

# Osnove rada nuklearnih reaktora fizijskih elektrana

---

**Mihaljević, Danijel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*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:128:684861>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-27**



**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 REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite

Stručni studij sigurnosti i zaštite

Danijel Mihaljević

# **Osnove rada nuklearnih reaktora fisijskih elektrana**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2017.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department

Professional undergraduate study of Safety and Protection

Danijel Mihaljević

# **Basics of nuclear reactors of fission power plants**

Final paper

Karlovac, 2017.

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel Sigurnosti i zaštite

Stručni studij sigurnosti i zaštite

Danijel Mihaljević

# **Osnove rada nuklearnih reaktora fisijskih elektrana**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Lulić Slaven, dipl.ing. viši predavač

Karlovac, 2017.



**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



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: Stručni studij sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita na radu Karlovac, 2017.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Danijel Mihaljević Matični broj:

Naslov: Osnove rada nuklearnih reaktora fisijskih elektrana

Opis zadatka:

U ovom završnom radu govorit ću o procesu fisije i njezinim učincima, te o povijesti i zanimljivom otkriću fisije. Poblizje ću objasniti nuklearne reaktore i njihov način rada te ću se dotaknuti vrsta reaktora i njegovih dijelova. Također, navesti ću i opisati nuklearne reaktore po generacijama.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
<u>07./2017.</u>	<u>09./2017.</u>	<u>10./2017.</u>

Mentor:  
 Lulić Slaven, dipl.ing. viši predavač

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **PREDGOVOR**

Svima koji su mi pružili pomoć i davali mi podršku za vrijeme pisanja ovog završnog rada, hvala Vam.

Posebno se želim zahvaliti mentoru Slavenu Luliću na puno strpljenja, razumijevanja i uputama koje mi je davao za vrijeme pisanja ovog rada.

Najviše bi se htio zahvaliti svojim roditeljima koji su me potakli moju želju za studiranjem i davali mi potporu tijekom cijelog školovanja. Također, veliko hvala mojoj partnerici koja me je cijelo ovo vrijeme bodrila i pomagala mi da ustrajem u svojim željama.

## SAŽETAK

U ovom završnom radu govorit ću o procesu fisije i njezinim učincima, te o povijesti i zanimljivom otkriću fisije. Poblje ću objasniti nuklearne reaktore i njihov način rada te ću se dotaknuti vrsta reaktora i njegovih dijelova. Također, navesti ću i opisati nuklearne reaktore po generacijama. Uz definiciju nuklearnih nesreća, navedeni su primjeri prema INES ljestvici, te su poblje objašnjeni postupci koje primjenjujemo kada se dogodi havarija. Dotaknuo sam se i segmenta ionizirajućeg zračenja te načina zaštite od istog.

**Ključne riječi:** Nuklearna fisija, nuklearni reaktor, generacije, povijest, INES ljestvica, nesreće, nezgode, Černobil, Fukushima, ionizirajuće zračenje, zaštita.

## SUMMARY

In this final paper I will talk about the process of fission and its effects, as well as history and interesting discovery of fission. I will explain the nuclear reactors and the way they work, and I will talk about the types of reactors and its parts. Also, I will describe nuclear reactors by generations. With the definition of nuclear accidents, examples are given according to INES scale with detailed procedures we have to apply when an accident occurs. I also described ionizing radiation and ways of protecting yourself from it.

**Key words:** Nuclear fission, nuclear reactor, generation, history, INES scale, accident, Chernobyl, Fukushima, ionizing radiation, protection.

**SADRŽAJ**

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA .....	I
PREDGOVOR .....	II
SAŽETAK .....	III
SADRŽAJ .....	IV
1. UVOD .....	1
1.1. Nuklearna fisija.....	1
2. OTKRIĆE FISIJE.....	3
3. NUKLEARNI REAKTOR.....	5
3.1. DIJELOVI NUKLEARNOG REAKTORA .....	5
3.2. PRINCIP RADA NUKLEARNOG REAKTORA.....	6
3.3. Razvrstavanje nuklearnih reaktora po generaciji .....	9
3.3.1. Nuklearni reaktori I. generacije.....	9
3.3.2. Nuklearni reaktori II. generacije .....	10
3.3.3. Nuklearni reaktori III. generacije .....	11
3.3.4. Nuklearni reaktori IV. generacije.....	12
4. POSTUPANJE U SLUČAJU NUKLEARNE NESREĆE .....	13
4.1. INES ljestvica .....	14
5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA .....	19
6. ZAKLJUČAK.....	28
7. LITERATURA .....	29
8. PRILOZI .....	31
8.1. Popis slika.....	31



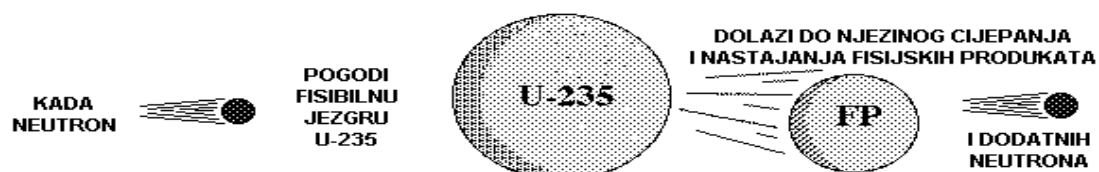
## 1. UVOD

Nuklearna energija je energija čestica koja je pohranjena u atomskoj jezgri. Atomska jezgra se sastoji od protona i neutrona (zajedničkim nazivom nukleoni), koji su međusobno povezani jakim i slabim nuklearnim silama. Kod nuklearnih reakcija dolazi do promjene stanja jezgre atoma tj. mijenja se broj ili vrsta čestica u jezgri. Zavisno o vrsti nuklearne reakcije, može doći do oslobodjenja nuklearne energije koja se potom može koristiti za proizvodnju električne energije u nuklearnim elektranama. Proces koji oslobađaju nuklearnu energiju su fisija i fuzija. Kod fuzije nuklearna energija se oslobađa u procesima koji se odvijaju u zvijezdama. U nuklearnim elektranama koristimo fisiju kako bi oslobodili tu energiju [1].

### 1.1. Nuklearna fisija

Nuklearna fisija (lat. *fissio*, razdvajanje, dijeljenje)

Nuklearna fisija je vrsta nuklearne reakcije. Ona nastaje cijepanjem atomske jezgre nekog kemijskog elementa na 2 fisijska produkta (fisiona fragmenta) sličnih masa (**Sl.1.**). Cijepanjem dolazi do emisije jednog ili više neutrona pri čemu se oslobađa velika količina energije. Do tog oslobodjenja energije tokom fisije dolazi zbog toga što je manje energije potrebno za oblikovanje dvije lakše jezgre nego jedne teže. Iako se, spontana fisija jezgre odvija vrlo sporo, kod određenih teških jezgri možemo ubrzati reakciju fisije. Jezgre koje su podložne tzv. fisiji sporim neutronima zovemo fisilnim jezgrama. Fisilne jezgre su jezgre izotopa uranija-233 i uranija-235, plutonija-239 te izotopa plutonija-241. U prirodi postoji samo jedan fisilni izotop, uranij-235, čija oslobođena energija iznosi 200 MeV. Fisijski fragmenti (Fisijski produkti) nastaju fisijom dvije lakše jezgre i radioaktivne su [2].



Sl.1. Shematski prikaz cijepanja uranija<sup>235</sup>

izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/nuklearne-reakcije/fisija.html>

Nuklearna fisija podrazumijeva dijeljenje jezgre određenih atoma na manje jezgre pri čemu se stvaraju slobodni neutroni i druge male jezgre. To može dovesti proizvodnje fotona u obliku gama-zraka. Fisiju teških elemenata možemo opisati kao egzotermni proces koji oslobađa velike količine energiju u tipu elektromagnetske radijacije i kinetičke energije. Nastali dijelovi nisu istog kemijskog elementa kao originalni atom, te se može karakterizirati kao oblik elementarne pretvorbe [2].

