

# MJERE SIGURNOSTI I ZAŠTITA PRILIKOM REMONTA NUKLEARNOG REAKTORA

---

**Božić, Doris**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:562748>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Doris Božić

# **MJERE SIGURNOSTI I PRILIKOM REMONTA NUKLEARNOG REAKTORA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2021

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department  
Professional undergraduate study of Safety and Protection

Doris Božić

**SAFETY MEASURES AND PROTECTION  
DURING THE OVERHAUL OF A NUCLEAR  
REACTOR**

Final paper

Karlovac, 2021.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite  
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Doris Božić

# **MJERE SIGURNOSTI I ZAŠTITA PRILIKOM REMONTA NUKLEARNOG REAKTORA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Dr. sc. Slaven Lulić, prof.v.š.

Karlovac, 2021.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILISTE U KARLOVCU

Stručni studij: Stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu

Karlovac, 2021.

### ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Doris Božić

Matični broj: 0415611015

Naslov: Mjere sigurnosti i zaštite prilikom remonta nuklearnog reaktora

Opis zadatka:

Tema završnog rada su mjere sigurnosti i zaštita prilikom remonta nuklearnog reaktora. U prvom dijelu rada upoznajemo se sa pojmom nuklearne fizike, strukturom jezgre atoma, izotopima, stabilnosti atomskih jezgara, radioaktivnosti, nuklearnom energijom vezanja nukleona u jezgri i nuklearnim udarnim presjekom. Zatim je objašnjeno prodiranje zračenja kroz materijale i važnost alfa, beta i gama čestica. Nakon toga je objašnjena fisija i lančana reakcija. Zatim dolazimo do pojma nuklearnog reaktora i remonta nuklearnog reaktora i osobnih zaštitnih sredstava i opreme. U posljednjem djelu je objašnjeno djelovanje zračenja.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

03/2021

08/2021

09/2021

Mentor:

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

Dr.sc. Slaven Lulić

Ivan Štedul, v. pred.

## **PREDGOVOR**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i znanja stečena tijekom ovog studija.

Posebno se zahvaljujem svom mentoru, dr. sc. Slavenu Luliću, na velikoj pomoći, ukazanom povjerenju i strpljenju tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se svojim predivnim kćerima na razumijevanju dok je mama pisala završni rad, isto tako se zahvaljujem mužu na potpori i široj obitelji koja je omogućila ovaj studij. Ovaj završni rad posvećujem svojoj teti, Ani Živčić, koja je bila inspiracija i snaga u mom životu.

## SAŽETAK

Tema završnog rada su mjere sigurnosti i zaštita prilikom remonta nuklearnog reaktora. U prvom dijelu rada upoznajemo se sa pojmom nuklearne fizike, strukturom jezgre atoma, izotopima, stabilnosti atomskih jezgara, radioaktivnosti, nuklearnom energijom vezanja nukleona u jezgri i nuklearnim udarni presjekom. Zatim je objašnjeno prodiranje zračenja kroz materijale i važnost alfa, beta i gama čestica. Nakon toga je objašnjena fisija i lančana reakcija. Zatim dolazimo do pojma nuklearnog reaktora i remonta nuklearnog reaktora i osobnih zaštitnih sredstava i opreme. U posljednjem djelu je objašnjeno djelovanje zračenja.

Ključne riječi: Fuzija, Fisija, Ionizirajuće zračenje, Nuklearni reaktor, Doze zračenja

## SUMMARY

The topic of the final paper is safety measures and protection during the overhaul of a nuclear reactor. In the first part of the paper we are introduced to the concept of nuclear physics, atomic nucleus structure, isotopes, atomic nucleus stability, radioactivity, nuclear binding energy of nucleons in the nucleus and nuclear impact cross section. The penetration of radiation through materials and the importance of alpha, beta and gamma particles are then explained. This is followed by explanations of fission and chain reaction. Then we come to the notion of a nuclear reactor and the overhaul of a nuclear reactor and personal protective equipment. The last part explains the effect of radiation.

Keywords: Fusion, Fission, Ionizing radiation, nuclear reactor, radiation dose

## SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA .....	I
PREDGOVOR .....	II
SAŽETAK .....	III
SADRŽAJ .....	IV
1. UVOD.....	1
2. UVOD U NUKLEARNU FIZIKU .....	2
2.1. Struktura jezgre atoma .....	2
2.2. . Izotopi.....	3
2.3. Stabilnost atomskih jezgara.....	4
2.4. Radioaktivnost.....	5
2.5. Nuklearna energija vezanja nukleona u jezgri .....	5
2.6. Nuklearni udarni presjek .....	8
3. PRODIRANJE ZRAČENJA KROZ MATERIJALE .....	9
3.1. Ionizirajuća zračenja .....	10
3.2. Alfa čestice .....	10
3.3. Beta čestice.....	11
3.4. Gama čestice .....	11
4. FISIJA.....	12
4.1. Mehanizam fisije .....	12
4.2. Karakteristike fisije i fisijski produkti.....	13
4.3. Fisijski neutroni.....	15
5. LANČANA REAKCIJA .....	16
6. NUKLEARNI REAKTOR .....	18
6.1. Uvjeti kritičnosti homogenih i heterogenih reaktora.....	19
6.2. Reaktor s reflektorom.....	20
7. REMONT NUKLEARNOG REAKTORA I OSOBNA ZAŠTITNA SREDSTVA I OPREMA .....	21
8. DJELOVANJE ZRAČENJA .....	24
8.1. Doze zračenja .....	25
8.2. Posljedice akutnih i kroničnih doza zračenja .....	26
8.3. Izvori radioaktivnog zračenja u okolini i granične doze zračenja.....	28
8.4. Zaštita od nuklearnog zračenja.....	29



9. ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA .....	31
POPIS SLIKA.....	32
POPIS TABLICA .....	33

## 1. UVOD

Bez električne energije funkcioniranje današnjeg modernog svijeta ne bi bilo moguće. Električna energija nam je potrebna za obavljanje svakodnevnih aktivnosti. Nuklearna elektrana je energetska postrojenje u kojem se toplinska energija, proizvedena u nuklearnom reaktoru kontroliranom lančanom reakcijom fisije atoma uranija ili plutonija, pretvara u električnu. Nuklearne elektrane pokazale su se kao pouzdan i ekonomičan izvor električne energije. Da bi nuklearne elektrane mogle funkcionirati, potrebno je svakih 18 mjeseci napraviti remont. Dobre su strane nuklearnih elektrana što ne onečišćuju okoliš ispuštanjem dima i plinova, a nedostaci su povećano toplinsko opterećenje okoliša i stvaranje radioaktivnog materijala.

Učenjem, zakonima i provedbom istih možemo smanjiti negativan utjecaj na okoliš i poboljšati rad nuklearnih elektrana. Zaštitom na radu omogućujemo smanjenje rizika od zračenja za zdravlje ljudi koji žive u blizini postrojenja, kao i za radnike koji obavljaju razne djelatnosti u nuklearnim elektranama i na zbrinjavanju radioaktivnog otpada.

## 2. UVOD U NUKLEARNU FIZIKU

Nuklearna fizika je dio moderne fizike koja istražuje i proučava svojstva i strukturu atomskih jezgri i procese, odnosno reakcije povezane s atomskim jezgrama (npr. radioaktivnost) i međudjelovanje atomskih jezgri (npr. nuklearnu fiziju i fusiju).

### 2.1. Struktura jezgre atoma

Fizikalni svijet je izgrađen od velikog broja elementarnih čestica, što znači da je i struktura jezgre atoma koja je sastavljena iz tih čestica vrlo komplicirana. Ali za potrebe primjene u nuklearnoj energetici i tehnici najčešće je dovoljno promatrati vrlo ograničen skup takvih čestica. Nazivi i karakteristike tih čestica su:

- Elektron  
Elektron je čestica koja nosi negativni električni naboj od  $1.60219 \times 10^{-19}$  kulona i ima masu u mirovanju  $9.10956 \times 10^{-31}$  kilograma. U nekim se nuklearnim reakcijama pojavljuje i pozitron. Pozitron je čestica iste mase i naboja kao i elektron, samo joj je predznak naboja pozitivan.
- Proton  
Proton je čestica pozitivnog električnog naboja koji iznosi isto kao i naboj pozitrona. Masa mu je 1836 puta veća od mase elektrona i u mirovanju iznosi  $1.67261 \times 10^{-27}$  kilograma.
- Neutron  
Neutron je električni neutralna čestica, što znači da nema električnog naboja. Masa u mirovanju mu iznosi  $1.67492 \times 10^{-27}$  kilograma. Neutron lako prodire u nuklearne jezgre i izaziva nuklearne reakcije. Osnova fizikalne teorije nuklearnog reaktora su nuklearne reakcije s neutronima. Neutron izvan atomske jezgre, odnosno slobodni neutron nije stabilna čestica, već se s vremenom poluraspada od oko 12 minuta raspada na proton, elektron i antineutrino.
- Foton  
Foton nije materijalna čestica u običajnom smislu, već je u osnovi kvant elektromagnetskog zračenja koji je posrednik u prenošenju elektromagnetskoga međudjelovanja. Nema mase mirovanja, nema električni naboj i u vakuumu se kreće konstantnom brzinom svjetlosti koja iznosi  $2.9979 \times 10^8$  metara po sekundi.
- Neutrino

Neutrino je čestica bez mase mirovanja i bez električnog naboja. Nastaje kod nekih nuklearnih raspada, a najčešće kod emisija elektrona (beta emisija).

Prema pojednostavljenoj slici o sastavu i strukturi atoma koja se koristi za razumijevanje najbitnijih pojava u nuklearnoj energetici i nuklearnoj tehnici može se smatrati da su jezgre atoma sastavljene od samo dvije vrste elementarnih čestica: protona i neutrona. Oko električki pozitivno nabijene jezgre kruže električki negativno nabijeni elektroni. Broj protona u jezgri atoma se označava sa  $Z$ . Broj neutrona u jezgri atoma se označava sa simbolom  $N$ . Zbroj broja protona i neutrona u jezgri određuje masu jezgre, a masa jezgre se označava sa simbolom  $A$ . Iz toga dobivamo da vrijedi izraz  $A=Z+N$ . U nuklearnoj fizici se za protone i neutrone u jezgri atoma koristi naziv nukleoni.

