

# Nuklearna elektrana Krško

---

**Kolarec, Jurica**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*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:128:777585>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-09**



**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

# **NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO**

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

ODJEL SIGURNOSTI I ZAŠTITE  
STRUČNI STUDIJ SIGURNOSTI I ZAŠTITE

# **NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Igor Peternel

KARLOVAC, 2015.

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
**ODJEL SIGURNOSTI I ZAŠTITE**

**ZAVRŠNI ZADATAK**

Student: Jurica Kolarec

Matični broj: 0415612025

Naslov teme: Nuklearna elektrana Krško

Opis zadatka :

1. Uvod
2. Proizvodnja u nuklearnoj elektrani Krško
3. Rad nuklearne elektrane Krško
4. Nuklearni reaktor
5. Radioaktivnost
6. Černobilska katastrofa
7. Zaključak
8. Literatura

Zadatak zadan:  
/2015

Rok predaje rada:  
/2015

Predviđen datum obrane:  
/2015

Mentor:  
dr. sc. Igor Peternel

Predsjednik ispitnog povjerenstva:

## **SAŽETAK:**

Nuklearna energija jest energija budućnosti jer je jedna od najsnažnijih izvora energije današnjice - energija dijeljenja jezgri što nam govori i podatak da je to najmlađa korištena energija jer se koristi tek 60 godina u svijetu.

NEK je opremljena Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom toplinske snage od 2000 MW. Njezina je snaga na pragu 696 MW. Elektrana je priključena na 400-kilovoltnu mrežu za napajanje potrošačkih središta u Sloveniji i Hrvatskoj.

Černobil je mali gradić u Ukrajini, gotovo na samoj granici Ukrajine s Bjelorusijom koji je sve do subote 26. travnja 1986 bio potpuno nepoznat u svjetskim okvirima, a nakon tog datuma postao sinonim katastrofe radi eksplozije unutar nuklearnog reaktora koja je prouzročila najveću nuklearnu katastrofu u povijesti.

## **SUMMARY:**

Nuclear energy is the energy of the future because it's one of the most powerful sources of energy today - energy sharing core to us is the fact that it is the youngest energy used because it is used only 60 years in the world.

NEK is equipped with Westinghouse pressurized light water reactor thermal power of 2000 MW. Its power output 696 MW. The power plant is connected to the 400-kv network power consumer centers in Slovenia and Croatia.

Chernobyl is a small town in Ukraine, almost on the border of Ukraine with Belarus, which until Saturday April 26, 1986 was virtually unknown in the world, and after that date became synonymous with disaster for the sake of an explosion inside the nuclear reactor that caused the biggest nuclear disaster in history .

# SADRŽAJ:

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. POVIJEST NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO.....                       | 3  |
| 3. PROIZVODNJA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI KRŠKO .....                | 4  |
| 4. RAD NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO .....                           | 6  |
| 4.1. SUSTAV I RAD .....  | 7  |
| 4.1.1. PRIMARNI KRUG .....                                       | 7  |
| 4.1.2. SEKUNDARNI KRUG .....                                     | 7  |
| 4.1.3. TERCIJARNI KRUG .....                                     | 8  |
| 4.2. SIGURNOSNI SUSTAV .....                                     | 8  |
| 5. NUKLEARNI REAKTOR.....  | 10 |
| 6. NUKLEARNO GORIVO .....  | 12 |
| 7. RADIOAKTIVNOST .....  | 13 |
| 7.1. DJELOVANJE ZRAČENJA NA ORGANIZAM .....                      | 15 |
| 7.2. DOPUŠTENE DOZE I PROSJEČNA OZRAČENOST LJUDI.....            | 17 |
| 8. RADIOAKTIVNOST U NUKLEARNOJ ELEKTRANI .....                   | 21 |
| 9. RADIOAKTIVNI OTPAD I OBUSTAVA RADA NUKLEARNE ELEKTRANE .....  | 23 |
| 10. KVAROVI U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA I POSLJEDICE NA OKOLIŠ .... | 28 |
| 11. ČERNOBILSKA KATASTROFA .....                                 | 31 |
| 11.1. EKSPLOZIJA REAKTORA BROJ ČETIRI .....                      | 32 |
| 11.2. STANJE ZA VRIJEME NESREĆE I POSLJEDICE NESREĆE.....        | 35 |
| 11.3. MOGUĆI UZROCI KATASTROFE.....                              | 37 |
| 11.4. ČERNOBIL DANAS .....                                       | 38 |
| 12. ZAKLJUČCI .....  | 40 |
| 13. LITERATURA .....   | 42 |
| 14. POPIS SLIKA.....   | 43 |
| 15. POPIS TABLICA.....   | 44 |