Nuklearna fisija stvara snagu za nuklearnu energiju i nuklearna oružja. Nijedno do tog nije moguće bez tzv. nuklearnih goriva koja prolaze fisiju pri sudaru sa slobodnim neutronima, a potom stvaraju neutrone i energiju kada se razdvoje. Na taj način stvara se samoodržavajuća lančana reakcija koje u nuklearnom reaktoru kontrolirano oslobađa energiju. Kod nuklearnih oružja to se događa nekontrolirano. Nuklearna fisija je vrlo koristan izvor energije iz razloga što je količina nuklearne energije koja se nalazi u nuklearnom gorivu milijun puta veća od količine slobodne energije koja se nalazi u istoj količini kemijskog goriva kao što je benzin. Međutim, proizvodi nuklearne fisije su radioaktivni i njihova radioaktivnost dugo vremena ne opada čime se stvara problem nuklearnog otpada. Oko saniranja nuklearnog otpada i oko opasnosti od nuklearnih oružja vodi se veća briga, čak i od onih korisnih kvaliteta fisije, kao izvora energije [2].

## 2. OTKRIĆE FISIJE

Engleski fizičar Chadwick je 1932. godine otkrio neutron i time je dobiven djelotvoran način za stvaranje nuklearnih reakcija. Neutron lako penetrira u atomsku jezgru zbog toga što nema električni naboj [3].

Godine 1934. započeo je istraživački program, na dobivanju umjetnih radioizotopa kroz bombardiranje neaktivnih materijala neutronima, od grupe talijanskih fizičara na čelu sa E.Fermijem. Program je istraživao i tzv. transuranijske elemente tj. elemente kojih nema u prirodi a teži su od urana, a dobivaju se izlaganjem uzoraka urana snopu neutrona. Ti ozračeni uzorci su se slali na analize u razne laboratorije. Godine 1938. objavljen je rad Irene J.Curie sa koautorom P.Savićem, u kojem se tvrdilo da ozračeni uzorci urana sadrže osim ostalih i puno lakše elemente, koji su srodni lantanu i bariju. To se moglo tumačiti samo cijepanjem atoma urana, fisijom. Nalaz je potvrđen od strane njemačkih istraživača Hahna i Strassmana, a poslije toga i od drugih laboratorija [3].

Otto Hahn i Fritz Strassmann otkrili su da prilikom bombardiranja uranija neutronima nastaju elementi koji nalikuju radiju, a razlikuju se po tome što im je vrijeme poluraspada puno kraće. Strassmann je dokazao da se između produkata bombardiranja nalazi i izotop barija. Njegova atomska masa je duplo manja od uranijeve atomske mase. No tada znanstvenici nisu znali objasniti zašto uranij, koji ima poprilično veliku jezgru tj. sadrži 92 protona, stvara tako malu atomsku jezgru barija od samo 56 protona. Kako bi to shvatili, za pomoć su tražili Lisu Meitner. Nakon istraživanja saznali su da uranij<sup>238</sup> ako se bombardira neutronima proizvodi čak 16 različitih umjetnih atomskih vrsta [3].

Njemački fizičari Frisch i Meitner, na temelju saznanja o prirodi fisije atoma urana, koristeći model atomske jezgre u vidu kapljice tekućine (postavio danski fizičar N.Bohr 1936.godine) su u veljači 1939. godine objavili teoriju fisije atoma urana, za koju tvrde da se u tom procesu ne oslobađa samo energija nego i dodatni neutroni koji omogućuju lančanu reakciju. Istraživanja u ovom polju početkom drugog svjetskog rata držala su se u tajnosti [3].

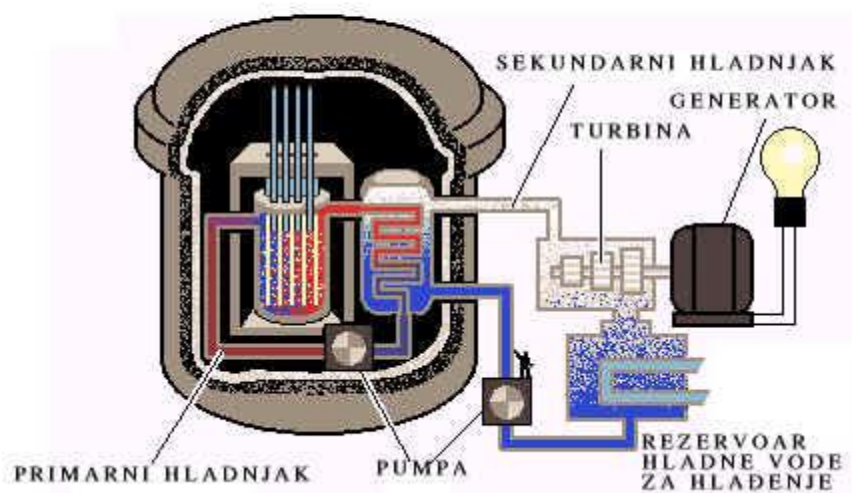
Lisa Meitner i Otto Hahn surađivali su nakon njenog odlaska u Švedsku, iako su bili udaljeni i spriječeni da se susretnu, komunicirali su putem pisama. Saznajemo da u jednom od pisama Hahn je tražio njeno mišljenje o tome kako bi barij zapravo mogao biti produkt neutronske bombardiranja uranija. Ona mu je na to odgovorila kako je to lako moguće. Hahn i Strassman potvrdili su svoju teoriju, ali i dalje je nisu mogli objasniti u potpunosti. Lisa je surađivala sa svojim nećakom Ottom Frischem, s kojim je također pokušavala shvatiti problem barija. Firscheva teorije je da je jezgra atoma poput kapljice. nuklearna jezgra se opisuje kao kapljica vode, neovisno o veličini, gustoća je uvijek ista, ima oblik sfere i zbog toga posjeduje najmanju energiju. Također ima kratak doseg sila što podsjeća na silu koja drži molekule vode u kapljici. No, kapljica može oscilirati i pri tome postaje nepravilna jer se nukleoni neravnomjerno raspoređuju. zbog toga dolazi do raspada kapljice u dvije manje. postavljeno je pitanje bilo da li je neutron dovoljno snažan da izazove takvu oscilaciju. Prema Fischeru i Meitner postoji mogućnost da dodatni neutron ipak uzrokuje oscilacije što izaziva da se deformirane jezgre razdvoje zbog vrlo snažnih odbojnih sila uz oslobađanje velikih količina energije od oko 200 MeV. Na taj način vizualizirali su cijepanje uranija, ali pojavio se problem s energijom. Energija je iznosila 200 MeV što je čak 10 puta više nego kod prijašnjih nuklearnih reakcija. Koristeći Einstenovu realciju  $E=mc^2$ , došla je do izračuna za određivanje energije te se uvjerila da energija od 200 MeV prati cijepanje uranija. Odlučili su takvu nuklearnu reakciju nazvati „fisija“. Taj pojam su koristili i biolozi kada se govorilo o podjeli žive stanice. Tako je Meitner-Frisch proces postao „nuklearna fisija“ [3].

### 3. NUKLEARNI REAKTOR

Nuklearni reaktor je uređaj koji se koristi za pokretanje i kontrolu neprekidne nuklearne lančane reakcije, dok se kod nuklearne bombe dešava eksplozivna i nekontrolirana lančana reakcija. Nuklearni reaktori koriste se u nuklearnim elektranama za proizvodnju električne energije i za pogon brodova. Neki reaktori se koriste za izradu izotopa za medicinsku i industrijsku upotrebu, ili za proizvodnju plutonija koji se koristi za oružje. Neki se koriste samo za istraživanje (istraživački reaktori) za dobivanje radioaktivnih izotopa i pokuse s neutronske zračenjem [4].

#### 3.1. DIJELOVI NUKLEARNOG REAKTORA

Nuklearni reaktor se sastoji od reaktorske posude, gdje se nalazi reaktorska jezgra, čiji su glavni dijelovi: gorivo, moderator, rashladno sredstvo i apsorpcijski materijali (SI.2.). Najvažnija razlika određenih tipova reaktora zavisi o vrsti materijala tih dijelova[4].



#### SI.2. Dijelovi nuklearnog reaktora

izvor: [http://nuklem.tripod.com/nuklearni\\_reaktor.htm](http://nuklem.tripod.com/nuklearni_reaktor.htm)

**Klasifikacija reaktora** može se napraviti prema:

- energiji neutrona koji izazivaju fisije (brzi i termički reaktori);

- materijalu moderatora;
- materijalu rashladnog sredstva;
- prema razvojnim kategorijama;
- upotrebi;
- fazi goriva [4].