Jedinica energije u nuklearnoj fizici se zove elektronvolt čija je kratica eV. Definirana je kao radnja koju treba utrošiti da se elektron pomakne u elektrostatskom polju nasuprot potencijalnoj razlici od jednog volta. S obzirom da radnja potrebna da se naboj od jednog Kulona (C) pomakne nasuprot potencijalnoj razlici od jednog volta iznosi jedan džul (J) i da je naboj elektrona  $e=-1.60219 \times 10^{-19}$  C slijedi da je  $1\text{eV}=1.60219 \times 10^{-19}$  J. Elektronvolt nije jedinica međunarodnog SI sustava jedinica. Zakonski je dopuštena njezina uporaba u nuklearnoj fizici, zbog prikladnosti upotrebe i njezine široke rasprostranjenosti.

U nuklearnoj fizici je za jezgre atoma uveden naziv nuklidi. Uz oznaku kemijskog elementa dovoljno je navesti ukupan broj nukleona u jezgri  $A$ , budući da broj protona u jezgri  $Z$  definira kemijski element kojemu pripada nuklid. Apsolutne mase atoma su vrlo malene pa ih je iz tog razloga nepraktično izražavati u jedinicama mase SI sustava, točnije u kilogramima. Zbog toga je u atomskoj fizici usvojena unificirana atomska masena jedinica  $A_{JM}$  kao  $1/12$  mase nuklida  $^{12}\text{C}$ . Iz te definicije proizlazi apsolutni iznos masene jedinice:  $A_{JM}=1.660565 \times 10^{-27}$  kg. Zakonski je upotreba unificirane atomske jedinice mase  $A_{JM}$  iznimno dopuštena u fizici i kemiji.

## 2.2. Izotopi

Izotopi su atomi koji sadrže isti broj protona, a različiti broj neutrona. Broj protona u jezgri atoma i odgovarajući broj elektrona u njegovom plaštu određuju prirodu kemijskog elementa. Kemijska svojstva se ne mijenjaju promjenom broja neutrona u jezgri atoma, ali fizikalna svojstva tih atoma mogu biti veoma različita. Izotopi se dijele na stabilne i nestabilne (radioaktivne) izotope. Kada se govori o sadržaju izotopa u nekom kemijskom elementu, treba

obratiti pažnju da li je riječ o atomskom ili masenom sadržaju . Za nuklearnu energetiku su od posebnog značaja izotopi urana  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Od važnosti su i izotopi vodika  $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ . Izotop  $^2\text{H}$  je stabilan i poznat pod nazivom deuterij, dok je izotop  $^3\text{H}$  radioaktivan i poznat kao tritij. U reaktorskoj tehnici je potrebno odvajati izotope nekog kemijskog elementa u svrhu mnogih primjena. Od posebne je važnosti odvajanje izotopa urana. U postupcima za odvajanje izotopa urana se koriste fizikalni postupci koji se baziraju na činjenici da atomi izotopa imaju drukčije mase ili se razlikuju po nekim drugim fizikalnim karakteristikama.

### 2.3. Stabilnost atomskih jezgara

Stabilnost atomskih jezgara se određuje nuklearnim silama i elektrostatskom silom. Nuklearne sile su od ključne važnosti za razumijevanje stabilnosti atomskih jezgara. Bez tih sila jezgre ne bi mogle postojati, jer bi elektrostatske odbojne sile između protona onemogućile njihovo formiranje. Ključne karakteristike nuklearnih sila su:

- kratak domet djelovanja
  - nuklearne sile djeluju na udaljenosti koja je istog reda veličine kao promjer jezgre, tj. reda  $10^{-13}$  cm
- nuklearne sile su privlačne i veoma snažne
  - nuklearne sile između nukleona u unutrašnjosti jezgre višestruko nadvladavaju odbojnu elektrostatsku silu. Na savladavanje nuklearne sile radi odvajanja jednog nukleona iz jezgre težeg elementa treba utrošiti energiju od oko 8 MeV.
- nuklearne sile djeluju između parova nukleona i pokazuju svojstvo zasićenja
  - utjecaj elektrostatske sile raste s povećanjem broja protona u jezgri, jer je elektrostatska odbojna sila u unutrašnjosti jezgre slabija od nuklearne sile, ali nema svojstvo zasićenja. Stabilni nuklidi mogu postojati samo unutar određenih odnosa broja protona i neutrona u jezgri. Kod lakih se jezgara stabilnost postiže kada je broj neutrona  $N$  jednak broju protona  $Z$ . Stabilnost je uvjetovana relativnim povećanjem djelovanja nuklearnih sila koje su potrebne za kompenzaciju sve jačih elektrostatskih odbojnih sila među protonima u jezgri.
- paran ili neparan broj nukleona u jezgri
  - jezgre sa parnim brojem protona i parnim brojem neutrona su stabilnije od onih kod kojih je jedan od ta dva broja neparan, a posebno kod kojih su oba broja neparna
- „magičan“ broj protona i neutrona u jezgri

-atomske jezgre koje sadrže 2,8,20,50 i 82 protona i 2,8,20,50,82 i 126 neutrona su naročito stabilne. Objašnjenje ovih pojava treba tražiti u modelima gradnje jezgre atoma koji tumače stabilnost jezgara vezivanjem neutrona u parove. Magične brojeve treba povezati sa ljuskastim modelom atomske jezgre. Taj model objašnjava periodičnost pojave naročito stabilnih konfiguracija u jezgri po punjenjem unutarnjih ljuski sa nukleonima. Nukleon koji preostaje nakon kompletiranja ljuske je posebno slabo vezan za jezgru.

## 2.4. Radioaktivnost

Radioaktivnost je proces gdje se nuklidi koji se nalaze van područja stabilnosti ili koji se nalaze u pobuđenom stanju (nestabilni), prirodnom težnjom putem transformacija ili putem emisija suvišnih čestica vrata u područje stabilnosti. Radioaktivnim raspadima nestabilne jezgre postupno prelaze u stanje stabilnosti. Vjerojatnost da će se neka nestabilna jezgra raspasti je ovisna o vremenu i prirodi te jezgre.

Jedinica za aktivnost u SI sustavu jedinica je jedan raspad u sekundi. Ime jedinice je Bekerel ( $Bq=1/s$ ). Stara, mnogo veća i još upotrebljavana jedinica za aktivnost je 1C (Curie)  $=3.7 \times 10^{10}$  Bq.

Za nuklearnu energetiku od posebnog značaja su nestabilni nuklidi sa viškom neutrona jer takvi nuklidi potječu iz fisija teških jezgara (urana ili plutonija). Stabilnost teških atomskih jezgara je oslovljena većim odnosom broja neutrona i protona nego što je to slučaj kod lakših jezgara. Pri fisiji, fisioni fragment, tj. novonastale lakše jezgre, zadržavaju praktički isti odnos neutrona i protona kao i teška jezgra prije raspada, a to je odnos koji im ne omogućava stabilnost.

Jezgre smanjuju broj neutrona putem jedne od slijedećih nuklearnih reakcija:

- Emisijom neutrona
- Pretvorbom neutrona u proton putem  $\beta$  raspada

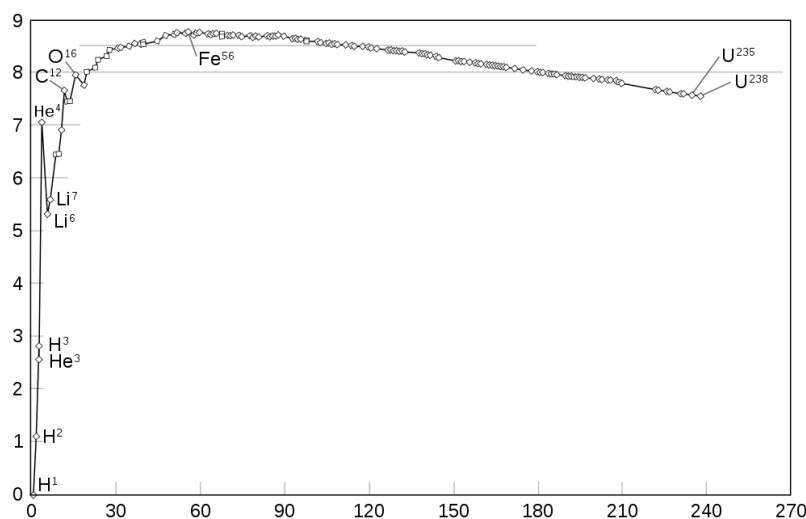
## 2.5. Nuklearna energija vezanja nukleona u jezgri

Nuklearne jezgre su čvrsto vezani sustav nukleona (protona i neutrona), a sile koje osiguravaju stabilnost atomskih jezgara su nuklearne sile. Odvajanje nukleona iz jezgre zahtjeva utrošak energije. Nuklearna energija vezanja je u stvari rad potreban da se atomska jezgra rastavi na svoje sastavne dijelove: protone i neutrone. Taj isti rad treba izvršiti pri zbližavanju nukleona

u postupku stvaranja atomske jezgre. Atomske jezgre su stabilniji energetski sustav od sustava pojedinačnih nukleona. Kod postizanja veće stabilnosti nuklearnog sustava oslobađa se energija na račun pretpostavke da je materija neuništiva i da se ona javlja u dva osnovna oblika koja se mogu međusobno transformirati. To su masa i energija. Povećanje energije mora dovesti do smanjenja mase i obrnuto. Specijalna teorija relativnosti Alberta Einstein je odredila kvantitativna izraz za uvjet pretvorbe mase u energiju. To je poznata formula:  $\Delta E = \Delta m c^2$ .  $\Delta E$  je promjena energije sustava,  $\Delta m$  je promjena mase sustava, a  $c$  je brzina svjetlosti koja iznosi ( $2.9979 \times 10^8$  m/s). Formula se riječima može opisati na slijedeći način: svaku promjenu energije sustava prati i odgovarajuća promjena njegove mase, odnosno tzv. defekt mase. Odnos između defekta mase i promjene energije je veoma visok (kvadrat brzine svjetlosti).

Budući da je atomska jezgra stabilniji sustav od sustava pojedinačnih nukleona koji je sastavljaju, pri njezinom formiranju mora doći do smanjenja mase sustava. Defekt mase koji nastaje kod formiranja jezgre se dobiva kao razlika zbroja masa svih nukleona koji sačinjavaju jezgru ( $\Sigma m_{nu}$ ) i mase nastale jezgre ( $m_j$ ). Prema Einstein-ovoj relaciji oslobođena će energija kod formiranja jezgre biti:  $\Delta E = (\Sigma m_{nu} - m_j) * c^2$

Energija koja se oslobađa kod formiranja jezgre iz pojedinačnih nukleona ili energija koju treba utrošiti da se jezgra razbije na njezine sastavne dijelove je definirana kao energija veze nukleona u jezgri. Ako tu energiju podijelimo sa brojem nukleona u jezgri ( $A$ ), dobivamo prosječnu energiju veze po nukleon  $E_v$ . Prosječna je energija veze po nukleonu, izražena u MeV, u funkciji atomske mase jezgre  $A$  prikazana na slijedećoj slici:



Slika 1. Energija veze po nukleonu

Izvor: [www.merdzan.org](http://www.merdzan.org)

Praćenjem toka krivulje, možemo uočiti nagli porast energije veze kod lakih jezgara, postizanje maksimuma kod jezgara sa masenim brojem  $A$  od približno 60, a zatim lagani pad prema teškim jezgrama. Maksimalna vrijednost energije veze po nukleonu je približno 8.8 MeV, da bi kod urana ( $A=238$ ) pala na približno 7.6 MeV.