## 1. UVOD

U ovom završnom radu govorit će se o nuklearnoj elektrani Krško i o njezinim mogućim posljedicama na okoliš. Dakako da ću kao prvo objasniti pojam radioaktivnosti ili radioaktivnog zračenja jer je to posljedica nuklearnih procesa gdje se oslobađaju goleme količine energije i topline koje se u našem pogledu koriste primarno za proizvodnju električne energije. Naravno da kao takav izvor energije ima svoja štetna djelovanja te će biti govora o djelovanju zračenja, što prirodnog, a što umjetnog na ljudski organizam i koje sve štetne posljedice može prouzročiti na ljudskom organizmu, te kao najvažnije kolike su zapravo dopuštene doze i prosječne ozračenosti ljudi u takvim uvjetima. S obzirom da je riječ o nuklearnoj elektrani i njezinim radioaktivnim djelovanjima bazirati ćemo se na radioaktivnost u njoj kao i na kvarove u nuklearnim elektranama od kojih ćemo izdvojiti dva i to u nuklearnoj elektrani *Otok tri milje* u SAD-u i nuklearnoj elektrani *Černobil* u tadašnjem SSSR-u i njihovim posljedicama na okoliš kao i na cjelokupno čovječanstvo. Od tada su mjere opreza porasle na maksimum, te ću govoriti o kakvima se točno radi i kako se sprječavaju kvarovi da se takvo što ponovno ne dogodi. Najbolje u tome je reagirala Američka regulatorna komisija koja je razradila nekoliko stotina preporuka za povećanje sigurnosti u nuklearnim elektranama. Konačan problem nuklearnih elektrana jest radioaktivni otpad kojeg sačinjavaju sve radioaktivne otpadne tvari koje nastaju u procesima nuklearnog gorivog ciklusa i tijekom pogona nuklearne elektrane. On se vadi iz nuklearnog reaktora i odlaže da se radioaktivnim raspadanjem smjese izotopa, od kojih se sastoji istrošeno gorivo, ne ugrozi okoliš što je opet najbitnije u ovoj temi. Da opet ne bude baš sve tako crno kad je riječ o nuklearnoj energiji spomenut ćemo niz njezinih prednosti i korištenja danas u svijetu.

Nuklearna energija zasigurno igra vitalnu ulogu u osiguravanju različitosti izvora električne energije. Izvjesno je, da će ta uloga dobivat na značaju sve više uzimajući u obzir činjenicu da se rezerve fosilnih goriva, naročito nafte i prirodnog plina, ubrzano iscrpljuju, a time postaje neizvjesna i stabilnost njihove cijene i raspoloživost dostatnih količina na svjetskom tržištu. Danas je u svijetu u pogonu 440 komercijalnih nuklearnih energetske reaktora, raspoređenih u 31 državi, s ukupnom instaliranom snagom većom od 364 000 MW(megavata) i do sadašnjim pogonskim iskustvom od preko 11. 000 reaktor-godina. Iz ovih nuklearnih elektrana osigurava se 16% proizvedene električne energije, te 7% primarne energije u svijetu. Nuklearna energija jest energija budućnosti jer je jedna od najsnažnijih izvora energije današnjice - energija dijeljenja

jezgri što nam govori i podatak da je to najmlađa korištena energija jer se koristi tek 60 godina u svijetu. Ideja stvaranja prve nuklearne elektrane potječe iz Fiziko-energetskog instituta u Obninsku u Rusiji, a ostvarena je u istom gradu kada je akademik instituta Kurčatov pustio u pogon prvu nuklearnu elektranu u svijetu 1954. godine što je otvorilo čovječanstvu put ka svjetskom korištenju novog revolucionarnog izvora energije.



Slika 1. Nuklearna elektrana Krško



## 2. POVIJEST NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO

Prva istraživanja na Krškome polju, kad je to područje postalo moguća lokacija za nuklearnu elektranu, obavila je radna skupina Poslovne udruge energetike Slovenije u razdoblju od 1964. do 1969. godine. Investitori nuklearne elektrane bile su Savske elektrane Ljubljana i Elektroprivreda Zagreb, koje su s investicijskom skupinom obavile pripremne radove, raspisale natječaj i odabrale najpovoljnijega ponuđača.

U kolovozu 1974. investitori su sklopili ugovor o nabavi opreme i gradnji nuklearne elektrane snage 632 MW s američkim poduzećem Westinghouse Electric Corporation, projektant je bilo poduzeće Gilbert Associates Inc., izvođači radovi bila su domaća poduzeća Gradis i Hidroelektra, a montažu su obavili Hidromontaža i Đuro Đaković.

Prvoga prosinca 1974. položen je kamen temeljac Nuklearne elektrane Krško. U siječnju 1984. NEK je dobilo dozvolu za redovit rad.



Slika 2. 1975. – početak iskopavanja i građevinskih radova na gradilištu

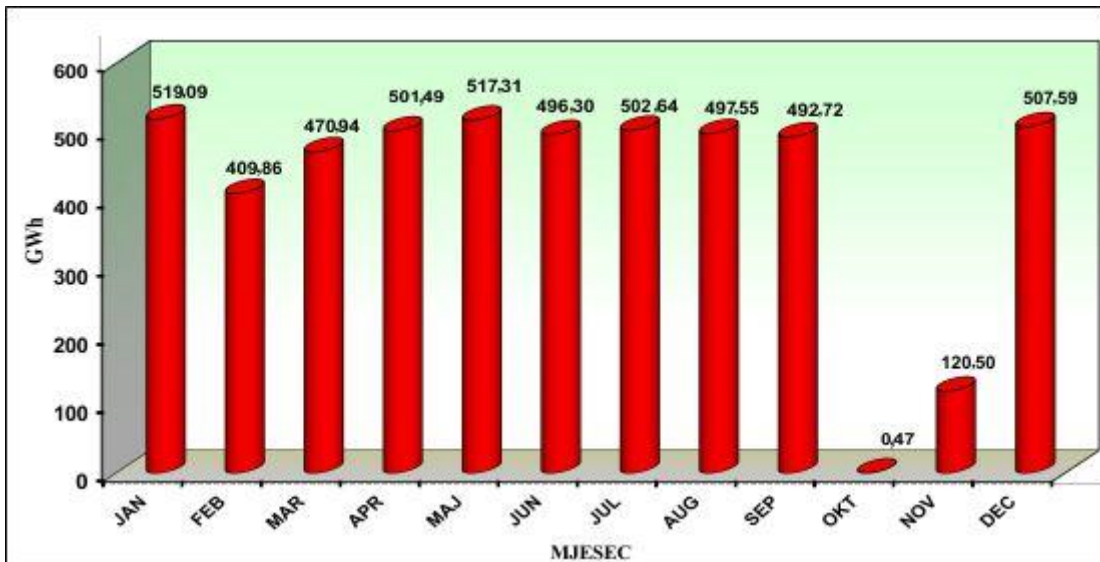
### **3. PROIZVODNJA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI KRŠKO**