### 3.2. PRINCIP RADA NUKLEARNOG REAKTORA

Isto kako uobičajene elektrane stvaraju električnu energiju iskorištavanjem toplinske energije koja je oslobođena sagorijevanjem fosilnih goriva, tako i nuklearni reaktori pretvaraju energiju oslobođenu nuklearnom fisijom u toplinsku energiju koja se dalje može pretvarati u mehaničke i električne oblike [4].

#### Nuklearna lančana reakcija

Da bi došlo do nuklearne fisije, velika atomska jezgra, primjerice uranij<sup>235</sup> ili plutonij<sup>239</sup> mora apsorbirati neutron i time se teška jezgra razdvoji na dvije ili više lakših jezgri, pri čemu oslobađa kinetičku energiju, gama zračenje i slobodne neutrone koje jednim imenom nazivamo fisijski produkti. Te slobodne neutrone mogu apsorbirati drugi fisijski atomi koji potom oslobode druge neutrone, i tako nastane nuklearna lančana reakcija [4].

Da bi se kontrolirala ta nuklearna lančana reakcija potrebno je koristiti neutronske apsorber (također se naziva neutronske otrov ili nuklearni otrov) i usporivač neutrona, koji mijenjaju broj neutrona, da i izazvali više fisija. U većini slučajeva nuklearni reaktori imaju automatske i ručne sustave za prekid fisijskih reakcija ukoliko dođe do detekcije nesigurnih uvjeta [4].

Moderatori neutrona (usporivači neutrona) koji se uobičajeno koriste sadrže običnu (laganu) vodu (75% svjetskih reaktora), čvrsti grafit (20% reaktora) i tešku vodu (5% reaktora). Poneki eksperimentalni tipovi reaktora koriste berilij, u ugljikovodici su predloženi kao druga mogućnost [4].

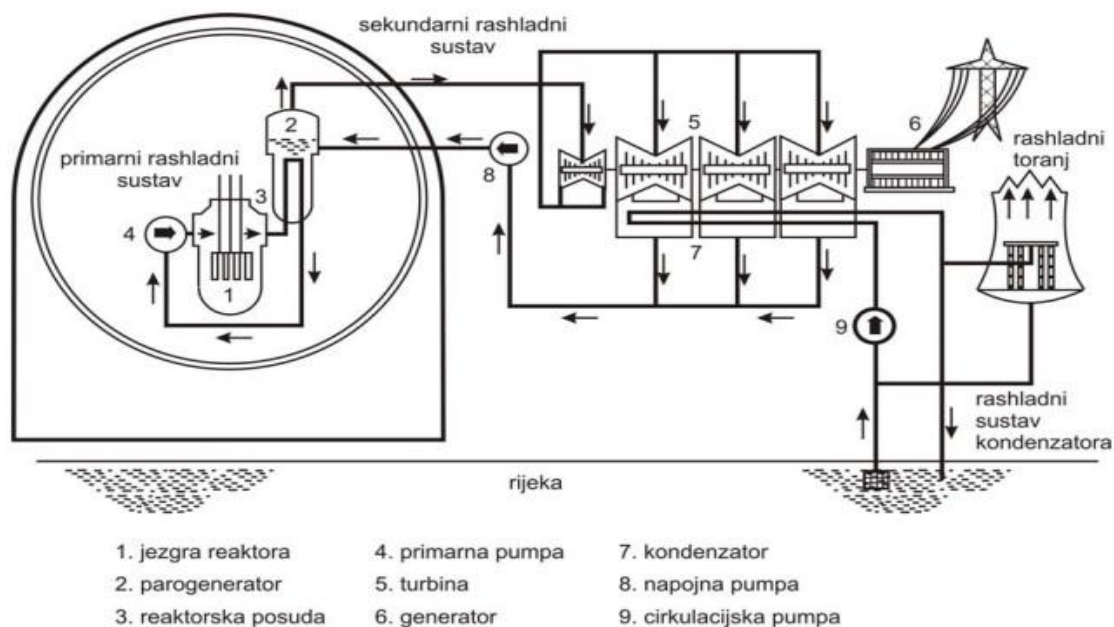
## Načini proizvodnje topline

Jezgra reaktora stvara toplinu na nekoliko načina:

- Kinetička energija, nastala od fisijskih produkata pretvara se u toplinu kada se jezgra sudaraju sa atomima u blizini.
- Reaktor tijekom fisije apsorbira gama zrake, te na taj način stvara toplinsku energiju.
- Toplina se stvara radioaktivnim raspadom fisijskih produkata i materijala koji se aktiviraju zbog apsorpcije neutrona [4].

## Princip hlađenja

Kod nuklearnog reaktora tekućina za hlađenje je najčešće voda, ali nekad i plin ili tekući metal (poput tekućeg natrija) ili rastopljena sol, koja kruži oko jezgre reaktora da upija toplinu, i zatim se koristi za dobivanje pare. U većini reaktorskih sustava koristi se sustav hlađenja, koji je odvojen od prokuhane vode da stvori paru pod tlakom, za parne turbine, poput tlačnog reaktora (PWR) (SI.3.). Međutim, kod nekih reaktora voda za parne turbine je direktno prokuhana jezgrom reaktora, kao kod reaktora s ključajućom vodom (BWR) [4].



**SI.3.** Shematski prikaz principa rada nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom (PWR) i njegov rashladni sustav izvor: <http://www.skripta.info/wp-content/uploads/2016/06/Danilo-Fereti%C4%87-Uvod-u-nuklearnu-energetiku.pdf>

Reaktori se dijele, s obzirom na rashladno sredstvo na:

1. **vodom hlađene reaktore** (lakovodni reaktor);
  - tlačne reaktore ili reaktori s vodom pod tlakom (eng. *Pressurized Water Reactor* - PWR) **(SI.3.)**;
  - kipući reaktori ili reaktori s ključajućom vodom (engl. *Boiling water reactor* - BWR);
  - tlačni teškovodni reaktori ili reaktori hlađeni i moderirani teškom vodom (engl. *Heavy Water Reactor* - HWR);
2. **reaktore hlađene tekućim metalom**;
  - natrijem hlađeni reaktori;
  - olovom hlađeni reaktori;
  - olovo-bizmut hlađeni reaktori;
3. **plinom hlađene reaktore** (Magnox reaktor) **(SI.4.)**;
4. **reaktore s rastaljenim solima** [4].

### **Kontroliranje fisije**

Ograničavanjem broja neutrona, koji mogu pokrenuti proces fisije, prilagođava se izlazna snaga reaktora [4].

Za apsorpciju neutrona koriste se kontrolne šipke koje su izrađene od neutronske apsorbera, i što više neutrona apsorbiraju to je manje slobodnih neutrona koji mogu uzrokovati fisiju. Ukoliko, želimo povećati izlaznu snagu reaktora, tada je potrebno izvući kontrolnu šipku. Da bi smanjili izlaznu snagu reaktora, gurnuti ćemo kontrolnu šipku u reaktor [4].

Usporivač neutrona se koristi kao rashladno sredstvo kod ponekih reaktora, tako što povećava snagu reaktora i time brzi neutroni koji su oslobođeni u fisiji, izgube energiju i pretvore se u termalne neutrone, koji ranije potaknu proces fisije nego brzi neutroni [4].