Energiju je moguće dobiti samo putem onih nuklearnih reakcija iz kojih rezultiraju stabilnije jezgre, tj. jezgre koje imaju veće energije veze po nukleonu od jezgara koje stupaju u nuklearne reakcije.

U praksi se koriste dva tipa nuklearnih reakcija:

- Nuklearne reakcije cijepanje teških jezgara (fisija)
- Nuklearne reakcije spajanja lakših jezgara (fuzija).

Nuklearna reakcija je proces kod kojeg dolazi do vanjskog utjecaja na nuklearnu jezgru koji izaziva njezinu promjenu. To može biti interakcija dva nuklida, nuklida i nukleona ili nuklida i gama-zrake. U nuklearnim reakcijama može nastati nekoliko novih materijalnih čestica ili gama-zraka. Kod pisanja jednadžbe za bilo koju nuklearnu reakciju treba poštivati pravilo da broj nukleona  $A$ , zbroj elementarnih naboja  $Z$ , ukupna energija i moment gibanja čestica koje ulaze u nuklearnu reakciju moraju biti sačuvani. Izmijenjena energija sa okolinom  $Q$  se određuje na osnovi defekta masa koji nastaje u nuklearnoj reakciji, odnosno iz razlika energije veze nuklida prije i poslije nuklearne reakcije. Proračun defekta masa je potrebno zasnovati na masama neutralnih atoma, tj. na masama nuklida zajedno sa elektronskim plaštom. Nuklearne reakcije kod kojih je  $Q$  pozitivan zovu se egzotermne nuklearne reakcije (može se dobiti energija iz nuklearne reakcije), a kada je  $Q$  negativan zovu se endotermne nuklearne reakcije (troši se energija).

Većina je nuklearnih reakcija izazvana bombardiranjem atomskih jezgara elementarnim česticama ili drugim lakim jezgrama. Iz nuklearnih reakcija većinom proizlaze transformirana atomska jezgra te iste ili druge elementarne čestice. Skraćeni oblik obilježavanja nuklearnih reakcija:  $A(a, b) B$ .  $A$  je jezgra prije nuklearne reakcije,  $a$  je čestica koja je izazvala nuklearnu reakciju,  $B$  je jezgra koja je nastala u nuklearnoj reakciji i  $b$  je elementarna čestica koja je nastala u nuklearnoj reakciji. Kod analize pojedinih nuklearnih reakcija pribjegava se pojmu tzv. složene jezgre. Pri tome se nuklearna reakcija razmatra u dvije faze:

- U prvoj se fazi formira složena jezgra iz početnog jezgra i upadne čestice
- U drugoj fazi dolazi do raspada složene jezgre na rezultirajuću jezgru i izlaznu česticu.



## Nuklearne reakcije s neutronima

- Elastični sudar
- Neelastični sudar
- Uхват neutrona
- Fisija

### 2.6. Nuklearni udarni presjek

Prilikom izvođenja konkretnih proračuna u nuklearnoj fizici i nuklearnoj energetici potrebno je raspolagati s pokazateljima koji kvantificiraju mogućnost nastanka pojedinih nuklearnih reakcija. Budući da su nuklearne reakcije pojave u mikrosvijetu, svaka se kvantifikacija tih pojava mora zasnivati na principima vjerojatnosti i zakonu velikih brojeva. Parametar koji kvantificira učestalost pojave pojedinih nuklearnih reakcija se u nuklearnoj fizici naziva udarni presjek za dotičnu nuklearnu reakciju. Od interesa za nuklearnu energetiku su udarni presjeci za nuklearne reakcije sa neutronima.

U nuklearnoj se fizici veličina sigma naziva mikroskopski udarni presjek za određenu nuklearnu reakciju. Udarni presjek ovisi o vrsti jezgre, tipu nuklearne reakcije i energiji neutrona koji je izaziva. Produkt  $N\sigma$  se obilježava simbolom  $\Sigma$  i ima značenje zbroja udarnih presjeka svih jezgara u  $m^3$  materijala. Ta je veličina poznata kao makroskopski udarni presjek. Broj nuklearnih reakcija koje izazivaju neutroni u materijalu po  $m^3$  i sekundi je određen izrazom  $n\nu\Sigma$ . Jedinica za mikroskopskih udarni presjek sim je  $m^2$ , a za makroskopski udarni presjek  $\Sigma$  je  $m^{-1}(=m^2/m^3)$ . Udarne presjeke ne treba shvaćati kao geometrijske veličine, to su u stvari pokazatelji vjerojatnosti da će doći do određene nuklearne reakcije.

Udarni presjeci za nuklearne reakcije atomskih jezgara sa neutronima ovise o energiji neutrona. Od interesa su udarni presjeci za nuklearne reakcije s neutronima onih energija koje su prisutne u nuklearnom reaktoru. Neutroni u nuklearnom reaktoru potječu iz fisija jezgara urana i plutonija, a njihove se energije mijenjaju u širokom opsegu.

### 3. PRODIRANJE ZRAČENJA KROZ MATERIJALE

Poznavanje međudjelovanja nuklearnog zračenja i materijala je potrebno prilikom projektiranja, gradnje i pogona naprava i postrojenja u nuklearnoj tehnici i energetici. Od posebnog interesa su aspekti prodiranja zračenja kroz materijale koji su povezani s utjecajem zračenja na žive organizma, radijacijskim oštećenjem materijala od značaja za nuklearnu energetiku te proračunom bioloških štitova. Nuklearna zračenja koja se javljaju u nuklearnom reaktoru sastoje se iz neutrona te alfa, beta i gama zraka. Neutroni nastaju u fisijama izotopa urana i plutonija, alfa zrake kod radioaktivnog raspada teških izotopa materijala nuklearnog goriva, beta i gama zrake pretežno kao posljedica raspada fisijski produkta. Dio gama zraka potječe direktno iz fisija i nuklearnih reakcija zarobljavanja neutrona. Kao posebnu vrstu nuklearnog zračenja treba navesti i fisijske fragmente u nuklearnim reaktorima, makar je njihov utjecaj najčešće ograničen na najužu okolinu mjesta fisije. Sva ta zračenja izazivaju probleme, s jedne strane zbog potrebe osiguranja biološke zaštite, a s druge strane zbog djelovanja na strukturu materijala u nuklearnom postrojenju.

Nuklearna zračenja izazivaju fizikalne, kemijske i biološke promjene u materijalu kroz koji prolaze. Kemijske se promjene sastoje u efektu razbijanja kemijskih veza u molekulama pod djelovanjem zračenja. Primjer je pojava disocijacije vode u radijacijskom polju. Fizikalni utjecaj zračenja na materiju može se promatrati kroz dvije karakteristične dominantna pojave:

- Izbacivanje elektrona iz elektronskog plašta – ova je pojava poznata kao ionizacija, pa se i zračenje koje je izaziva zove ionizirajuće zračenje.
- Promjena položaja atoma čvrstih tijela u kristalnim rešetkama (uzrokuju iskrivljenja tih rešetki sa rezultatom koji je sličan onom kod kaljenja metala), kao posljedica sudara jezgara atoma sa česticama koje čine nuklearno zračenje.

Biološki efekti nuklearnog zračenja se odražavaju u djelovanju zračenja na žive organizme. Nuklearno zračenje dovodi do kemijskih promjena unutar živih stanica, organa ili cijeloga tijela, a može uzrokovati i njihovo uništavanje. Velikim dijelom biološki efekti zračenja ovise o primljenoj apsorbiranoj dozi, tj. količini zračenja koja je apsorbirana u jedinici mase tijela. Jedinica za apsorbiranu dozu je grej (oznaka Gy).

### 3.1. Ionizirajuća zračenja

Ionizirajućim zračenjem smatra se svako zračenje koje je sposobno u interakciji s materijalom ionizirati atome materijala, odnosno izbaciti jedan ili više elektrona iz elektronskog omotača neutralnog iona, čime on postaje ion. Brze nabijene čestice prolazom kroz materijal izbacuju elektrone iz elektronskih plašteva i time dovode do stvaranja pozitivno nabijenih atoma. Sustav pozitivni atom i stvoreni slobodni elektron čine ionski par. Intenzitet ionizacije se može mjeriti tzv. specifičnom ionizacijom, koju određuje broj nastalih ionskih parova po jedinici dužine puta čestice u materijalu. Specifična ionizacija ovisi o masi, brzini i naboju čestice, kao i o gustoći elektrona u materijalu. Proizvodnja ionskih parova troši energiju čestice. Energija varira unutar širokog raspona, od nekoliko elektronvolta za najslabije vezane elektrone do preko stotinu keV-a, za najjače vezane elektrone u najtežim atomima poput urana. Nabijena čestica u zraku gubi prosječno oko 32.5eV po svakom proizvedenom ionskom paru. Mehanizmi ionizacije razlikuju se prema česticama, odnosno zračenju, koje ju uzrokuju. Razlikujemo ionizaciju uzrokovanu teškim nabijenim česticama, lakim nabijenim česticama i elektromagnetskim zračenjem. Posebno mjesto u grupi ionizirajuće zračenja zauzimaju neutroni. Mehanizam kojim oni ionizirajuće je indirektan. Svako nuklearno zračenje uzrokuje ionizaciju, bilo na direktan bilo na indirektan način.