NEK je opremljena Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom toplinske snage od 2000 MW. Njezina je snaga na pragu 696 MW. Elektrana je priključena na 400-kilovoltnu mrežu za napajanje potrošačkih središta u Sloveniji i Hrvatskoj.

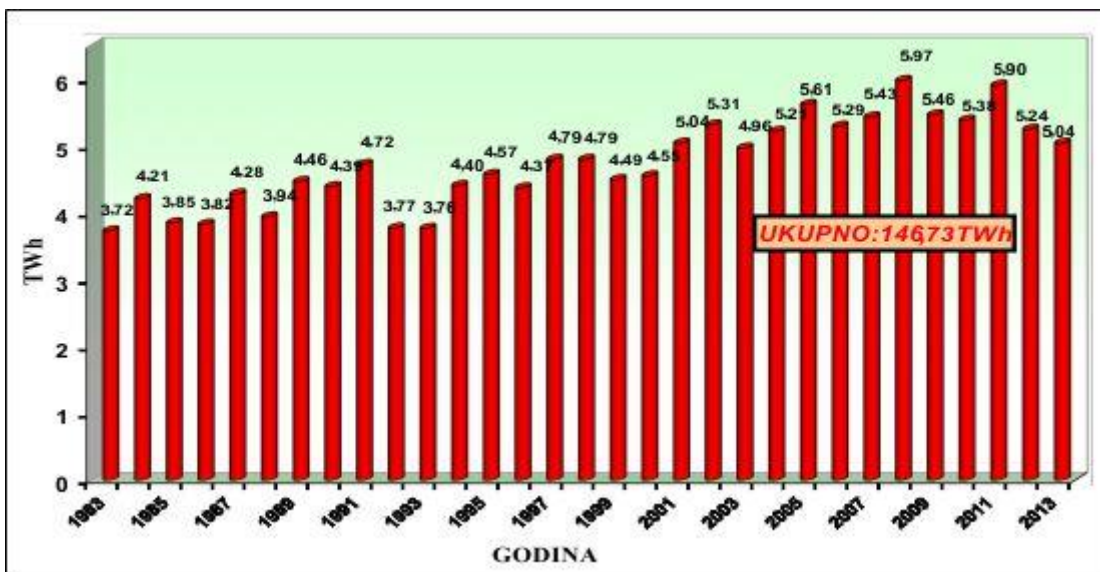
Godišnje proizvede više od pet milijardi kWh električne energije, što je 40 posto ukupno proizvedene električne energije u Sloveniji.

NEK s obzirom na svoje radne karakteristike pokriva osnovno opterećenje cijele godine. Osim toga, kao pouzdan izvor radne i jalove snage, važna je potporna točka elektroenergetskoga sustava u sklopu europske udruge ENTSO-E – Europska udruga sustavnih operatera prijenosne mreže. Važan je čimbenik u stabilizaciji kritičnih radnih stanja i odnosa napona, a posebno u slučaju velikih tranzijenata unutar ENTSO-E.

Poslovanje elektrane između dva remonta naziva se gorivni ciklus. Tijekom remonta dio istrošenoga goriva nadomješta se svježim, preventivno se pregledava oprema i zamjenjuju dijelovi, provjerava integritet materijala, obavlja kontrolna testiranja te korektivne mjere s obzirom na zatečeno stanje. 27. gorivni ciklus, koji je počeo priključivanjem elektrane na mrežu 19. novembra 2013, trajat će 18 mjeseci, što je radna smjernica elektrane za budućnost.