Za rashladno sredstvo se zna koristiti apsorber, na način da apsorbira neutrone slično kao i kontrolne šipke. Izlazna snaga na takvim reaktorima se može povećavati zagrijavanjem rashladnog sredstva [4]. Također, kod većine reaktora postoje automatski i ručni sustavi za isključivanje reaktora koji služe za hitne slučajeve. Ako jesu ili ako se predviđa da su uvjeti nesigurni, sustav tada

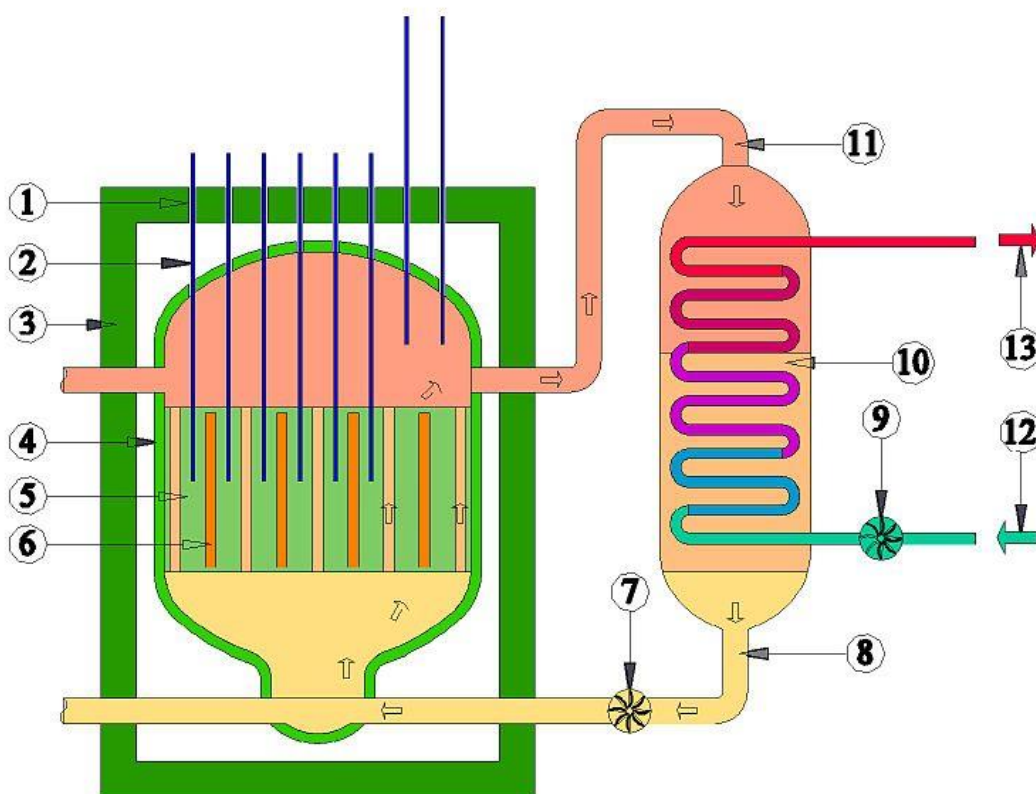


ispusti značajne količine apsorbera (najčešće borna kiselina) da bi se zaustavila reakcija fisije [4].

### 3.3. Razvrstavanje nuklearnih reaktora po generaciji

#### 3.3.1. Nuklearni reaktori I. generacije

Nuklearni reaktori I. generacije su raniji prototipi, koristili su se za istraživanje, i proizvodili su energiju za nekomercijalne svrhe. Raniji prototipi su: nuklearni reaktor tipa Magnox (reaktor hlađen pomoću plina tj. ugljikovog dioksida) dizajniran u Ujedinjenom Kraljevstvu i danas su još uvijek u uporabi (SI.4.), nuklearna elektrana tipa „Fermi 1“ (brzi nuklearni reaktor hlađen tekućim natrijem) u Michiganu, prva nuklearna elektrana u SAD-u Shippingport (reaktor je hlađen vodom pod tlakom) u Pennsylvaniji, NE Dresden (reaktor s ključajućom vodom) u Illinois-u, i UNGG reaktor (reaktor koji je hlađen plinom) razvijen u Francuskoj [4].



### NUKLEARNI REAKTOR TIPa MAGNOX

SI.4. Presjek kroz nuklearni reaktor tipa Magnox: 1.cijevi za punjenje, 2. kontrolni štapovi, 3. zaštitni plašt, 4. reaktorska posuda, 5. grafirni usporivač

neutrona (moderator), 6. gorivni štapovi nuklearnog goriva, 7. kompresor plinova, 8. cjevovod hladnih plinova, 9. cirkulacijska pumpa vode, 10. izmjenjivač topline, 11. cjevovod vrućih plinova, 12. ulaz vode, 13. izlaz pare. Izvor:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnox\\_reaktor#/media/File:Magnox\\_reaktor.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnox_reaktor#/media/File:Magnox_reaktor.jpg)

### 3.3.2. Nuklearni reaktori II. generacije

Nuklearni reaktori II. generacije odnose se na klasu komercijalnih reaktora izgrađenih do kraja 1990-tih godina. Bilo je značajnih unapređenja u konstrukciji, ali nijedna nije bila revolucionarna. Prototipni reaktori II. Generacije su:

- reaktor s vodom pod tlakom PWR (engl. Pressurized Water Reactor) pr. NE Krško **(SI.5.)**,
- reaktor s ključajućom vodom BWR (engl. Boiling Water Reactor) ili kipući reaktor, pr. NE Fukushima 1,
- tlačni teškowodni reaktor PHWMR (eng. pressurized heavy water moderated reactor) ili CANDU reaktor (eng. canadian Deuterium Uranium) u Kanadi,
- napredni reaktor hlađen na plin AGR (eng. advanced gas-cooled reactor) pr. NE Torness u UK,
- VVER reaktor ili tlačni reaktor PWR sovjetske tehnologije (pr. NE Paks u Mađarskoj),
- RBMK reaktor, reaktor hlađen vodom i moderiran grafitom (pr. NE Černobil) **[4]**.



#### SI.5. NE Krško

izvor: <http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/nuklearna-elektrana-krsko-nek.html>

#### 3.3.3. Nuklearni reaktori III. generacije

Nuklearni reaktori III. generacije su razvoj dizajna iz prošle generacije koja uključuju velika poboljšanja kao primjerice, poboljšanu tehnologiju goriva, superiornu toplinsku učinkovitost, značajno poboljšane sigurnosne sustave (uključujući pasivnu nuklearnu sigurnost) i standardizirane dizajne za smanjenje troškova održavanja i kapitalnih troškova. Životni vijek je produljen na 60 godina. Prvi nuklearni reaktori III. generacije bio je Kashiwazaki 6 (**SI.6.**), napredni kipući reaktori ABWR (eng. *Advanced Boiling Water Reactor*), a počeo je s radom 1996. godine. Jedini reaktor III. generacije je napredni kipući vodom hlađeni reaktor ABWR, a razvio ga je General Electric **[4]**.



#### SI.6. NE Kashiwazaki 6

izvor: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kashiwazaki-Kariwa\\_Nuclear\\_Power\\_Plant](https://en.wikipedia.org/wiki/Kashiwazaki-Kariwa_Nuclear_Power_Plant)

#### 3.3.4. Nuklearni reaktori IV. generacije

Nuklearni reaktori IV. generacije se skup projekata nuklearnog reaktora, koji se trenutno istražuju za komercijalne svrhe od strane međunarodnog foruma, a motivirani su raznim ciljevima uključujući, poboljšanu sigurnost i pouzdanost, održivost, učinkovitost i smanjene troškove [4].

Ne očekuje se da će većina tih projekata biti dostupna za komercijalnu izgradnju od 2020-2030. Danas je većina reaktora koji rade II. generacije, jer je većina reaktora I. generacije ugašena, a postoji samo 10-ak reaktora III. generacije od sredine 2014. godine. Nuklearni reaktori IV. generacije su u potpunosti teorijski i stoga se ne smatraju izvedivima u kratkom roku, što rezultira slabim financiranjem u području istraživanja i razvoja [4].

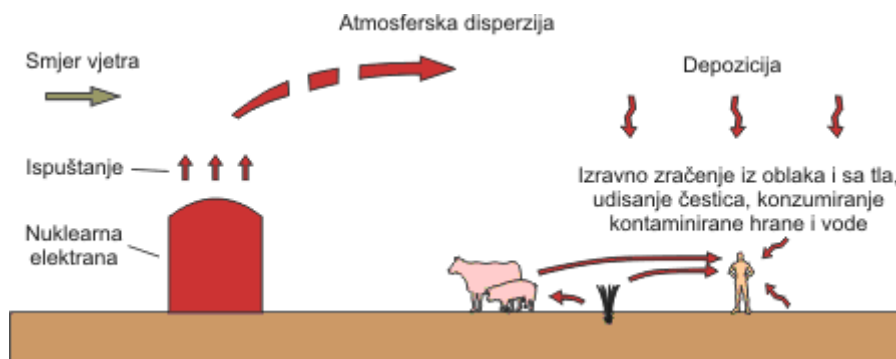
Trenutno ima 6 predloženih sustava reaktora IV. generacije. Od toga, tri su iz grupe brzih oplodnih reaktora, dva su termička, a zadnji je epitermički, i neki od njih se mogu čak koristiti za proizvodnju vodika [4].