### 3.2. Alfa čestice

Alfa čestica je jezgra atoma helija složena od dva protona i dva neutrona. Zato je njezina masa približno četiri puta veća od mase protona, električni naboj je pozitivan, a po iznosu jednak naboju dva elektrona. Izbacivanjem brzih alfa čestica pri radioaktivnom raspadu atomske jezgre nekih kemijskih elemenata prelaze u atome kojima je atomski broj umanjnjen za 2, a maseni broj za 4. Roj brzih alfa čestica čini alfa zračenje. Alfa čestica se od jezgre helija razlikuje samo svojom velikom brzinom gibanja. Najčešća kinetička energija alfa čestice je 5 MeV, odnosno brzina 15000 km/s. Svi teški nuklidi koji s padaju u nuklearna goriva su radioaktivni i emitiraju alfa čestice. Domet alfa čestice ovisi o njezinoj energiji, atomskoj težini i gustoći elektrona u materijalu. Empirički izraz za prosječni domet te čestice u zraku sobne temperature ima oblik:  $R_z = 0.032E^{1.5}m$ , gdje je E energija alfa čestice u MeV. Domet alfa čestice u zraku je nekoliko centimetara. Taj je domet kroz tkivo oko tisuću puta kraći, dakle nekoliko stotinki milimetra. Vanjsko alfa zračenje nije opasno jer ga zaustavlja već vanjski sloj kožnog tkiva. Opasnost od alfa čestica je vrlo velika ako dođe do inhalacije ili gutanja materijala koji emitiraju te čestice, jer to može izazvati lokalna oštećenja unutarnjeg tkiva zbog

velike lokalne ionizacije. Najviša se specifična ionizacija postiže kada alfa čestica dopre oko 0.4cm od kraja svoje putanje, na tom mjestu energija čestice iznosi oko 0.75MeV. Pri kraju putanje alfa čestica zarobljavanjem elektrona prelazi u neutralni atom  $^4\text{He}$ .

### 3.3. Beta čestice

Beta čestica je brzi elektron emitiran u beta-minus radioaktivnom raspadu ili brzi pozitron emitiran u beta-plus radioaktivnom raspadu. Njezina je masa jednaka masi elektrona, električni naboj može biti pozitivan ili negativan. Izbacivanjem beta čestica iz atomske jezgre maseni broj atoma ne mijenja se, a atomski broj promijeni se za jedan. U beta-minus raspadu atomski broj poveća se za jedan, a u beta-plus raspadu atomski broj smanji se za jedan. Roj brzih beta čestica čini beta zračenje.

### 3.4. Gama čestice

Gama čestice su elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza atomskih jezgri s pobuđenih stanja, u procesu kočnoga zračenja brzih elektrona prilikom sudara s atomskim jezgrama i u procesima pretvorbi subatomske čestice. Gama zrake su snopovi fotona. Foton je kvant energije, odnosno „energetski paket“, bez mase mirovanja. Frekvencija i valna dužina gama zrake u funkciji energije su određene Planck-ovim zakonom:  $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$ , gdje je  $h$ -Planck-ova konstanta ( $6.6 \times 10^{-34}$  Js),  $c$ -brzina svjetlosti i  $\lambda$ -valna dužina gama zrake. Interakcija gama zraka s materijom se odvija putem tri nuklearne reakcije:

- Fotoelektrični efekt
- Comptonovo raspršenje
- Stvaranje parova.

Svaki od tih procesa karakterizira posebna vrijednost mikroskopskog udarnog presjeka  $\sigma$ , pa se ukupni udarni presjek za interakciju gama zraka sa materijom dobiva kao zbir tih udarnih presjeka.

Prodornost gama zraka kroz materijale je neusporedivo veća od prodornosti beta i alfa čestica. Zbog toga se štitovi za zaštitu okoline od zračenja nuklearnih postrojenja (najčešće se izrađuju od betona ili olova) projektiraju za zaštitu od gama zraka.

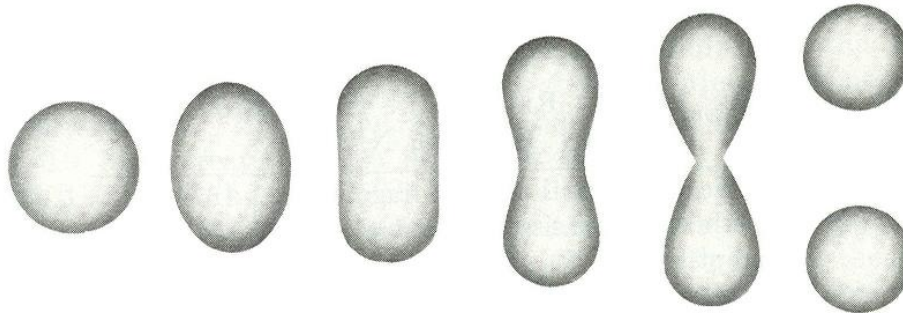
## 4. FISIJA

U lipnju 1919. godine, Ernest Rutherford je izazvao prvu umjetnu nuklearnu reakciju, odnosno cijepanje atoma. Bio je u mogućnosti pokazati da prilikom udara alfa čestica velikom brzinom o jezgru nekog atoma nastaju novi atomi. Rutherford je istraživanjem dokazao da bombardiranjem dušika alfa česticama nastaje nova čestica, velikih brzina i dometa, atom vodika. Bila je to prva umjetna nuklearna reakcija u povijesti i ustanovljeno je da je atom vodika sastavni dio jezgre složenog atoma i nazvao ih protonima. Harold Urey 1931. godine otkriva deuterij, izotop vodika koji sadrži jedan proton i neutron. Samo godinu kasnije, James Chadwick je otkrio neutron. Njegovim otkrićem je dobiven djelotvoran projektil za izazivanje nuklearnih reakcija. Ta čestica nema električkog naboja i zbog toga lako penetrira u atomsku jezgru. Na čelu sa Enricom Fermijem, grupa talijanskih fizičara počela je 1934. godine istraživački program na dobivanju umjetnih radioizotopa putem bombardiranja neaktivnih elemenata s neutronima. Taj je program obuhvaćao i istraživanje tzv. transuranskih elemenata (elemenata težih od urana kojih nema u prirodi) koji su dobiveni izlaganjem uzoraka urana snopu neutrona. 1938. godine objavljen je rad Irene Joliot Curie u kojem se tvrdilo da ozračeni uzorci urana sadrže pored ostalih i mnogo lakše elemente, srodne lantanu i bariju. To se moglo tumačiti jedino cijepanjem (fisijom) atoma urana. Nalaz je 1939. godine potvrđen od njemačkih istraživača Hahna i Strassmana, a nakon toga i od niza drugih radiokemijskih laboratorija. Na temelju saznanja o realnosti fisije atoma urana, a koristeći model atomske jezgre u vidu kapljice tekućine, koji je postavio 1936. godine Niels Bohr, njemački fizičari Otto Frisch i Lisa Meitner su u veljači 1939. godine publicirali teoriju fisije atoma urana čije su najbitnije postavke da se u tom procesu ne oslobađa samo energija, već i dodatni neutroni koji omogućuju ostvarenje tzv. lančane reakcije.

### 4.1. Mehanizam fisije

Jezgra atoma urana kada apsorbira neutron stvara tzv. složenu jezgru, koja se može, ali ne mora raspasti. Složena je jezgra u pobuđenom stanju jer neutron ulaskom u jezgru oslobađa svoju energiju veze. Mehanizam fisije se može tumačiti modelom jezgre u vidu kapljice tekućine. Energija unesena u jezgru oslobađanjem energije veze nukleona unosi poremećaj u ravnotežu sila koje djeluju unutar jezgre što dovodi do oscilacija i deformacije jezgre. U jezgri djeluje sila površinske napetosti (tj. nuklearna sila između površinskih nukleona) koja nastoji jezgri dati kružni oblik i elektrostatička odbojna sila između protona u jezgri. Ukoliko je površinska sila dovoljno jaka, jezgra se vraća u kružni oblik i izbacuje suvišnu energiju u vidu gama-

kvanta. S druge strane, kod teških jezgara sa velikim brojem protona i jakim odbojnim silama, deformacija jezgre može dovesti do polarizacije naboja i razbijanja jezgre na dva dijela, tj. do fisije atoma.



Slika 2. Model atomske jezgre u obliku kapljice tekućine

Izvor: [www.accessscience.com](http://www.accessscience.com)

Uvjete za nastanak fisije možemo kvantificirati uvidom u energetska stanja jezgre. Fisijski produkti, kao pozitivno nabijeni nuklidi, moraju savladati energiju aktivacije  $E_a$  prije nego se razdvoje. Tek se tada oslobađa energija fisije  $E_f$ . Uvjeti za fisiju nastaju kada je oslobođena energija veze zahvaćenom neutrona veća od energije aktivacije. Približna se vrijednost energije veze koja se zahvatom neutrona oslobađa u jezgri može odrediti iz izraza koji se zasniva na modelu atomske jezgre u obliku kapljice tekućine, kao razlika ukupne energije veze nastale složene jezgre i energije veze jezgre prije zahvata neutrona.

Energija dobivena fisijom  $^{235}\text{U}$  iznosi oko 200 MeV. Energija koja nastaje u procesu fisije se raspoređuje na čestice koje nastaju u tom procesu. Iznos energije koja nastaje u fisiji je veći od energije koju možemo iskoristiti u nuklearnom reaktoru. Razlika nastaje zbog energije nastalih neutrina koji prate emisije  $\beta$ -čestica. Drugi dio razlike leži u energiji prodornih gama zraka koje nastaju u procesima zarobljavanja neutrona u materijalu. Ta se energija dijelom oslobađa u biološkom štitu reaktora.

#### 4.2. Karakteristike fisije i fisijski produkti

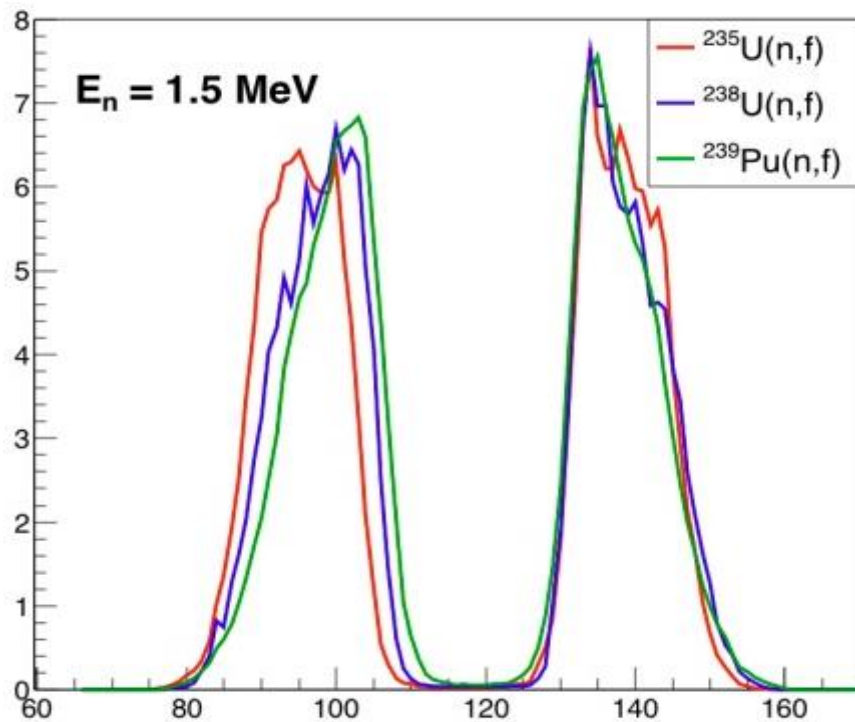
Fisija atoma nekih izotopa urana i plutonija je najvažnija nuklearna reakcija za praktično korištenje nuklearne energije. Važnost fisije za nuklearnu energetiku zasniva se na dvije činjenice:

- U fisiji se oslobađa znatna količina energije jer fisijski produkti imaju veću energiju veze od jezgre koja se cijepa. Kod nuklida  $^{235}\text{U}$  oslobođena energija iznosi približno 200MeV po fisiji.
- Fisiju prati emisija neutrona koji mogu inicirati nove fisije. Ovim je omogućena tzv. „lančana reakcija“, odnosno nuklearni proces koji se sam podržava.