Tablica 1. Mjesečna proizvodnja električne energije u 2013. godini

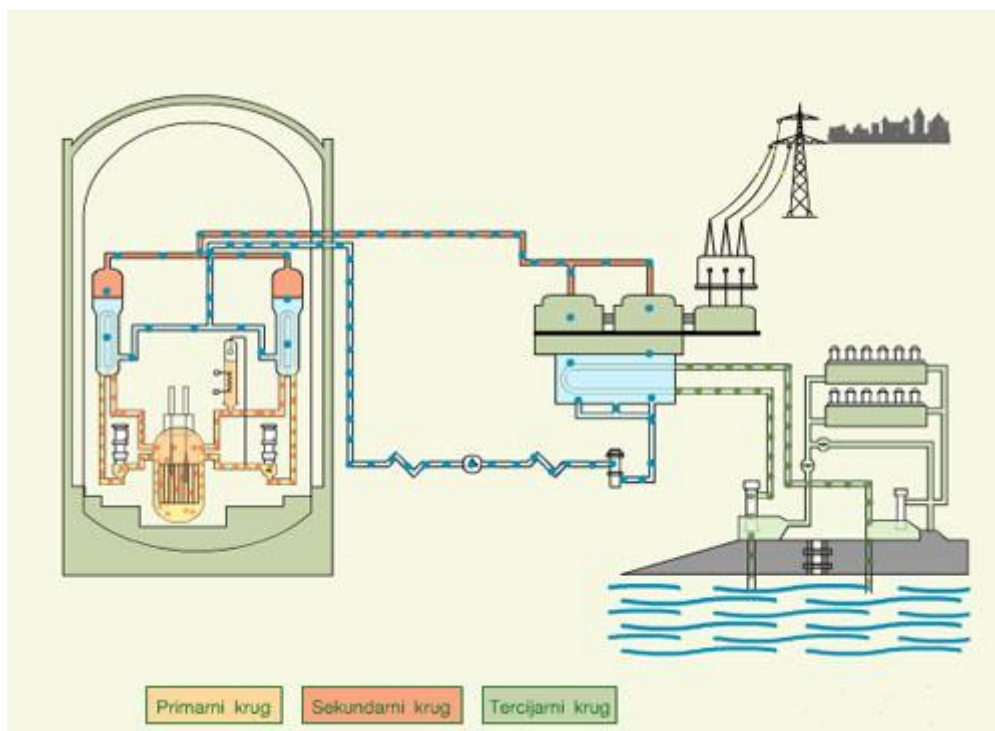


Tablica 2. Godišnja proizvodnja električne energije

## 4. RAD NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO

NEK radi slično kao klasična termoelektrana na fosilna goriva, iako izvor topline nije izgaranje ugljena ili plina, nego se toplina oslobađa pri cijepanju jezgri urana u reaktoru. Reaktor čine reaktorska posuda s gorivnim elementima, koji tvore jezgru reaktora. Kroz reaktor kruži pročišćena obična voda pod tlakom, koja odvodi oslobođenu toplinu u parogeneratore. U njima nastaje para koja pokreće turbinu, a ona pokreće električni generator. Sva oprema reaktora i pripadajućega primarnog rashladnog kruga smještena je u reaktorskoj je zgradi, koja se zbog svoje funkcije naziva i zaštitna zgrada.

Reaktorska posuda u kojoj su gorivni elementi tijekom rada je zatvorena. Za planiranu izmjenu goriva elektranu je potrebno zaustaviti. Razdoblje između dviju zamjena goriva naziva se gorivni ciklus, koji u NEK-u traje 18 mjeseci. Nakon završetka svakoga gorivnoga ciklusa istrošeni se gorivni elementi nadomjeste svježim.



Slika 3. Pojednostavljeni prikaz rada Nuklearne elektrane Krško

## 4.1. SUSTAV I RAD

Tehnološki dio nuklearne elektrane podijeljen je u tri osnovna termodinamička sklopa sustava:

- primarne
- sekundarne
- tercijarne.

Budući da u sva tri sklopa, međusobno odvojena, kruži voda, mogu se zbog lakšeg razumijevanja nazvati i krugovi. Prva su dva kruga zatvorena, a treći je, budući da za hlađenje pare koristimo savsku vodu, povezan s okolišem.

### 4.1.1. PRIMARNI KRUG

Primarni krug čine: reaktor, parogeneratori, reaktorske crpke, tlačnik i cjevovodi.

Toplina koja se oslobađa u jezgri reaktora zagrijava vodu koja kruži u primarnome krugu. Toplina vode se preko stijenki cijevi u parogeneratorima prenosi na vodu sekundarnoga kruga.

Reaktorske crpke omogućuju kruženje vode u primarnome krugu. Tlačnik održava tlak u primarnome krugu i sprečava vrenje vode u jezgri reaktora.

Sve komponente primarnoga kruga smještene su u zaštitnoj zgradi koja ima zadaću da u slučaju nezgode izolira primarni sustav od okoliša.

### 4.1.2. SEKUNDARNI KRUG

Sekundarni krug čine: parogeneratori, turbine, generator, kondenzator, napojne crpke i cjevovodi.

Parogeneratori su zapravo parni kotlovi u kojima od vode sekundarnoga kruga nastaje para koja se vodi u turbinu. U turbini se energija pare pretvara u mehaničku energiju.

Tu energiju generator pretvara u električnu energiju i preko transformatora je šalje na elektroenergetsku mrežu.

Iskorištena para iz turbine odvodi se u kondenzator i tamo se u dodiru s hladnim cijevima kondenzatora pretvara u vodu.

Crpke za napajanje potiskuju vodu iz kondenzatora natrag u parogenerator i tamo ponovno nastaje para.

#### 4.1.3. TERCIJARNI KRUG

Tercijarni krug čine: kondenzator, rashladne crpke rashladni tornjevi i cjevovodi.

Tercijarni krug namijenjen je odvođenju topline koja se ne može korisno upotrijebiti za proizvodnju električne energije i potreban je za hlađenje kondenzatora.

Rashladne crpke potiskuju savsku vodu u kondenzator te je vraćaju u Savu. Pri prolasku kroz kondenzator savska se voda zagrijava jer prima toplinu iskorištene pare.