#### 4. POSTUPANJE U SLUČAJU NUKLEARNE NESREĆE

Nuklearne nesreće su događaji koji uzrokuju štetan utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka i njegovu okolicu, povezuju se uz fisibilne materijale. Nuklearne nesreće nisu isto što i radiološke nesreće, koje su vezane uz nefisibilne radioaktivne materijale (npr. izvori zračenja u medicini i postrojenjima) [5].

Opasnost od nastanka nuklearne nesreće se može desiti i tokom obrade, prijevoza ili skladištenja nuklearnih materijala, ipak najveća opasnost su nesreće na nuklearnim elektranama, gdje se nalazi velika količina radioaktivnih tvari, koje mogu prouzročiti značajne posljedice i raširiti se na velikom području. Razlog nesrećama na nuklearnim elektranama su razne, npr. kvarovi uzrokovani ljudskim greškama, vanjski utjecaji poput, potresa, poplava, izuzetno loših meteoroloških uvjeta ili čak teroristički napad. Ukoliko dođe do nesreće moguća su ispuštanja radioaktivnog materijala u okolinu (**SI.7.**). Radijacija može doći do atmosfere, površinskih voda ili u zemlju, tj. u podzemne vode. Iz dosadašnjeg iskustva najviše trebamo voditi brigu o nesrećama koji dovode do ispuštanja ekstremnih količina radijacije i toplinske energije u atmosferu [5].

Kada bi radionuklidi iz nuklearne elektrane došli do atmosfere, stvorio bi se tzv. radioaktivni oblak koji bi se počeo dalje širiti (**SI.7.**). Ljudi koji bi bili obuhvaćeni radioaktivnim oblakom, bili bi ozračeni direktno iz oblaka, te bi udisali radioaktivne čestice i plinove iz njega. Nakon taloženja radioaktivnih čestica na tlu, najštetniji učinci bi bili od izravnog zračenja odloženog radioaktivnog materijala, udisanja prašine i konzumiranja zaražene hrane i vode [5].



**SI.7.** Ispuštanje radioaktivnog materijala iz postrojenja u okoliš

izvor: [http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne\\_nesrece/faze\\_nesrece](http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne_nesrece/faze_nesrece)



#### 4.1. INES ljestvica

INES ljestvica ili Međunarodna ljestvica za nuklearne nesreće (engl. International Nuclear and Radiological Event Scale - INES) je ljestvica koja opisuje nuklearne i radiološke događaje te njihovu razinu sigurnosti **(SI.8.)**. Koristi se u cijelome svijetu za odnose s javnošću **[6]**.

Richterova ili Celzijeva ljestvica pruža razumijevanje podataka o potresima ili temperaturi, tako i INES ljestvica prikazuje razinu važnosti događaja koji su posljedica korištenja radioaktivnih izvora u proizvodnji i zdravstvu, rad nuklearnih elektrana ili prijevoz radioaktivnog materijala **[6]**.

Događaji na ljestvici su podijeljeni na sedam razina, od 1-3 se zovu nezgode, a razine od 4-7 su nesreće **(SI.8.)**. Ljestvica je napravljena tako da je, svaka sljedeća razina za otprilike 10 puta veća od prijašnje. Ispod ljestvice, je razina 0, gdje su događaji koji ne predstavljaju opasnost, a zovu se otkloni **[6]**.



#### SI.8. INES ljestvica

izvor: [http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne\\_nesrece/ines\\_ljestvica](http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne_nesrece/ines_ljestvica)

#### Razina 7: teška nesreća

Znači veliki ispust radioaktivnog materijala s rasprostranjenim učincima na zdravlje ljudi i njihov okoliš. Tada je potrebna primjena isplaniranih i proširenih mjera zaštite. Primjer nesreće je Černobil i Fukushima **(SI.9.) [6]**.



### SI.9. Nesreća u Fukushimi

izvor: [https://chernobylguide.com/fukushima\\_disaster/](https://chernobylguide.com/fukushima_disaster/)

### Černobilska nesreća

Katastrofa u Černobilu (1986.g.) na reaktoru hlađenom vodom i moderiranom grafitom (RBMK reaktor) je rezultat manjka sigurnosti u dizajniranju reaktora i nepridržavanja sigurnosnih procedura od strane operatera reaktora koji su doveli reaktor u stanje visoke kritičnosti, što je rezultiralo eksplozijom, čime je radioaktivnost iz jezgre dospjela u atmosferu (**SI.10.**). Umrlo je ukupno 56 ljudi tijekom nesreće, od čega su većinom bili vatrogasci i spasioci. Preko 130.000 ljudi je moralo biti evakuirano, a okoliš je pretrpio veliku štetu. Međunarodne sigurnosne studije smatraju da nije bilo porasta smrtnosti od malignih bolesti za stanovnike Černobila koji su bili u području kontaminacije. Daljnji razvoj nuklearnih postrojenja je bio na lošem glasu javnosti, ali je to znatno utjecalo na postroženje sigurnosnih procedura i mjera zaštite [7]. Važno je napomenuti da RBMK reaktor nije bio u skladu s Međunarodnim sigurnosnim načelima, tj. nije imao zaštitnu zgradu [7].



#### **SI.10.** Nuklearni reaktor u Černobilu nakon nesreće

izvor:[https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl\\_disaster#/media/File:Chernobyl\\_Disaster.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Chernobyl_disaster#/media/File:Chernobyl_Disaster.jpg)

#### **Razina 6: ozbiljna nesreća**

**Ozbiljna nesreća** predstavlja značajno ispuštanje radioaktivnog materijala, koje će vjerojatno zahtijevati provedbu planiranih mjera zaštite. Primjer ozbiljne nesreće je Kyshtymska nesreća [6].

#### **Kyshtymska nesreća (Rusija)**

29. rujna 1957. godine kvar sustava hlađenja pokrenulo je eksploziju spremnika visokoaktivnog radioaktivnog otpada, i značajno ispuštanje radioaktivnog materijala u okoliš. Evakuirano je oko 10 000 ljudi, a radijacija je uzrokovala brojna oboljenja od raka [8].

#### **Razina 5: nesreća sa širim posljedicama**

Nesreća sa širim posljedicama predstavlja ograničeno ispuštanje radioaktivnog materijala, koje će vjerojatno zahtijevati provedbu nekih od planiranih mjera zaštite. Često nekoliko ljudi pogine zbog radioaktivnog zračenja. Budu teške štete na reaktoru. Velika vjerojatnost izlaganja stanovništva velikoj količini radijacije van propisanih granica, zbog ispuštanja značajnih količina



radioaktivnog materijala unutar nuklearnog postrojenja. Primjeri nesreće sa širim posljedicama su požar u Windscaleu (Ujedinjeno Kraljevstvo), nesreća na Three Mile Islandu (SAD), nesreća u Chalk Riveru (Kanada), nesreća u Lucensu (Švicarska) i nesreća u Goiâniai (Brazil) [6].

#### **Požar u Windscaleu**

U NE Windscale u VB zbog požara u jezgri reaktora, došlo je do ispuštanja radioaktivnog materijala u okoliš, zbog čega je prodaja određenih proizvoda, mjesec dana bila zabranjena. Procjenjuje se da je zbog ove nesreće došlo do 200 slučajeva ljudi koji su oboljeli od raka, od kojih je više od pola preminulo [8].

#### **Nesreća na Three Mile Islandu**

Na dan 28. ožujka 1979.g. zbog teško oštećene jezgre reaktora 140 000 ljudi je bilo evakuirano [8].

#### **Razina 4: nesreća s lokalnim posljedicama**

Događa se manje ispuštanje radioaktivnog materijala, ali neće zahtijevati provedbu dodatnih mjera zaštite, osim kontrole proizvedene hrane. Dođe do najmanje jedne smrti uzrokovane zračenjem. Dođe do otpuštanja više od 0,1% radioaktivnog sadržaja jezgre uzrokovano taljenjem goriva ili štete na gorivu. Dolazi do izlaganja stanovništva zračenju van propisanih granica zbog ispuštanja znatnih količina radioaktivnog materijala unutar postrojenja [6].