Uvjeti za nastanak fisije nisu u svim izotopima urana i plutonija jednaki. Osnovna je razlika u potrebnoj energiji neutrona za izazivanje fisije. Energija aktivacije je manja od oslobođene energije veze kada dođe do zahvata neutrona sa strane izotopa  $^{235}\text{U}$ . Obratna situacija nastaje kada se neutron apsorbira u izotopu  $^{238}\text{U}$ . Oslobođena energija veze je nedovoljna za izazivanje fisije nuklida  $^{238}\text{U}$ , jer je energija aktivacije od nje veća za oko 1.7 MeV. Ovo praktički znači da je nuklid  $^{235}\text{U}$  podložan fisiji sa neutronima bez kinetičke energije, dok je za fisiju nuklida  $^{238}\text{U}$  potreban neutron sa kinetičkom energijom koja odgovara razlici između energije aktivacije i oslobođene energije veze.

Jedna od najvažnijih značajki fisijskih produkta je njihova radioaktivnost. Radioaktivnost fisijskih produkta objašnjenja je viškom neutrona u jezgrama atoma fisijskih fragmenata u odnosu na područje stabilnih jezgara. Višak neutrona pokazuje na zaključak da fisijski produkti moraju biti beta i gama aktivni. Emisijom elektrona iz jezgre neutron se pretvara u proton, a emisijom se gama kvantna jezgra rješava viška unutarnje energije. U rijetkim slučajevima visoko nestabilni fisijski fragmenti mogu direktno emitirati i neutrone. Riječ je o zakašnjelim neutronima koji su od bitnog značenja za rad nuklearnih reaktora.

Neposredno nakon prestanka lančane reakcije, oko 6% snage se i dalje generira u fisijskim produktima, a nakon toga se u njima proizvedena snaga mijenja s vremenom suglasno s relacijom kojom je dana količina energije koju svojim radioaktivnim raspadima proizvode fisijski produkti nastali fisijom jednog kilograma  $^{235}\text{U}$ . Ta činjenica je od velike važnosti za reaktorsku tehniku, jer pokazuje na potrebu da se i nakon obustave lančane reakcije i dalje mora hladiti reaktorska jezgra.



Slika 3. Zastupljenost fisijskih fragmenata  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{239}\text{Pu}$  u ovisnosti o masenom broju

Izvor: [www.accessscience.com](http://www.accessscience.com)

### 4.3. Fisijski neutroni

Pod pojmom fisijski neutroni podrazumijevamo neutrone koji su nastali kao posljedica fisije atomske jezgre. Proces fisije prati emisija neutrona, jer u toj nuklearnoj reakciji nastaju jezgre sa velikim brojem neutrona u odnosu na područje stabilnosti nuklida. Uobičajeno je broj neutrona dobivenih u fisiji obilježavati sa  $\nu$ . Taj je parametar u priličnoj mjeri ovisan o energiji neutrona koji izaziva fisiju.

- Promptni neutroni

Promptni neutroni nastaju neposredno u procesu fisije ili u vrlo kratkom vremenu nakon fisije. Najveći broj fisijskih neutrona su promptni neutroni (preko 99%).

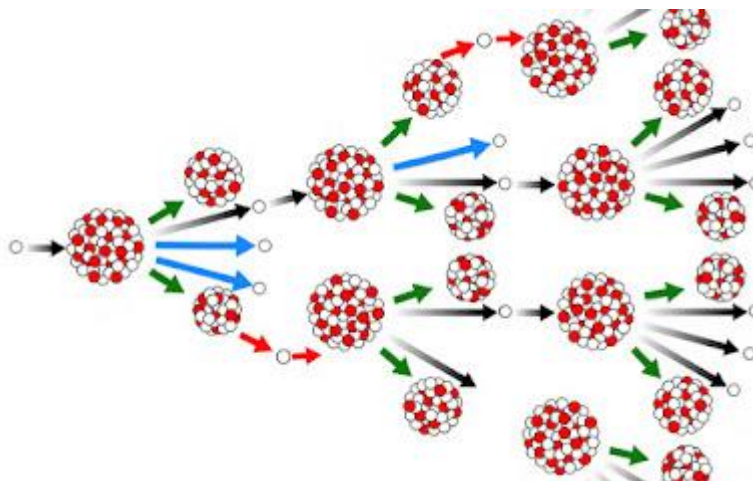
- Zakašnjeli neutroni

Zakašnjeli neutroni nastaju u nuklearnim reakcijama raspada nekih fisijskih fragmenata. Ti neutroni budu emitirani sa znatnim kašnjenjem u odnosu na promptne neutrone. S obzirom da zakašnjeli neutroni potječu od raznovrsnih fisijskih fragmenata za očekivati je da će njihova vremena kašnjenja biti raznovrsna.



## 5. LANČANA REAKCIJA

Proces fisije atoma urana i plutonija je praćen emisijom neutrona, iz toga proizlazi mogućnost da se ti neutroni iskoriste za izazivanje daljnjih fisija i time proces nastavi bez unošenja dodatnih neutrona u nuklearno gorivo. Taj proces je poznat kao lančana reakcija.



Slika 4. Lančana reakcija

Izvor: [www.researchgatesite.blogspot.com](http://www.researchgatesite.blogspot.com)

Svi neutroni koji nastaju u fisijama nisu raspoloživi za nastavak lančane reakcije, jer se jedan dio gubi zbog bijega iz sustava, a drugi zbog apsorpcija u materijalima koje ne rezultiraju fisijom. Upravo je analiza mogućnosti reprodukcije fisijskih neutrona, tj. analiza mogućnosti ostvarenja samoodržavajuće lančane reakcije unutar određenog sustava, jedan od osnovnih elemenata teorije nuklearnog reaktora. Uvjeti za samoodržavajuću lančanu reakciju su ispunjeni ako se početni broj neutrona sadržan u sustavu ne smanjuje, tj. ako je sustav sposoban generiranjem novih neutrona nadoknaditi gubitak neutrona.

Zbog razumijevanja osnovnih principa rada nuklearnih reaktora, veoma je bitno razmotriti mogućnost ostvarenja samoodržavajuće lančane reakcije u prirodnom uranu. Prirodni uran je jedini fisijski materijal raspoloživ u prirodi. Među nuklearnim reakcijama za potrebu analize mogućnosti ostvarenja samoodržavajuće lančane reakcije u neograničenom bloku čistog prirodnog urana najvažnije su: fisija  $^{238}\text{U}$ , fisija  $^{235}\text{U}$  i neelastični sudar.

U neograničenom bloku od čistog prirodnog urana ne može se ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija, a razlog tome je u visokom odnosu makroskopskih udarnih presjeka za neelastični sudar i fisiju prirodnog urana u području energija višim od praga fisije  $^{238}\text{U}$  i u vrlo velikom udarom presjek za zahvat neutrona izotopa  $^{238}\text{U}$  u području rezonantnih energija.

Presudan utjecaj ovog faktora dolazi do izražaja zbog malenog udjela izotopa  $^{235}\text{U}$  u prirodnom uranu. Ako promatramo fisije izazvane samo termičkim neutronima, dolazimo do zaključka da se u bloku prirodnog urana može ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija uz uvjet da se fisijski neutroni uz malo gubitaka uspore do energije termičkih neutrona.

Samoodržavajuća lančana reakcija u uranu može se ostvariti ako je ispunjen jedan od dva uvjeta:

- Postojanje načina za efikasno usporavanje fisijskih neutrona do termičkih energija, ako koristimo prirodni ili malo obogaćeni uran kao fisijski materijal. Efikasnim usporavanjem neutrona možemo stvoriti slične uvjete kao da fisijski neutroni imaju energije termičkih neutrona.
- Upotreba urana sa visokim sadržajem izotopa  $^{235}\text{U}$  (visoko obogaćeni uran). Kod takvog je nuklearnog goriva povećana vjerojatnost zahvata neutrona u izotopu  $^{235}\text{U}$ , čime se djelomično nadoknađuje nepovoljni učinak apsorpcije usporavajućih neutrona epi-termičkih energija u težem izotopu urana.

Prvi uvjet je ostvaren u termičkim, a drugi u brzim nuklearnim reaktorima.

Proces usporavanja fisijskih neutrona do termičkih energija zove se moderacija, a materijal čija je namjena usporavanje neutrona moderator. Moderacija se vrši putem elastičnih sudara neutrona sa jezgrama atoma moderatora, koji je u jezgri reaktora prisutan zajedno s nuklearnim gorivom. Efikasna je moderacija neutrona moguća uz uvjet da materijal moderatora posjeduje određena svojstva u pogledu atomske mase i udarnih presjeka. Samoodržavajuća lančana reakcija u termičkim reaktorima (reaktorima sa prirodnim ili slabo obogaćenim uranom) nije moguća bez moderatora. Naprotiv, kod brzih reaktora (kod kojih je uran visoko obogaćen) za takvu reakciju moderator nije potreban.