Budući da zagrijavanje savske vode može utjecati na biološke značajke rijeke Save, upravna ograničenja određuju prirast temperature i udio oduzetoga toka. U slučaju nepovoljnih vremenskih uvjeta koriste se rashladni tornjevi. U iznimno nepovoljnim vremenskim uvjetima treba smanjiti snagu elektrane.

## 4.2 SIGURNOSNI SUSTAV

Sigurnosni sustavi onemogućuju nekontrolirano oslobađanje radioaktivnih tvari u okoliš. Nuklearnoj sigurnosti već je u fazi planiranja reaktora i projektiranja elektrane posvećena velika pozornost. Projektirani su zaštitni sustavi koji u svim radnim stanjima, čak i u slučaju otkazivanja određene opreme, osiguravaju zaštitne funkcije.

Nuklearna je elektrana u sigurnome stanju ako su u svakom trenutku ispunjena tri osnovna sigurnosna uvjeta:

- učinkovit nadzor nad snagom reaktora
- hlađenje nuklearnoga goriva u reaktoru
- zadržavanje radioaktivnih tvari (onemogućeno oslobađanje radioaktivnih tvari u okoliš).

Oslobađanje radioaktivnih tvari u okoliš sprečavaju četiri uzastopne sigurnosne pregrade:

- samo nuklearno gorivo (tablete nuklearnoga goriva), koje zadržava radioaktivne tvari u sebi,
- košuljica koja okružuje gorivne tablete i sprečava istjecanje radioaktivnih plinova iz goriva,
- granica primarnoga sustava (stijenke cijevi, reaktorske posude i drugih primarnih komponenti), koja zadržava radioaktivnu vodu za hlađenje reaktora,
- zaštitna zgrada koja hermetički odvaja primarni sustav od okoliša.

Osnovni je cilj prvih triju pregrada da onemoguće prelazak radioaktivnih tvari do sljedeće pregrade, a četvrta pregrada sprečava neposredno oslobađanje radioaktivnih tvari u okoliš nuklearne elektrane.

Budući da je rad sigurnosnih sustava u slučaju pogreške i otkazivanja, pa čak i malo vjerojatne nezgode u nuklearnoj elektrani, iznimno važan, svi su sigurnosni sustavi udvostručeni (nuklearna elektrana ima dvije linije sigurnosnih sustava). Za ispunjavanje sigurnosnih uvjeta i očuvanje sigurnosnih pregrada inače je dovoljno djelovanje samo jedne linije sigurnosnih sustava. Osim toga, svi se sigurnosni sustavi, odnosno njihovi pojedini uređaji, tijekom rada elektrane i za vrijeme redovitoga remonta sustavno testiraju.

## 5. NUKLEARNI REAKTOR

NEK je opremljen američkim Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom. Energija koja se oslobađa pri cijepanju jezgri u gorivnim elementima zagrijava primarno hladilo - običnu pročišćenu vodu. Ona kruži u zatvorenome primarnome krugu koji, osim reaktora, čine parogeneratori, reaktorske crpke, tlačnik i cjevovodi. Budući da je voda u primarnome krugu pod tlakom, ne pretvara se u paru unatoč visokoj temperaturi. Primarno hladilo preko stijenki cijevi parogeneratora prenosi toplinu sekundarnoj vodi i pretvara je u paru. Para za pogon turbine nastaje u parogeneratoru – izmjenjivaču topline između primarnoga i sekundarnoga kruga. Taj tip reaktora danas je najrašireniji u svijetu.

Nuklearni reaktor, osim reaktorske posude, čine primarni elementi: jezgra reaktora, voda koja je moderator i rashladno sredstvo te regulacijske šipke.

### JEZGRA REAKTORA

Jezgra reaktora u NEK-u sastoji se od 121 gorivnog elementa. Pojedini gorivni elementi sadrže izgorive neutronske apsorbere, a 33 sadrže neutronske apsorpcijske šipke koje se tijekom rada izvlače. U jezgri se odvija cijepanje fisijskih jezgri. Pri cijepanju u prosjeku nastanu dva do tri neutrona. Od neutrona nastalih pri cijepanju, samo jedan u prosjeku cijepa novu fisijsku jezgru, a preostali pobjegnu iz jezgre reaktora ili se skupljaju u gorivu, a tamo mogu tvoriti nove jezgre za cijepanje.

### MODERATOR I HLADILO

Pri cijepanju fisijskih jezgri oslobađaju se brzi neutroni. Vjerojatnost za cijepanje urana  $^{235}\text{U}$  tim je veća što je manja brzina neutrona. Zato neutrone treba usporiti. Proces usporavanja protječe u moderatoru. Brzi neutroni prije svega sudaranjem s lakšim jezgrama elemenata moderatora gube svoju energiju i tako se usporavaju, odnosno moderiraju. Obična voda za hlađenje u reaktoru NEK-a ima funkciju moderatora neutrona.



Pri cijepanju atoma goriva oslobađa se toplina koju je potrebno odvesti hladilom. U lakovodnome tlačnome reaktoru hladilo je obična pročišćena (demineralizirana) voda koja među ostalim ima dobre toplinske karakteristike i nisku cijenu. Reaktorsko hladilo ujedno je medij za prijenos topline na sekundarni krug.