Primjeri nesreća s lokalnim posljedicama su nesreća u Tokaimurai (Japan) 1999. godine došlo je do prekomjernog ozračenja dvojice radnika s smrtonosnim posljedicama zbog nepravilnom rukovanja tokom taloženja smjese Uranija. Stotinjak radnika i ljudi iz okolice su bili izloženi zračenju [8]. Također u Saint-Laurentu (Francuska) dogodila se nesreća 1969. Došlo je do taljenja jednog kanala za gorivo u reaktor bez ispuštanja u okoliš [8].

#### **Razina 3: ozbiljna nezgoda**

Opisuje izlaganje radnika 10 puta većim dozama nego što je to godišnje ograničeno zakonom. Simptomi takvog radioaktivnog zračenja su najčešće opekline. Mjesto rada je kontaminirano ali postoji mala vjerojatnost da će okolno stanovništvo biti ozračeno [6]. Primjer ozbiljnih nezgoda je nezgoda u

Sellafieldu (Ujedinjeno Kraljevstvo) 2005. Došlo je do ispuštanja velike količine radioaktivnog materijala unutar postrojenja bez ispuštanja u okoliš [8]. Također za primjer možemo uzeti nezgodu u Vandelloso (Španjolska) 1989. gdje je vatra razorila kontrolne sustave i time smanjila sigurnost u nuklearnoj elektrani zbog čega je reaktor morao biti ugašen [8].

### **Razina 2: nezgoda**

Opisuje izlaganje stanovnika dozama većim od 10 mSv, a u radnom području veće od 50 mSv. Karakterizira se kao opekline uzrokovane radioaktivnim zračenjem. Na toj razini onečišćenje dolazi do dijela postrojenja koje nije projektirano za to [6]. Primjer nezgoda je u Cadarache (Francuska) 1993. gdje je došlo do širenja onečišćenja na neočekivano područje, i nezgoda u Forsmarku (Švedska) 2006. gdje je došlo do greške u sustavu rezervnog napajanja nuklearne elektrane, zbog čega su bile smanjene sigurnosne funkcije [8].

### **Razina 1: nepravilnosti**

Opisuje godišnje izlaganje stanovništva dozama većim od zakonskog ograničenja [6]. Primjeri nepravilnosti su Penlyu (Seine-Maritime, Francuska) 2012., nepravilnosti u Gravelinesu (Francuska) 2009., nepravilnosti u TNPC (Drôme, Francuska) 2008 [6].

### **Razina 0: otkloni**

Opisuje događaje koji ne predstavljaju opasnost [6]. Primjer je otklon u NE Krško (Slovenija) 2008. gdje je došlo do izlijevanja primarnog rashladnog sustava, otklon u Atuchau (Argentina) 2006., otklon u Tokaimurai (Japan) 2006 [6].

## 5. ZAŠTITA OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Ionizirajuće zračenje je zračenje koje nosi dovoljno energije da oslobodi elektrone iz atoma ili molekula, i time ih ionizira. Ionizirajuće zračenje se sastoji od energetskih subatomske čestice, iona ili atoma koji se kreću brzinom svjetlosti (najčešće više od 1% brzine svjetlosti), i elektromagnetskih valova na visoko energetskog kraju spektra elektromagnetskog zračenja. Gama zrake, X-zrake, viši UV spektar elektromagnetskog zračenja su vrsta ionizirajućeg zračenja [9].

Ionizirajuće zračenje ne može se prepoznati ljudskim osjetilima. Instrumenti za otkrivanje zračenja kao što su Geigerova brojila moraju se koristiti za označavanje njegove prisutnosti i mjerenje (SI.11.). Međutim, visoki intenziteti mogu uzrokovati emitiranje vidljive svjetlosti nakon interakcije s materijom. To se događa kod Čerenkovljeva zračenja i radioluminscencije [9].



SI.11. Geigerov brojač

izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov\\_broja%C4%8D#/media/File:Geiger\\_counter.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D#/media/File:Geiger_counter.jpg)

Ionizirajuće zračenje se koristi u širokom nizu područja kao što su medicina, nuklearna energija, istraživanje, proizvodnja, gradnja i kod mnogih drugih područja. Unatoč tome, ono predstavlja opasnost za zdravlje ako se ne poduzmu odgovarajuće mjere protiv neželjenih izloženosti. Izlaganje ionizirajućem zračenju uzrokuje oštećenje živog tkiva i može dovesti do mutacija, bolesti zračenja, raka i smrti **[9]**.

Zaštitu od zračenja, poznatu pod nazivom radiološka zaštita, je definirala Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), kao „Zaštita ljudi od štetnih učinaka izlaganja ionizirajućem zračenju i sredstava za postizanje toga“. IAEA također tvrdi da „je prihvaćeno razumijevanje pojma zaštite od zračenja ograničeno na zaštitu ljudi“. Do izloženosti ljudskog tijela može doći zbog izvora zračenja ili zbog unošenja radioaktivnog materijala u tijelo **[10]**.

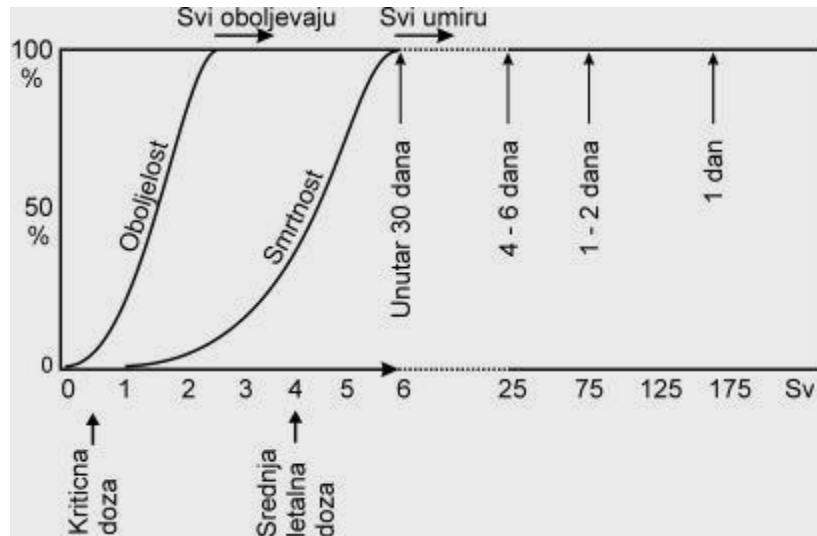
Biološke učinke zračenja dijelimo u dvije grupe: deterministički (nestohatički), i stohastički učinci. Deterministički učinci nastaju pri izloženosti velikoj dozi zračenja. Posljedica su gubitka velikog broja stanica i vidljivi su neposredno nakon zračenja. Kako bi učinci izašli na vidjelo potrebna je određena količina zračenja (tzv. prag). Stohastički učinci ispoljavaju se kao mutacije, nasljedne promjene, te tumori. Većinom, vidljivi su poslije nekog vremena latencije. Za njih ne postoji prag, tj. može ih izazvati čak i minimalna doza zračenja. Iz tog razloga ti učinci se ne mogu predvidjeti, za razliku od determinističkog učinka. Može ih se samo statistički predvidjeti. Stohastički učinci nastaju u somatskim i u spolnim stanicama. Zbog toga mutacije se mogu prenijeti genetski (nasljedne promjene, indukcija leukemija, mentalna retardacija, malformacije, smrt ploda).

Osim velikih nasljednih promjena (lomovi kromosoma i spajanja preostalih dijelova, mijenjanjem broja kromosoma) koje zračenje može izazvati, nastaju i male, poput promjene u pojedinom genu. Biološke posljedice sve su ozbiljnije, što su promjene genoma opsežnije. Velike promjene koje se događaju prilikom odumiranja stanica, tkiva, te organa, izazivaju teško prilagođavanje jedinke **[11]**.