## 6. NUKLEARNI REAKTOR

Nuklearni reaktori su postrojenja u kojima se odvijaju nuklearne reakcije fisije izotopa urana, plutonija ili torija. Prema energiji neutrona koji izazivaju pretežan broj fisija, nuklearni reaktori se dijele na termičke reaktore i brze reaktore. Osnovne komponente svakog nuklearnog reaktora su nuklearno gorivo, moderator (ako se radi o termičkom reaktoru) i rashladno sredstvo (čija je funkcija posebno važna kod energetskih reaktora). Kod reaktora koji su moderirani s običnom vodom u pravilu moderator vrši i funkciju rashladnog sredstva. Kao rezultat fisija dobivena se toplinska energija smatra osnovnim korisnim proizvodom u energetskim reaktorima. Kod istraživačkih reaktora ta toplinska energija je u većini slučajeva samo štetan nusprodukt. Energetski reaktori su temeljna komponenta nuklearnih elektrana. Oni su izvor toplinske energije koja se u nuklearnoj elektrani na konvencionalan način pretvara u električnu energiju. Istraživački reaktori su jaki izvor neutrona, zbog čega su prigodni za niz istraživačkih aktivnosti vezanih za ispitivanje nuklearnih reakcija sa neutronima i njihovih udarnih presjeka, promjene fizikalnih svojstava materijala u neutronsom polju, radijacijska oštećenja organskih i neorganskih materijala, proizvodnju radioaktivnih izotopa. Osim za istraživanja i proizvodnju energije, nuklearni reaktori se u nekim zemljama koriste i za dobivanje aktivnog fisibilnog materijala plutonija.

Na funkcioniranje reaktora ima utjecaj i prostorni raspored nuklearnog goriva i moderatora u jezgri reaktora. Reaktor kod kojega je nuklearno gorivo jednoliko raspršeno u moderatoru (disperzija sitnih čestica urana u grafitu, otopina soli urana u vodi) zove se homogeni reaktor. Reaktor kod kojega je nuklearno gorivo sadržano u šipkama koje su uronjene u moderator zove se heterogeni reaktor. Skoro svi današnji reaktori su heterogeni.

Zadatak fizikalne teorije nuklearnog reaktora je ispitati uvjete pod kojima se u određenoj kombinaciji nuklearnog goriva i moderatora te geometrijskim oblicima i veličini reaktorske jezgre može ostvariti samoodržavajuća lančana reakcija, odnosno uvjeti pod kojima jedan reaktor može biti kritičan. Bilanca neutrona pokazuje na to da se kritičnost reaktora postiže kada je proizvodnja neutrona u procesima fisije dovoljna za nadoknadu izgubljenih neutrona zbog njihove apsorpcije ili bijega u okolinu.

Bilanciranje neutrona se može izvesti na dva načina:

1. Fizikalnom analizom nuklearnih reakcija neutrona u toku njegovog postojanja u reaktoru (od nastanka neutrona u fisiji do trenutka izazivanja nove fisije).

2. Neposrednim numeričkim rješenjem jednadžbi bilance neutrona u više energetskih grupa.

### 6.1. Uvjeti kritičnosti homogenih i heterogenih reaktora

Budući da je uvjet za održavanje samoodržavajuće lančane reakcije u reaktoru, odnosno uvjet kritičnosti reaktora, ekvivalentan uvjetu da se broj neutrona u sistemu ne smanjuje, kod kritičnog reaktora mora biti  $k_{ef} \geq 1$ .

U svakom je reaktoru  $k_{\infty} > k_{ef}$ , jer su faktori bijega neutrona manji od jedinice.

Kod homogenih reaktora se razmatraju uvjeti kritičnosti homogene mješavine nuklearnog goriva i moderatora, zbog koristi analize pokazatelja o kojima ovisi kritičnost reaktora. Takvi reaktori se iz praktičnih razloga više ne izvode. Pokazatelj moguće kritičnosti je faktor  $k_{\infty}$ , koji za kritičan reaktor mora biti veći od jedinice.

Heterogeni reaktori sadrže nuklearno gorivo prostorno odvojeno od moderatora. Najčešće se gorivo sastoji od šipki koje su uronjene u moderator u geometrijski pravilnom rasporedu. Kako bi pojednostavili razmatranje, smatrat ćemo da je geometrijski raspored gorivih šipki nepromjenjiv u prostoru tako da možemo izdvojiti tzv. jediničnu ćeliju koja se sastoji iz gorivne šipke i pripadajućeg moderatora. Ta je ćelija po svim karakteristikama identična svim ostalim ćelijama u reaktoru.

Nuklearno gorivo i moderator su materijali koji se po nuklearnim reakcijama sa neutronima bitno razlikuju. Moderator je materijal koji učinkovito usporava neutrone i koji ima maleni udarni presjek za apsorpciju neutrona. Materijal nuklearnog goriva ima suprotna svojstva od moderatora. Vrlo je neefikasan za usporavanje neutrona, a ima bitno veće apsorpcijske presjeke za neutrone, posebno za one rezonantnih i termičkih energija. Na temelju činjenice da je broj nuklearnih reakcija proporcionalan s tokom neutrona možemo zaključiti da će zbog manjeg neutronskega toka unutar gorive šipke i broj nuklearnih reakcija za apsorpciju termičkih i rezonantnih neutrona u nuklearnom gorivu biti manji nego što bi to bio da je tok neutrona bio isti kao u moderatoru. Opisana pojava je inače poznata kao „efekt zasjenjenja“ (vanjski slojevi gorive šipke zasjenjuju unutarnje slojeve od utjecaja neutronskega toka).

Analiza mogućnosti da se u izvjesnom sastavu nuklearnog goriva i moderatora ostvari kritična masa se svodi na ispitivanje da li je u reaktoru  $k_{\infty}$  jednak ili veći od jedinice. Ako je  $k_{\infty} > 1$ , ostvaren je nužan uvjet da se iz danog materijala može izgraditi reaktor konačnih

dimenzija. Kritičnost reaktora konačnih dimenzija se iskazuje kroz uvjet da je  $k_{ef}$  jednak jedinici. Što je  $k_{\infty}$  bliži jedinici možemo dozvoliti manji bijeg neutrona iz reaktora, tj. moramo izgraditi veći reaktor.

## 6.2. Reaktor s reflektorom

Materijal koji vrši funkciju vraćanja neutrona u jezgru zove se reflektor. Jezgra reaktora se oblaže slojem materijala koji, najčešće nuklearnim reakcijama elastičnog sudara, vraća dio neutrona u jezgru. Vraćanjem dijela odbjeglih neutrona u reaktorsku jezgru se smanjuju dimenzije reaktora i količina fisijskog materijala. Dobar reflektor mora imati svojstvo male apsorpcije i efikasno usporavanja neutrona. Takva svojstva se traže i od dobrog moderatora. Upravo materijali koji su dobri moderator biti će i dobri reflektori. Reflektori u znatnoj mjeri utječu na raspodjelu neutronske toka u jezgri.

Reflektor utječe na povišenje neutronske toka na vanjskoj plohi reaktora, a time i na povišenje prosječnog neutronske toka u jezgri. Reflektor ne utječe samo na smanjenje volumena kritičnog reaktora nego, zbog ravnomjernije raspodjele neutronske toka, i na bolje prosječno iskorištenje fisijskog materijala u jezgri. Za razumijevanje kvantitativne procjene utjecaja reflektora na kritične dimenzije reaktora koristiti ću pojednostavljenu metodu koja je korisna za fizikalno razumijevanje problema. Sastoji se u primjeni jedno grupnog postupka za ocjenu utjecaja debljine reflektora na dimenzije jezgre. Analiza će se provesti za reaktor u obliku neograničene ploče debljine  $H$  koja je sa obje strane obložena sa reflektorom debljine  $T$ . Postupak se svodi na rješenje jednadžbi bilanca neutrona u reaktoru i reflektoru uz poštivanje odgovarajućih graničnih uvjeta. Pri tome treba uzeti u obzir da u reflektoru nema izvora neutrona.

## **7. REMONT NUKLEARNOG REAKTORA I OSOBNA ZAŠTITNA SREDSTVA I OPREMA**

Remont je redovno zaustavljanje elektrane svakih 18 mjeseci, kada se izvedu:

- Opsežno održavanje opreme
- Modernizacije elektrane
- Ispitivanja sigurnosnih sustava
- Obnova energijskog potencijala zamjenom gorivih elemenata koji čine reaktorsku jezgru

Tijekom remonta svi se gorivni elementi premjeste u bazen za istrošeno gorivo, u kojem se dodatno pregledaju i cjelovito procjeni njihova primjerenost za ponovno ulaganje u reaktorsku jezgru. Unatoč tome da tijekom remonta elektrana nije u pogonu, zbog fizikalnih svojstava nuklearnog goriva potrebno je održavati njegovo hlađenje i osiguravati odvod ostatne topline sustavnim rješenjima, koja nazivamo sigurnost tijekom zaustave, a temelj su remontnog plana aktivnosti. Remont je najvažniji i najzahtjevniji projekt nuklearne elektrane koji traje prosječno 20 do 40 dana. Uspješnost tog kompleksnog procesa ovisi o stručnosti, odgovornosti i profesionalnosti svih osoba koje sudjeluju u procesu.

Remont nuklearnog reaktora traje 24 sata, u intervalima po 12 sati. Svakih 12 sati se mijenja 1 ekipa operatera. U svakoj ekipi je 7 ljudi. Šestero ljudi bude na tzv. Stand-byu, a jedan čovjek se spušta ispod parogeneratorskog bazena. Stand-by označava vremenski period u trajanju od 2 sata. Operater koji se spušta ispod parogeneratorskog bazena je zadužen za postavljanje manipulatora. Manipulator je alat kojim se pregledavaju U-cijevi. Sam manipulator je visok otprilike 1,70 cm. Operater se nalazi ispod U-cijevi i podiže manipulator iznad sebe prema tim cijevima i izgovara "fingers" čime iz manipulatora izlazi tzv.ruka na koju se postavljaju alati potrebni za popravak U-cijevi. Nakon toga je potrebno izreći "fussen", a ta radnja omogućuje manipulatoru da se fiksira tijekom popravka. Tzv. ruka koja se nalazi na manipulatoru ima nastavak na sebi koji podsjeća na lastavičji rep koji je po tome dobio ime. Na taj rep se stavljaju alati koji onda prema potrebi obavljaju aktivnosti kao što su varenje ili brušenje U-cijevi. Kako bi znali koje je U-cijevi potrebno popraviti ili zamijeniti, na ruku manipulatora se postavlja kamera koja snima u krug i pregledava cijevi. Neke cijevi se režu, a neke se vare. Da bi se došlo ispod parogeneratorskog bazena potrebno je proći kroz rupu širine otprilike 50\*60cm. Prilikom prolaska operatera kroz tu rupu potrebna mu je pomoć druga dva operatera koji ga pridržavaju. Nakon

prolaska operatera montiraju se zaštitna montažna vrata na tu rupu da bi se spriječilo širenje zračenja iznad parogeneratora. Samo postavljanje manipulatora traje 1 do 2 minute.