## **REGULACIJSKE ŠIPKE I BOR U PRIMARNOME HLADILU**

Rad reaktora najjednostavnije se regulira utjecanjem na apsorpciju neutrona, odnosno na njihov broj u jezgri i time na rad, odnosno snagu reaktora. To se može postići promjenom koncentracije bora u primarnome hladilu ili regulacijskim šipkama, koje se spuštaju u jezgru reaktora ili se podižu iz nje. Naime, bor i kontrolne šipke, koje sadrže srebro, indij i kadmij, jaki su apsorberi termičkih neutrona.

## 6. NUKLEARNO GORIVO

Nuklearno je gorivo u NEK-u u obliku tableta uranovog dioksida, koje su složene u gorivne šipke u cijevima od cirkonijeve slitine. 235 gorivih šipki povezano je u gorivni element. U reaktoru je 121 gorivni element, koji sadrži 50 tona urana, od toga je približno 95 posto izotopa urana 238 i 5 posto izotopa urana 235. Pri cijepanju urana neutronima oslobađa se energija.

Uranova ruda kupuje se i kemijski prerađuje u inozemstvu, a gorivne elemente za NEK sastavlja poduzeće Westinghouse iz SAD-a.

Uran je vrlo težak, odnosno gust metal koji je 1789. godine otkrio njemački kemičar Martin Klaproth i nazvao ga prema planetu Uranu. Kemijski simbol je U, s rednim brojem 92. Redni broj jednak je broju elektrona u elektronskoj ovojnici atoma ili broju protona u jezgri i istodobno je redni broj elementa u periodnome sustavu. Uran je svjetlosiv metal specifične težine 18,9. Topi se na 1132 °C. Na zraku i u vodi vrlo brzo oksidira.

Uran, koji nalazimo u Zemljinoj kori u prosječnoj koncentraciji 2 g/tonu, u različitim je mineralnim oblicima. Glavne rude su uraninit i karnotit, javlja se i u bakrenim, zlatnim i fosfatnim rudama, a u niskim koncentracijama i u moru. Najzastupljeniji su uranovi izotopi u prirodi uran 238 (99,29 %) i uran 235 (0,71 %).

## 7. RADIOAKTIVNOST

Radioaktivnost ili radioaktivno zračenje je pojava kod pretvorbe atoma da iz njegove jezgre zrači čestice ili elektromagnetsko zračenje. Atomske jezgre nisu sve u stanju najniže energije, ali prirodna osnova jest da one teže, kao i svaki prirodni sustav stanju niže energije. Pri tome se takve jezgre raspadaju i oslobađaju višak energije emitiranjem čestica ili fotona koji su kvant elektromagnetskog zračenja. Kod pretvorbi atoma promatramo protone i neutrone u atomskoj jezgri i elektrone koji kruže u omotaču kao jednu cjelinu. Da bismo shvatili pojam radioaktivnosti moramo poznavati strukturu atoma. Atom, koji se još naziva i nuklid ima određen broj protona u jezgri( atomski broj  $Z$  koji ujedno u Mendeljejevom periodnom sustavu kemijskih elemenata označava redni broj ) i određen broj neutrona  $N$ . Neutralni atom koji je električki stabilan u omotaču ima jednak broj elektrona koliko i protona u jezgri tj.  $Z$  broj elektrona. Ako zbrojimo atomski broj  $Z$  i broj neutrona  $N$ (  $A=Z+N$  ) dobivamo nukleonski ili maseni broj atoma, pa kažemo da je atom obilježen s ta dva broja,  $A$  kao maseni i  $Z$  kao atomski broj. Mogući su slučajevi da uz isti broj protona u jezgri tj. isti element ima različit broj neutrona, pa to nazivamo izotopima nekog elementa. Izotopi su elementi istog atomskog, ali različitog masenog broja. Oni mogu biti stabilni i nestabilni izotopi. Stabilni izotopi se bez vanjskog djelovanja ne raspadaju, pa oni nisu radioaktivni, dok nestabilni izotopi se bez vanjskog djelovanja raspadaju sami od sebe, te su oni radioaktivni, tj. zrače radioaktivne čestice.

U prirodi susrećemo elemente s atomskim brojevima od  $Z=1$ (vodik) do  $Z=92$  (uran) s dva izuzetka, tehnecij ( $Z=43$ ) i prometij ( $Z=61$ ) koji se ne nalaze u prirodi. Dokazano je da svi elementi iznad atomskog broja  $Z=83$  se prirodno raspadaju, što znači da su svi radioaktivni. U prirodi također nalazimo 81 element s barem jednim stabilnim izotopom, tj. izotopom koji se vrlo polagano raspada i zanemariv je. Elementi s jednim stabilnim izotopom su berilij, fluor, aluminij dok ostali ih imaju više, neki čak 10 do 12. Nestabilni atomi imaju svojstvo da svojim raspadom emitiraju  $\alpha$ -čestice,  $\beta$ -čestice,  $\gamma$ -čestice (fotone) i neutrone, pa se takve emisije nazivaju radioaktivnim zračenjem. Pa krenimo redom, emitiranjem  $\alpha$ -čestica novonastali atom ima za četiri manji maseni broj i za dva manji atomski broj  $Z$  jer se  $\alpha$ -čestice sastoje od 2 protona i 2 neutrona što odgovara jezgri elementa helija. Pozitivnog su naboja. Promatranjem  $\beta$  zračenja vidimo da postoje dvije vrste  $\beta$  raspada:  $\beta^-$  raspad i  $\beta^+$  raspad. Kod  $\beta^-$  raspada jedan se neutron pretvara u jezgri u proton uz emisiju elektrona. U takvoj situaciji dobiva se pozitivno ionizirani atom jer je povećan broj protona, pa se povećava i atomski broj uz nepromijenjen

maseni broj. Kod  $\beta^+$  raspada događa se obratno. Jedan se proton u jezgri pretvara u neutron uz emisiju pozitrona. Dobivamo negativno ionizirani atom jer se broj protona smanjio za jedan, pa se smanjuje atomski broj, dok maseni broj ostaje nepromijenjen.  $\gamma$  zračenje može biti samostalno, a može biti dio  $\alpha$  i  $\beta$  zračenja. Karakterizira ga emisija elektromagnetskog zračenja (fotona) pri prijelazu atomske jezgre iz jednog kvantnog stanja u drugo. Emisija neutrona se pojavljuje pri raspadu teških jezgara.