Učinci zračenja ne ovise samo o apsorbiranoj dozi zračenja, koja je omjer predane energije zračenja i mase tkiva (jedinica je Gray -Gy) **(SI.12.)**. Oni ovise i o vrsti zračenja i o ozračenoj tvari. To znači da podjednaka apsorbirana doza raznih vrsta zračenja može izazvati i različite biološke učinke. Pa tako koristimo ekvivalentnu dozu zračenja. Osim apsorpcije energije po masi tkiva ona govori i o vrsti zračenja i o distribuciji energije u tkivu. To omogućuje direktno uspoređivanje učinaka raznih vrsta zračenja u raznim tkivima. Jedinica ekvivalentne doze je J/g i to je 1 Sv (Sievert).

Osim mutacija, u kasnije simptome zračenja ulaze i zamućenje očne leće, degenerativne promjene u plućima, oštećenja bubrega (glomerulonefritis), te uranjena smrt. Jedinka umire zbog ozbiljnih, neizlječivih oštećenja tkiva i organa. Čovjek koji po cijelom tijelu primi dozu veću od 2 Gy, te nije primio adekvatnu pomoć, vjerojatno će umrijeti. Pri većim dozama, 100 Gy ili više, dolazi do oštećenja mozga i krvnih žila, te čovjek umire neposredno nekoliko minuta nakon zračenja, vrlo vjerojatno i tijekom zračenja. Rijetko osoba poživi i do 48 sati incidenta.

Umjerene doze od 10 do 100 Gy oštećuju probavni trak, tome slijedi značajan gubitak tekućine i elektrolita, nastaju i infekcije, te smrt slijedi nakon 3 do 5 dana, ukoliko se nije interveniralo (davanje infuzija, presađivanje koštane srži). Manje doze od 2 do 10 Gy najviše utječu na krvotvorno tkivo. Takvo zračenja uzrokuje nestajanje krvnih stanica, smanjuje se zgrušavanje u krvi (nema trombocita), te manjak leukocita uzrokuje povećanu senzibilnost na infekcije. Također smanjuje se broj eritrocita te to otežava prijenos kisika do tkiva. Čovjek umire u periodu od 10 do 30 dana ukoliko intervencije nije bilo (presađivanje koštane srži). Ukoliko je liječenje adekvatno, do izlječenja treba proći i do nekoliko godina **[11]**.



**SI.12.** Utjecaj ekvivalentne doze zračenja na čovjeka.

izvor: <http://161.53.18.5/static/erg/2001/kovac/d1.html>

### Zakonske odredbe

U Republici Hrvatskoj dopuštene doze zračenja koje su propisane zakonom, za stanovnike i djelatnike koji su u dodiru s ionizirajućim zračenjima nalikuju onima koje su propisane i u svijetu. Ovdje su neke od zakonskih odredbi **[11]**.

Radnici koji obavljaju poslove s ionizirajućim zračenjima tijekom rada ne smiju u normalnim uvjetima rada primiti doze iznad sljedećih granica:

- efektivna doza do 100 milisiverta tijekom pet uzastopnih godina, odnosno 20 milisiverta prosječno u svakoj godini petogodišnjeg razdoblja ;
- efektivna doza do 50 milisiverta u bilo kojoj pojedinoj godini petogodišnjeg razdoblja;
- ekvivalentna doza za očne leće do 150 milisiverta u jednoj godini i
- ekvivalentna doza za podlaktice, šake, stopala ili kožu do 500 milisiverta u jednoj godini **[11]**.

Područje nadzora u kojem se obvezno provode mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja za sve radnike ima efektivnu dozu u jednoj godinu višu od 1 mSv **[11]**.

Za osobe koje ne rade s izvorima ionizirajućih zračenja ozračenje ne smije biti više od:

- efektivna doza do 1 mSv u jednoj godini;
- u posebnim okolnostima efektivna doza do 5 mSv u jednoj godini s tim da u pet uzastopnih godina prosječna doza ne bude veća od 1 mSv za svaku pojedinu godinu;
- ekvivalentna doza za očne leće do 15 mSv u jednoj godini i
- ekvivalentna doza za kožu do 50 mSv u jednoj godini **[11]**.

Efektivna doza mora biti u visini od 10 mSv u razdoblju od 2 dana, kako bi se proglašila intervensijska razina, koja znači da ljudi moraju ostati u kućama ili zatvorenim prostorima nakon izvanredne situacije **[11]**.

Pri efektivnoj dozi od 50 mSv u razdoblju od jednog tjedna proglašava se intervensijska razina za privremenu evakuaciju stanovništva poslije izvanredne situacije. Pri intervensijskoj razini kako bi se zaštitili od posljedica izvanredne situacije uzima se pripravak stabilnog joda što je očekivana doza za štitnjaču u količini od 100 mGy koji uzrokuju radionuklidi joda **[11]**.

Pri efektivnoj dozi u količini od 30 mSv u razdoblju od jednog mjeseca proglašava se intervensijska razina za početak privremenog iseljavanja ljudi poslije izvanredne situacije **[11]**.

Za završetak privremenog preseljenja efektivna doza se mora smanjiti na 10 mSv u razdoblju od jednog mjeseca. Ukoliko, do smanjenja ne dođe stanovništvo se mora trajno preseliti **[11]**.

Trajno preseljavanje odredit će se ako se procijeni da je očekivana životna efektivna doza iznad 1 Sv **[11]**.

Osim dopuštenih granica ozračivanja, zakonom se još propisuje i način zaštite od pojedinih objekata ili uređaja kod kojih postoji opasnost za zdravlje zbog značajnijih količina zračenja. Postupci prevencije od ozračivanja detaljno su objašnjeni **[11]**.

Ovdje su ukratko navedena načela zaštite:

- Opasni uređaji moraju biti zaštićeni fizičkim preprekama (katakombe, zaključavanje vrata za vrijeme zračenja...)
- Uređaji moraju imati višestruke filtre, te mogućnosti i ručnog i automatskog trenutnog isključivanja u slučaju nepravilnosti u radu,
- Ljudi koji rade sa uređajima moraju biti zaštićeni specijalnim odjevnim predmetima [11].

## Ozračivanje

Da bi se zaštitili od zračenja koristimo razne štitove kako bi od izvora što manje zračenja naše tijelo primilo [12].

Postoje četiri načina zaštite od zračenja:

- trajanje izloženosti - za ljude koji su uz prirodno pozadinsko zračenje izloženi dodatnim izvorima zračenja, ograničavanje ili minimiziranje trajanja izloženosti smanjit će dozu zračenja [12].
- udaljenost - intenzitet zračenja smanjuje se povećavanjem udaljenosti od izvora zračenja; doza zračenja drastično se smanjuje što se više udaljavamo od izvora [12].
- štitovi - barijere od olova, betona i vode pružaju dobru zaštitu od prodirućeg zračenja kao što je gama zračenje. Zbog toga se neki radioaktivni materijali spremaju ili se rukuje njima pod vodom ili korištenjem daljinskog upravljanja u prostorijama izgrađenim od debelog betona ili obloženim olovom. Postoje posebni plastični štitovi koji zaustavljaju beta čestice, dok zrak zaustavlja alfa čestice. Postavljanje odgovarajućeg štita između izvora zračenja i ljudi uvelike će smanjiti ili potpuno eliminirati dodatnu dozu zračenja [12].
- zatvaranje - radioaktivni materijali zatvaraju se u što je moguće manji prostor i drže se izvan okoliša. Radioaktivni izotopi koji se koriste u



medicinske svrhe odlažu se u zatvorenim ustanovama, dok nuklearni reaktori funkcioniraju unutar zatvorenih sistema sa nekoliko barijera koje zatvaraju radioaktivni materijal. Prostorije s radioaktivnim materijalom imaju snižen tlak tako da može doći samo do curenja u prostoriju, ali ne i iz prostorije [12].

#### X-zrake i gama-zrake

- Potrebno je svesti vrijeme izlaganja na minimum,
- Intenzitet zračenja brzo opada sa udaljenosti (inverzni kvadrat), i stoga treba biti na što većoj udaljenosti od izvora zračenja,
- Zaštititi se olovom [12].

#### Kontaminacija

Kada radioaktivne čestice dođu u dodir s ljudskim tijelom ili nekim drugim objektom dio te radioaktivne tvari ostane na tijelu (objektu). To nazivamo kontaminacijom [11].