Od osobne zaštitne opreme operater koji obavlja postavljanje manipulatora na sebi ima zaštitni kombinezon. U prijašnjim remontima se koristio kombinezon na zrak. U njega se stavljala cijev koja je služila za dovod zraka, ali se zbog njegove nepraktičnosti izbacio iz uporabe. Dva kombinezона se odijevaju prilikom remonta. Na nogama radnik ima plastične čizme čiji se otvori lijepe zaštitnim trakama. Zbog velike temperature od 50 do 60°C koja se odvija ispod parogeneratora operater se pretjerano znoji što dovodi do nastanka 2 do 3 litre vode u čizmama. Na glavi se nosi zaštitna maska sa filterima sa svake strane. Na ruke se stavlja 3 do 4 para rukavica.

Operateri prilikom remonta kod sebe imaju penkala dozimetar za direktno očitavanje zračenja. Penkala dozimetar se stavlja na glavu zbog veće izloženosti zračenju. Dozimetar se nosi na prsima.



Slika 5. Penkala dozimetar

Izvor: [www.uranmaschine.de](http://www.uranmaschine.de)



Slika 6. Dozimetar

Izvor: [www.hr.m.wikipedia.org](http://www.hr.m.wikipedia.org)

Na završetku remonta operater kod izlaska iz postrojenja mora skinuti zaštitnu odjeću i opremu. Taj postupak se provodi tako sto oprater na svakoj izlaznoj rampi skine jedan dio zaštitne odjeće. Ruke se stave u stroj za mjerenje kontaminacije. Ako stroj pokaže da je operater ozračen, mora se oprati sa posebnim šamponom. Podovi se peru alkoholom.

Zadaće zaštite od zračenja u nuklearnim elektranama su zaštita ljudi od zračenja ili od izbjegavanja zračenja, nadzor izloženosti zaposlenika zračenju, mjerenja u radnom okruženju, mjerenja koncentracija radioaktivnosti u emisijama u zrak i vode te u okolini elektrane. Ozračivanje profesionalno izloženih zaposlenika ograničeno je propisima na godišnju dozu od 20 mSv. Ograničenje je postavljeno na osnovi vjerojatnosti pojave štetnih učinaka na zdravlje. Najviše doze kojima su izloženu radnici tijekom remonta iznose 6,68 mSv. To je tri puta niža doza od zakonom propisane granice.



## 8. DJELOVANJE ZRAČENJA

Prolaz najbitnijih vrsti zračenja kao što su alfa-čestice, beta-čestice, neutroni, gama-zrake promatran je s ciljem da se utvrde metode za procjenu prodornosti, odnosno dometa, zračenja u tim materijalima. Jedan od osnovnih faktora kod procjene utjecaja zračenja na materijale je domet zračenja, uključivši i tkiva živih organizama.

Djelovanje zračenja može biti djelovanje unutrašnjeg zračenja (inhalacijom, ingestijom ili prodiranjem radioaktivnih tvari kroz kožu ili rane) i djelovanje vanjskog zračenja (izlaganjem dijelova tijela utjecaju zračenja iz radioaktivnog izvora).

Prolazom zračenja kroz tvari dolazi do ionizacije i pobuđenih stanja atoma. Primljene doze radioaktivnog zračenja rezultiraju energijom oslobođenom u tkivu, uslijed interakcije nuklearnih čestica s materijalom tkiva. Oslobođena energija dovodi do ionizacije i stvaranja pozitivnih i negativnih radikala unutar tkiva. Radikali pak dovode do redukcija i oksidacija biomolekula.

Govoreći o posljedicama zračenja na stanice u ljudskom organizmu, kao opće pravilo treba uzeti da su na zračenje osjetljivija ona tkiva čije se stanice brzo dijele (spolne stanice, stanice krvotvornih organa, crijevnog epitela, dječjih kostiju).

Posljedice zračenja mogu biti somatske i genetske. Somatski su efekti vezani uz posljedice zračenja ozračene jedine, a genetski na utjecaj na potomstvo. Somatski efekti ovisni su o oštećenju stanica o kojima ovisi funkcioniranje organizma. To su prvenstveno krvne stanice, stanice koštane srži i stanice probavnog trakta. Neke od značajnijih posljedica zračenja su povraćanje sa trovanjem organizma, leukemija, anemije kao i opće smanjenje imunološke sposobnosti. Na veće doze zračenja vrlo su osjetljive i očne leće u kojima dolazi do zamućenja. Zračenje utječe na reproduktivnu funkciju stanica te dovodi do nekontroliranog umnažanja (tumori) ili degeneracije, odnosno smanjene sposobnosti stanice za diobu i rast. Zbog toga je fetus posebno osjetljiv na zračenje, jer u toj fazi umnažanje stanica je naročito intenzivno.

Najbitnije kategorije zračenja organizma, o kojima ovisi i dozvoljena doza zračenja su: lokalna ozračenja pojedinih dijelova tijela i ozračenje cijelog tijela. Razni dijelovi tijela različito su osjetljivi na zračenje pa je i propisana doza različita. U pogledu vremena ozračenja razlikujemo: akutna jednokratna ozračenja i dugotrajna izlaganja radioaktivnom zračenju. Biološko djelovanje zračenja ovisi i o vrsti zračenja (alfa-zrake, beta-čestice, gama-zrake, neutroni).

Učinci zračenja na žive stanice promatraju se statistički. Na primjer, ako određena količina zračenja dovodi do uništenja 50% ozračenih stanica, govorimo o 50-postotnoj letalnoj dozi (LD 50). Bitno je i vrijeme unutar kojega dolazi do efekta primljenog zračenja. Ako 50% stanica, odnosno ozračenih organizama ugiba unutar 30 dana nakon primljene doze zračenja govorimo o dozi LD 50/30.

## 8.1. Doze zračenja

U okvirima međunarodnih institucija usklađuju se mjere za zaštitu od zračenja, od kojih je najznačajnija Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP – International Commission on Radiological Protection), osnovana 1928.godine u Stockholmu. Međunarodne institucije daju preporuke za izradu nacionalnih propisa.

Osnovni pojmovi s kojima se susrećemo u analizi količina i učinaka zračenja jesu:

- Apsorbirana doza zračenja  
Zbog generacije ionskih parova, prolazeći kroz tkivo, zračenje oslobađa energiju. Stvaranje svakog ionskog para troši energiju (u zraku je ta energija 34eV po ionskom paru), pa se na osnovi poznate apsorpcije energije može izračunati broj stvorenih ionskih parova. Jedinice za apsorbiranu dozu bile su najprije definirane za ionizaciju zraka. Takva jedinica koja se još uvijek mnogo pojavljuje je rendgen (R), definirana kao doza elektromagnetskog zračenja (x ili gama zrake) koja u 1cm<sup>3</sup> suhog zraka proizvede ionske parove čija količina naboja jednog i drugog predznaka odgovara jednoj elektrostatskoj jedinici elektriciteta ( $3.33 \cdot 10^{-10}$  C).
- Ekspozicija  
Ekspozicija je definirana kao količina gama ili x zračenja koja u jednom kilogramu zraka proizvede jedan kulon naboja oba predznaka. Jedinica za ekspoziciju je C/kg. Pojam ekspozicije se mnogo koristi u praksi jer je to veličina koju možemo mjeriti plinskim brojačima. Oni mjere broj iona stvorenih zračenjem u poznatoj masi zraka.
- Za apsorbiranu dozu se koristi oznaka D, a za ekspoziciju oznaka X.
- Mjerna jedinica za apsorbiranu dozu zračenja je 1 grej(Gy)=1 J/kg
- Prije uvođenja SI sustava međunarodnih mjernih jedinica, jedinica za apsorbiranu dozu zračenja je bila rad. Pri tome vrijedi: 1Gy=100rad. Dakle, rad je 100 puta manja jedinica od Gy. Ista se jedinica može upotrebljavati i za mjerenje ekspozicije.

Osnovni učinak zračenja na tkivo manifestira se u izazvanoj ionizaciji. Učinak zračenja na živo tkivo ne ovisi samo o oslobođenoj energiji u tkivu, nego i načinu na koji je raspoređena ionizacija unutar tkiva. Velika lokalna koncentracija ionskih parova će proizvesti više štete, nego kada su oni ravnomjernije raspoređeni u tkivu. Faktor kvalitete zračenja Q je uveden kako bi se mogli kvantificirati efekti koji proizvode u tkivu elektromagnetsko zračenje i elektroni i efekti koje proizvode teške nabijene čestice ili brzi neutroni. Faktor Q je veći što je veća specifična ionizacija.

Tablica 1. Ovisnost faktora Q o vrsti zračenja

Vrsta zracenja	Q
Zrake x i y	1
Beta čestice	1
Termički neutroni	2.5
Alfa čestice	20
Brzi neutroni i protoni do energije 10 MeV	10
Teški nuklidi	20

Ako apsorbirano zračenje izraženo u Gy pomnožimo sa faktorom kvalitete Q dobivamo, ovisno o faktoru Q, jednaku ili uvećanu dozu zračenja. Ta doza zračenja daje mjeru za učinak apsorbirane doze zračenja na žive organizme i poznata je kao efektivna doza zračenja (H). Mjeri se posebnom jedinicom za koju je u SI sustavu jedinica usvojen naziv siver (Sv) po švedskom fizičaru Rolfu Sievertu.  $1\text{Sv}=1\text{Gy}\cdot\text{Q}$  (J/kg). Propisi o dozvoljenim dozama zračenja se vezuju isključivo za tu jedinicu jer je siver najvažnija jedinica za promatranje i kvantifikacija učinaka apsorbiranih doza zračenja na žive organizme. Stara jedinica za efektivnu dozu u organizmu je rem (Roetgen Equivalent Man), definirana kao:  $1\text{rem}=1\text{rad}\cdot\text{Q}$ .  $1\text{Sv}=100\text{rem}$ . Učinak doze zračenja ovisan je o vremenu u kojem je doza primljena. Zato se ekvivalentna doza zračenja  $H(t)$  u ovisnosti o vremenu ozračivanja  $t$  određuje kao: integralna doza i brzina doze.

## 8.2. Posljedice akutnih i kroničnih doza zračenja

Najbolje su poznate rane posljedice akutnih ozračenja pod kojima smatramo one koje je moguće detektirati do 60 dana nakon ozračenja.