Pošto je raspad jezgara nestabilnih atoma poprilično slučajna pojava, teško ju je promatrati i predvidjeti kad će se dogoditi. Isto tako na njihov raspad ne može se utjecati nikakvim vanjskim utjecajem što povećava problem. No, međutim statistički podaci pokazuju točno određenu brzinu i broj jezgara koje će se raspasti karakteristično za svaki radioaktivni element. Ta brzina se određuje vremenom poluraspada  $T$  koje označava vrijeme potrebno da se raspadne polovica jezgara koje su postojale u trenutku početka promatranja čime se taj problem sužava.

## 7.1. DJELOVANJE ZRAČENJA NA ORGANIZAM

Kada smo pojasnili sve osnovne pojmove i mjerne jedinice vezane uz radioaktivnost i radioaktivno zračenje, pojasnit ćemo i pokazati njegova djelovanja na živom tj. ljudskom organizmu.

Ionizacijom ili pretvorbom atoma u živoj stanici zračenje koje on proizvodi štetno djeluje na samu stanicu, pa nadalje na tkivo, organ i cijeli organizam. Zračenje može u stanici prouzrokovati razne poremećaje poput promjene funkcije stanice, promjene u diobi stanice, promjene gena, pa čak i samu smrt stanice. U većini slučajeva zračenje ima štetno djelovanje na tkivo, te samim tim i na organ i organizam, dok je prava rijetkost da je to djelovanje korisno uz upravljano i nadzirano ozračivanje organizma. Ispitivanjima znanstvenika uočeno je da su na zračenje osjetljivija ona tkiva u kojima se odvija brža pretvorba stanica. Među najosjetljivijima spadaju: koštana moždina, limfno tkivo i spolne žlijezde, dok su nešto manje osjetljiviji koža, kosti i crijeva. Suprotno, dakle ona tkiva koja su mnogo manje osjetljiva na djelovanje zračenja su: jetra, bubrezi i mozak jer se oni sastoje od stanica koje se vrlo malo ili nikako ne dijele. Najotporniji na zračenje očituju se: mišići, te spojna i masna tkiva. Kada govorimo o djeljivim stanicama, podaci nam kažu da apsorbirana doza zračenja od 2 Gy smanjuje broj umnoženih stanica za 50%, a pri apsorbiranoj dozi zračenja od 8 Gy broj djeljivo sposobnih stanica pada na vrlo malih 1%.

Ukupan učinak zračenja na ljudski organizam dijeli se u dvije komponente i to somatski i genetski učinak. **Somatski učinak** za ozračenu osobu može imati neposredne i dugoročne posljedice. Neposredne su posljedice iskvarena krvna slika i oštećenje kože, a dugoročne su: leukemija, rak pluća, štitne žlijezde, dojke, smanjenje plodnosti i skraćanje života. Učinak zračenja u ovom slučaju ne ovisi samo o apsorbiranoj dozi, već i o trajanju ozračivanja, te je li to ozračivanje jednokratno ili višekratno. Svojstvo nekog učinka, npr. kod leukemije je da i uz male i rijetke doze nema oporavka tkiva već se djelovanje doze u njemu akumulira. **Genetski učinak** za razliku od somatskog djeluje na potomstvo oštećujući roditeljeve rasplodne stanice i sami plod i uzrokuje mutacije gena. Postoje dokazi koji pokazuju veću opasnost pri manjim dozama ozračivanja jer se njima uzrokuju mutacije koje se prenose na dalje potomstvo, dok veće doze ozračivanja, istina uzrokuju velika oštećenja, pa i smrt jedinke, ali se nasljedni niz u tim slučajevima prekida, tj. ne prenosi se na potomstvo. Prema tome pokazat ćemo niz posljedica koje se pojavljuju na ljudskom organizmu kad je on cjelovito ozračen, ovisno o apsorbiranoj dozi. Dakle, pri apsorbiranoj dozi od 0,5 Gy ne osjećaju se

nikakve posljedice, a pri apsorbiranoj dozi od 0,8 do 1,2 Gy 10% ispitanih osjećati će jedan dan mučninu i umor. Pri apsorbiranoj dozi od oko 1,8 Gy 25% ispitanih će imati mučninu i povraćanje, ali bez očekivanja smrtnog slučaja. Kod apsorbiranih doza od 2,7 do 3,3 Gy gotovo svi ozračeni imaju mučninu i povraćaju, te se očekuje oko 20% smrtnih slučajeva u roku od 2 do 6 mjeseci. Već kod apsorbirane doze od 5 Gy treba očekivati 50% smrtnih slučajeva tijekom prvog mjeseca nakon ozračenja, a pri apsorbiranoj dozi od 10 Gy vjerojatno je da nitko neće preživjeti .