Postupci za sprječavanje kontaminacije:

- Uvijek u laboratoriju treba nositi ogrtač, rukavice, hlače i cipele (ne otvorene) kada radimo sa radioaktivnim tvarima.
- Ako aktivnost doseže 1 milicurie nositi kapuljaču
- Često mijenjati rukavice i prati ruke.
- Prilikom odlaska skinuti sa sebe što je moguće više odjevnih predmeta koji su bili u prostorima gdje su otvoreni radioaktivni izvori.
- Rutinski se provjeriti sa uređajem za pregledavanje kontaminacije svaki puta kada izlazimo iz prostorije (**Sl.13.**).
- Ne jesti, piti ili pušiti u laboratoriju, niti bilo kakvu hranu stavljati blizu RA tvari [11].

Ako je ipak do kontaminacije došlo, treba primijeniti dekontaminaciju. Kontaminiranje možemo utvrditi različitim uređajima za mjerenje zračenja (slika). Dekontaminacija je postupak čišćenja tj. skidanja radioaktivnih čestica sa tijela (ili nekog predmeta) [11]. Proces dekontaminacije:

- Koža i kosa – prati sapunom i vodom. Nakon 2-3 minute pranja pregledati se uređajem za detektiranje zračenja. Po potrebi postupak ponoviti 3-4 puta. Prilikom pranja posebno paziti da ne dođe do ogrebotina.
- Oči, uši, usta, nos, rane – obilno ispirati pod tekućom vodom. Obratiti se liječniku.
- Ukoliko su čestice ušle u unutrašnjost tijela (pluća, želudac) obratiti se liječniku [11].



**SI.13.** uređaj za mjerenje kontaminiranosti

izvor: <http://161.53.18.5/static/erg/2001/kovac/d1.html>

### **Dozimetri**

Dozimetar je naprava koju radnik nosi sa sobom te se koristi za zaštitu ljudi od zračenja. Koriste ga osobe koje se kreću ili rade u područjima gdje postoji jače zračenje npr. postrojenja gdje se koriste radioaktivni materijali. Dozimetar se obično nosi na prsima ili u ruci te on ne smije biti prekriven tkaninom **(SI.14;15;16.)**. Mora imati dovoljnu količinu zraka kako bi mogao ispravno registrirati količinu zračenja. Osoba u takvim područjima dozimetar mora nositi svuda sa sobom. Dozimetar, također, može registrirati količinu zračenja odnosno dozu koju je čovjek već apsorbirao [11].



**SI.14;15;16.** Prikazane su različite izvedbe dozimetara (za prst, kao olovka i kao paket) izvor: <http://161.53.18.5/static/erg/2001/kovac/d1.html>

## 6. ZAKLJUČAK

Otkrićem fisije čovječanstvo je u ruke primilo veliku moć, ali i veliki teret. Napredak u proizvodnji energije bio je enorman. Fisija nije bila mali korak u razvoju elektrana, već najveći preokret. Ali unatoč tome ljudi fisiju nisu koristili samo da bi tehnološki napredovali, već i kako bi rušili i ubijali. Uz izgradnju nuklearnih elektrana, nicali su i tvornice nuklearnog oružja. Nuklearna fisija je vrlo dobar primjer što se dogodi kada čovjek upravlja velikim izvorom moći tj. energije. On je usmjeri prema destruktiji. Nažalost, vidjeli smo kolika je razorna snaga nuklearnog oružja i to na nedužnim ljudima.

Dobra strana fisije sve se više koristi. Nuklearne elektrane proizvode vrlo značajan dio svjetske električne energije, ali čak ni to nije bez posljedica. Uz nuklearni otpad, kojeg je veoma opasno i teško sanirati, postoje rizici od nepravilnosti u nuklearnim postrojenjima. Ako do takvih nepravilnosti dođe, to može biti pogubno, ne samo za djelatnike, već i za širu okolinu oko postrojenja. Da je nuklearno zračenje štetno i opasno za život uvidjeli smo na najgore moguće načine. Havarije u Černobilu i Fukushimi svjedoče o pogubnosti nuklearnog zračenja i njegovom štetnom učinku na eko sustav. Kako bi u budućnosti izbjegli takve nesreće, moramo puno više poraditi na zaštiti i kontroli ispravnosti u nuklearnim reaktorima. Sa IV. generacijom nuklearnih reaktora predviđa se kako bi se to moglo postići. Za sada postoje samo prototipi istih, ali razvojem tehnologije i svijesti ljudi ubrzo bi mogli proizvoditi energiju i u njima.

## 7. LITERATURA

[1] Wikipedija: „Nuklearna energija“;

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna\\_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_energija), pristupljeno: 1.9.2017.

[2] Prof. dr. sc. D.Feretić: „Uvod u nuklearnu energetiku“;

<http://www.skripta.info/wp-content/uploads/2016/06/Danilo-Fereti%C4%87-Uvod-u-nuklearnu-energetiku.pdf>, pristupljeno: 1.9.2017

[3] M.Bakoška: „Otkriće fisije“;

<http://www.mathos.unios.hr/~mdjumic/uploads/diplomski/BAK23.pdf>,  
pristupljeno: 2.9.2017.

[4] Nuklearna energija – mistika i stvarnost: „Nuklearni reaktori/elektrane“;

<http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/nuklearni-reaktori-elektrane.html>, pristupljeno: 3.9.2017.

[5] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost: „Nuklearna nesreća“;

[http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne\\_nesrece/faze\\_nesrece](http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne_nesrece/faze_nesrece),  
pristupljeno: 4.9.2017.

[6] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost: „INES ljestvica“;

[http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne\\_nesrece/ines\\_ljestvica](http://cms.dzrns.hr/aktivnosti/pripravnost/nuklearne_nesrece/ines_ljestvica),  
pristupljeno: 4.9.2017.

[7] Wikipedija: „Černobilska nesreća“;

[https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobilska\\_katastrofa](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobilska_katastrofa), pristupljeno:  
5.9.2017.

[8] T.L.: „Deset najvećih nuklearnih katastrofa u povijesti“,

<http://www.index.hr/vijesti/clanak/deset-najvecih-nuklearnih-katastrofa-u-povijesti/542461.aspx>, pristupljeno: 6.9.2017.

[9] Wikipedija: „Ionizirajuće zračenje“;

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ioniziraju%C4%87e_zra%C4%8Denje), pristupljeno:  
7.9.2017.

[10] Wikipedija: „Radiation protection“;

[https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation\\_protection](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_protection), pristupljeno: 7.9.2017.

[11] E.Kovač: „Ionizirajuće zračenje: izvori, mjerenje, prevencija“;

<http://ergonomija.zpm.fer.hr>, pristupljeno: 8.9.2017.

[12] UCDavis – Safety services: „Radiation safety - introduction and protection standards“; <http://safetyservices.ucdavis.edu/article/radiation-safety-introduction-and-protection-standards>, pristupljeno: 9.9.2017.

## 8. PRILOZI

### 8.1. Popis slika

<b>SI.1.</b> Shematski prikaz cijepanja uranija <sup>235</sup> .....	1
<b>SI.2.</b> Dijelovi nuklearnog reaktora.....	5
<b>SI.3.</b> Shematski prikaz principa rada nuklearne elektrane s tlakovodnim reaktorom (PWR) i njegov rashladni sustav .....	7
<b>SI.4.</b> Presjek kroz nuklearni reaktor tipa Magnox .....	9
<b>SI.5.</b> NE Krško.....	11
<b>SI.6.</b> NE Kashiwazaki 6 .....	12
<b>SI.7.</b> Ispuštanje radioaktivnog materijala iz postrojenja u okoliš.....	13
<b>SI.8.</b> INES ljestvica.....	14
<b>SI.9.</b> Nesreća u Fukushimai .....	15
<b>SI.10.</b> Nuklearni reaktor u Černobilu nakon nesreće .....	16
<b>SI.11.</b> Geigerov brojač.....	19
<b>SI.12.</b> Utjecaj ekvivalentne doze zračenja na čovjeka.....	22
<b>SI.13.</b> uređaj za mjerenje kontaminiranosti.....	26
<b>SI.14;15;16.</b> Prikazane su različite izvedbe dozimetara (za prst, kao olovka i kao paket).....	27