Tablica 2. Rane posljedice ekvivalentnih akutnih doza zračenja

<b>0 do 0.5Sv</b>	Nisu primijećene posljedice
<b>0.5 do 1Sv</b>	Lagana promjena krvne slike
<b>1 do 2Sv</b>	Mučnina i povraćanje u 5 do 50% slučajeva nakon 3 sata Zamor i gubitak apetita Oporavak u svim slučajevima nakon nekoliko tjedana
<b>2 do 6Sv</b>	Povraćanje nastaje nakon 2 sata ili prije kod primljenih doza većih od 3Sv Ozbiljna promjena krvne slike Krvarenje i infekcije Kod doze iznad 3Sv gubitak kose Oporavak u 20 do 100% slučajeva nakon 1 do 12 mjeseci
<b>6 do 10Sv</b>	Značajna promjena krvne slike Povraćanje nakon 1 sata Značajna promjena krvne slike U roku od 2 mjeseca 80 do 100% umire, a za preživjele oporavak traje dugo

Tablica 3. Težinski faktori pri ozračivanju pojedinih dijelova tijela

<b>Tkivo</b>	<b>Težinski faktor</b>
spolni organi	0.25
dojke	0.15
koštana srž	0.12
pluća	0.12
štitna žlijezda	0.03
kosti	0.03
ostatak tijela	0.30
<b>Ukupno</b>	<b>1.00</b>

Kada govorimo o efektivnim dozama zračenja razlikujemo pojam pojedinačne doze koju je primio određeni pojedinac i kolektivne doze koja predstavlja integral svih pojedinačnih doza skupine ljudi. Jedinica za kolektivnu dozu je čovjek-sivert. S kolektivnom se dozom uvijek računa kada se radi o procjeni istovremeno primljene doze veće grupe ljudi, na primjer radnika koji su sudjelovali u remontu nuklearnog postrojenja ili stanovništva u okolini takvog postrojenja.

Dugoročne posljedice od primljenih velikih doza zračenja: povećana vjerojatnost pojave raka, očna oboljenja, sterilnost, genetske posljedice.

Posljedice velikih akutnih doza zračenja, reda jednog siverta ili više, mogu se sigurno utvrditi. Nasuprot tome, posljedice malih apsorbiranih doza daleko su ne izvjesnije. Kada govorimo o utjecaju zračenja na ljude razlikujemo stohastičke i nestohastičke efekte. Stohastički efekti su

oni kod kojih su posljedice proporcionalne primljenoj dozi, a ne postoji donji prag djelovanja doze. Kod nestohastičkih efekata posljedice su također proporcionalne primljenoj dozi, ali postoji donji prag ispod kojeg se posljedice ne primjećuju. Primjer za stohastičke efekte su genetske posljedice zračenja i pojava raznih vrsti raka, a za nestohastičke akutna lokalna ozračenja kod kojih se posljedice ne mogu ustanoviti ispod određene doze.

### **8.3. Izvori radioaktivnog zračenja u okolini i granične doze zračenja**

Radioaktivno zračenje iz okoline djeluje na čovjeka od njegovog rođenja. To zračenje se može protumačiti kao pozadinsko zračenje jer je neovisno od ljudskih aktivnosti, je u prošlosti bilo intenzivnije nego danas. Iznosi 1 do 2 mSv/god ovisno o lokaciji. Osim zračenja iz prirodnih izvora, stanovništvo je podvrgnuto i umjetnom zračenju koje je posljedica ljudskih aktivnosti. Najveći doprinos umjetnom zračenju daje medicinska dijagnostika i terapija. Prirodni izvori zračenja potječu iz svemira i radioaktivnih tvari u zemljinoj kori. Prirodna doza zračenja je jako ovisna o sastavu tla i nadmorskoj visini. Umjetna doza zračenja ovisi o nizu okolnosti i životnih navika, kao što su sastav materijala zgrada za stanovanje, medicinske pretrage i liječenje za upotrebu x zračenja ili radioaktivnih izotopa.

Granične doze zračenja su regulirane propisima. Razlikujemo dozvoljenu dozu za osoblje koje profesionalno dolazi u kontakt sa izvorima zračenja, kao što je osoblje u nuklearnim postrojenjima, liječnici rendgenolozi, rukovaoci s radioaktivnim izotopima u industriji. Razlikujemo i dozvoljenu dozu za širu populaciju ili za neprofesionalno osoblje.

Dozvoljene doze za profesionalno osoblje su u pravilu 10 ili više puta veće nego za širu populaciju. Profesionalan rad s izvorima zračenja je zabranjen za neke kategorije ljudi kao što su mlađi od 18 godina, trudnice ili dojilje. Ograničenje doze se definira dozom za cijelo tijelo. Ta se doza dobije iz efektivne doze pojedinih organa preko težinskih faktora. Na osnovi preporuka ICRP doze zračenja za profesionalno osoblje u slučaju ravnomjernog ozračivanja cijelog tijela su ograničene na 50 mSv/god. Ponekad se godišnja doza ograničava i maksimalnom kvartalnom dozom. Za radnike Ne Krško kvartalna doza ograničena je na 25 mSv.

Doze pojedinca iz šireg stanovništva zbog rada nuklearnih instalacija su ograničene na oko 1 mSv/god. ICRP ograničava dozu neprofesionalnog osoblja na 1.7 mSv/god. Dozvoljena je dodatna doza zračenja stanovništva, prema propisima istog reda veličine kao i prirodna doza.

#### 8.4. Zaštita od nuklearnog zračenja

Zaštitu od vanjskog nuklearnog zračenja možemo osigurati upotrebom odgovarajućih štitova. Štitovi se izrađuju iz prikladni materijala i odgovarajućih dimenzija. Zadatak im je da nuklearnim reakcijama između zračenja i materijala štita smanje intenzitet zračenja na izlazu iz štita. Štitovi su neophodna zaštita od gama zraka i neutronske zračenja. Tok gama zraka nakon prolaza kroz materijal ovisi o jačini izvora, debljini materijala, masenom apsorpcijskom koeficijentu i faktoru nakupljanja. Osnovna poteškoća kod proračuna efikasnosti štitova od zračenja leži upravo u određivanju faktora nakupljanja. Taj faktor ovisi o geometriji i sekundarnim nuklearnim reakcijama u materijalu koje izaziva gama zračenje.

Zaštita od izvora zračenja brzih neutrona, među koje spadaju i fisijski neutroni, se teško provodi jer se ti neutroni ne mogu efikasno apsorbirati. Apsorpcijski udarni presjeci svih materijala za brze neutrone su vrlo maleni. Zbog toga se strategija zaštite od brzih neutrona sastoji najprije na njihovom usporavanju, a tek onda apsorpciji. Najveću sposobnost usporavanja neutrona od svih materijala ima vodik. Iz tog je razloga vodik jedan od glavnih komponenata u svakom štitu od neutronske zračenja. Upotrebljava se voda ili bilo koji drugi materijali sa visokim sadržajem vodika, kao na primjer parafin. Beton koji se najčešće upotrebljava za izradu štitova sadrži oko 10% vode koja vrši funkciju usporavanja neutrona. Kada je potrebno usporiti vrlo brze neutrone, dobivene iz akceleratora ili fuzijskih reakcija (energija tih neutrona je oko 14 MeV), za zaštitu se upotrebljavaju teži elementi koji usporavaju neutrone putem neelastičnih sudara. Kod visokih energija neutrona te su nuklearne reakcije efikasnije za usporavanje neutrona od elastičnih sudara sa atomima vodika (kod energija fisijskih neutrona su udarni presjeci neelastičnih sudara mnogo manje značajni). Kod projektiranja štitova treba voditi računa i o zaštiti od sekundarno nastalih gama zraka.

## 9. ZAKLJUČAK

Osim problema skladištenja potrošenog radioaktivnog goriva i povećanog toplinskog opterećenja okoliša, nuklearne elektrane su povoljne za okoliš jer u pogonu ne ispuštaju CO<sub>2</sub> čime se smanjuju problemi sa globalnim zagrijavanjem. Također, cijena proizvedene električne energije u nuklearnim elektranama je povoljnija nego u drugim tipovima elektrana. Provedbom svih zakonskih i tehnoloških postupaka za zaštitu okoliša možemo smanjiti negativan utjecaj na okoliš i poboljšati rad nuklearnih elektrana.

Međutim, kako bi nuklearne elektrane mogle funkcionirati, potrebno je svakih 18 mjeseci napraviti remont. Zaštitom na radu omogućujemo nadzor i smanjenje rizika od zračenja za radnike koji obavljaju razne djelatnosti u nuklearnim elektranama i na zbrinjavanju radioaktivnog otpada, kao i utjecaj za zdravlje ljudi koji žive u blizini postrojenja. Remont je najvažniji i najzahtjevniji projekt nuklearne elektrane koji traje prosječno 20 do 40 dana, a uspješnost tog procesa ovisi o stručnosti, odgovornosti i profesionalnosti svih osoba koje sudjeluju u procesu.

U ovome radu je opisan način izvođenja remonta s posebnim naglaskom na zaštitu na radu u cilju smanjenja rizika od zračenja za radnike koji vrše remont. Opisane su vrste zračenja, način mjerenja, dozvoljene doze zračenja koje radnici smiju primiti, kao i posljedice ukoliko se ne provodi adekvatna zaštita na radu od zračenja. Na kraju je dan osvrt o utjecaju prirodnog zračenja na ljude, kao i način zaštite od zračenja.

## LITERATURA

[1] Prof. dr. sc. Danilo Feretić, „Uvod u nuklearnu energetiku“, drugo dopunjeno izdanje, Zagreb, 2007.

### Internet izvori:

[2] [www.nemis.hr](http://www.nemis.hr)

[3] [www.narodne-novine.hr](http://www.narodne-novine.hr)

[4] [www.nek.si](http://www.nek.si)

[5] [www.accessscience.com](http://www.accessscience.com)

[6] [www.hr.m.wikipedia.org](http://www.hr.m.wikipedia.org)

[7] [www.researchgatesite.blogspot.com](http://www.researchgatesite.blogspot.com)

[8] [www.uranmachine.de](http://www.uranmachine.de)

[9] [www.merdzan.org](http://www.merdzan.org)



## POPIS SLIKA

Slika 1. Energija veze po nukleonu.....	6
Slika 2. Model atomske jezgre u obliku kapljice tekućine .....	13
Slika 3. Zastupljenost fisijskih fragmenata $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ i $^{239}\text{Pu}$ u ovisnosti o masenom broju...	15
Slika 4. Lančana reakcija .....	16
Slika 5. Penkala dozimetar.....	22
Slika 6. Dozimetar .....	23

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Ovisnost faktora Q o vrsti zračenja.....	26
Tablica 2. Rane posljedice ekvivalentnih akutnih doza zračenja .....	27
Tablica 3. Težinski faktori pri ozračivanju pojedinih dijelova tijela .....	27