion**

Sva su zračenja štetna, osobito kad im je osoba dugo izložena, ali neka od njih iz civilizacijskih potreba ne izbjegavamo, nego štetnost pokušavamo svesti na minimum. Pri uporabi zračenja u medicinske svrhe

primjenjujemo načelo optimizacije: prihvaćaju se ona zračenja i njihove doze za koje se sa sigurnošću može dokazati da je korist veća od štete. Nažalost, često je korist društvena, a šteta pojedinačna, pa su onda i kriteriji procjene drukčiji.

U ovome času nema dovoljno znanstveno potvrđenih informacija da se isključi mogućnost rizika. Naime, nije dokazano da NIR šteti zdravlju, ali se ne može dokazati ni da ne šteti jer u istraživanjima o štetnosti zračenja za čovječji organizam ne koristi se ljudima za pokuse, nego tzv. fantom-lutkom punjenom tekućinom ili računalnim programom koji "oponaša" tkivo i čovječji organizam. Budući da ti nadomjesci ne mogu dostatno realno simulirati složene procese u čovječjem organizmu, takva istraživanja nisu dovoljno pouzdana da se izvedu valjani zaključci. Istraživanja na miševima i preslikavanje dobivenih rezultata na čovjeka imaju isto tako ograničenu vrijednost. Pravi odgovori o štetnosti zračenja dobili bi se tek dugotrajnim, možda i generacijskim, interdi-

sciplinarnim i multidisciplinarnim istraživanjima na živim ljudima.

Što se zračenja navigacijskoga radara tiče, na temelju vrijednosti zračenja opisanih i izračunanih u poglavlju 4. ovoga rada, može se zaključiti da je njegovo zračenje štetno za ljudski organizam u neposrednoj blizini radarske antene. Nažalost, NIR-zračenja iz više izvora su kumulativna. To znači da se u lukama i gustim plovim putevima zračenja radara susjednih brodova zbrajaju pa osobe mogu vrlo lako biti ozračene preko zadanih granica.

*Zbog toga, uz nedovoljno dokaza o štetnosti NIR-a bilo kojeg izvora, neionizantna zračenja valja prihvatiti kao civilizacijski rizik.*

## Literatura

### References

- [1] «Electromagnetic Fields and Public Health: Radars and Human Health», World Health Organisation, Fact Sheet N°226, June 1999
- [2] „Electromagnetic Radiation: Field Memo“, U.S. Department of Labor, Occupational Safety & Health Administration, 1990
- [3] «Guide Lines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Ghz)», I C N I R P International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
- [4] Standards-Compliant Test of Non-Ionising Electromagnetic Radiation on Radar Equipment“, Narda Safety Test Solutions, Technical Note 2, 2002
- [5] David Jenn, «Electromagnetic Radiation Hazards», Naval Postgraduate School, Department of Electrical & Computer Engineering, Monterey, California
- [6] Dina Šimunic, Helmut Keller, Zlatko Koren, «Measurement of an Electric Field of a Scanning Radar Antenna», Narda, Safety Test Solutions, 2002
- [7] Kwan-Hoong Ng, «Non-Ionizing Radiations – Sources, Biological Effects, Emissions and Exposures», Proceedings of the International Conference on Non-Ionising Radiation at UNITEN, october, 2003
- [8] Hans - J. Förster, Wandel & Goltermann, «Electromagnetic Radiation: Regulations and Standards in Europe», Narda, Safety Test Solutions, 2002
- [9] Robert F. Cleveland, Jr., Jerry L. Ulcek, «Questions and Answers about Biological Effects and Potential Hazards of Radiofrequency Electromagnetic Fields», Oet Bulletin 56, Fourth Edition, August 1999
- [10] Roman Kubacki , Stanislaw Szmigielski, Halina Aniolczyk, «Measurement of Microwave Radiation from Rotating Radar Antennas and Proposals for Limiting Exposure to Pulse Modulated Radiation in General Public and Occupational»

Rukopis primljen: 21.4.2005.