Na poslijetku pri apsorbiranoj dozi od 50 Gy trenutna je pojava najtežeg oboljenja i smrt svih ozračenih tijekom prvog dana. Do sada u prošlosti najveće ozračenosti ljudi zabilježene su prilikom eksplozije nuklearnog reaktora u sovjetskoj nuklearnoj elektrani Černobilj (ispljučući eksplozije dviju nuklearnih bombi u Japanu potkraj drugog svjetskog rata) gdje je 187 osoba bilo ozračeno ekvivalentnom dozom od 1 Sv ili više. Od njih je 29 osoba umrlo tijekom šest mjeseci, a bili su ozračeni rekordnim ekvivalentnim dozama od 8 i 16 Sv

## 7.2. DOPUŠTENE DOZE I PROSJEČNA OZRAČENOST LJUDI

Da bi uopće mogli iskazati dopuštene doze zračenja i kolika je zapravo prosječna ozračenost ljudi moramo poznavati izvor, intenzitet, djelovanje i vrste zračenja u našem okolišu. Obrazložiti ćemo neke opće činjenice o zračenju i proučiti razliku između prirodnog i umjetnog zračenja.

Zračenje prožima cijeli svemir, pa tako i naš planet Zemlju zbog nuklearnih procesa koji se odvijaju u zvijezdama, pa tako i u našoj najbližoj Suncu koje osim svjetlosnih zraka i topline Zemlju obasipa zračenjem. Prirodni radionuklidi nalaze se u svim tvarima na Zemlji, a isto tako i u svim živim bićima koji obilno ozračuju okoliš, kao i sve živo na planetu. Osim toga povećanje zračenja iznad prirodne razine uzrokuje sam čovjek rabeći umjetne izvore zračenja koji se koriste u medicini, energetici, znanosti i ratnoj tehnici. Povećanje ljudske ozračenosti uzrokuju i neke nehotične stvari poput leta avionom i zadržavanjem na mjestima velike nadmorske visine jer je primljena doza zračenja mnogo veća na takvim mjestima nego uz priobalje. Nezamislivo je, ali čak i hrana i piće koje unosimo u organizam sadrže radioaktivne nuklide koji nas ozračuju iznad prirodne razine.

Kao najintenzivnije **prirodno zračenje** odlikuje se zračenje iz svemira. Njega jednim velikim dijelom apsorbira, tj. upija Zemljina atmosfera, pa tako na površinu Zemlje uglavnom dopijevaju elektroni, a rjeđe teže čestice poput neutrona. Ipak zbog visokog faktora kvalitete utjecaj neutrona dakako ne smijemo zanemariti. Najmanja ekvivalentna doza zračenja koje pristiže iz svemira jest na razini mora i iznosi 0,034  $\mu\text{Sv/h}$ , odnosno kad se preračuna u godišnju ekvivalentnu dozu 0,3 mSv/g. Povećanjem nadmorske visine povećava se i ozračenje jer atmosfera slabije apsorbira na većim nadmorskim visinama. Pošto je srednja nadmorska na Zemlji 700 m, uzima se da prosječna ekvivalentna doza iznosi 0,38 mSv/g što je za 27% više od ekvivalentne doze na razini mora. Mnogo veća su ozračenja primjerice na visinama od 10 km gdje je ekvivalentna doza veća 90 puta od one na razini mora. Osim zračenja iz svemira itekako utječe i zračenje iz tla. Ono ovisi o količini radioaktivnih elemenata u njemu kao što su uran U-238, torij Th-232 i kalij K-40.  $\alpha$  i  $\beta$  zračenje se apsorbira već par centimetara nad tlom, a veći učinak imaju samo  $\gamma$  zrake koje djeluju na većim visinama. Prosječna ekvivalentna doza zračenja iz tla iznosi 0,5 mSv/g. Međutim, na nekim područjima na Zemlji zbog vrlo visokih koncentracija prirodnih radionuklida u tlu prosječna doza

se premašuje i po nekoliko stotina puta. Tako u Kerali u Indiji ekvivalentna doza zračenja iz tla iznosi od 40-80 mSv/g, dok u Ramsaru u Iranu ta doza doseže i do 450 mSv/g. Unatoč svemu tome, ta područja su izrazito naseljena. Građevni materijal od kojeg su izgrađene suvremene stambene zgrade također zrači jer sadrži prirodne radionuklide. Među njima se ističu granit i opeka od troske, dok drvo naprotiv ne samo da ne zrači već i apsorbira zračenje te se preporučuje sve više u građevinarstvu. Prosječna doza zračenja iz zidova stambenih zgrada iznosi 0,7 mSv/g.

U svim živim bićima, pa tako i u ljudskom tijelu ima mnogo prirodnih radionuklida koji zrače, pa se to naziva unutrašnje zračenje na kojeg čovjek ne može nikako utjecati. Na intenzivnost unutrašnjeg zračenja utječu radionuklidi iz uranova i torijeva niza. Kao najvažniji iz uranova niza spomenut ćemo radon Rn-222 koji je radioaktivan plin, a nalazi se u zraku i vodi. On je glavni unutrašnji ozračivač tijela jer ga stalno unosimo u tijelo disanjem i pitkom vodom. Izračunato je da ekvivalentna godišnja doza ozračenja od udisanja radona iznosi 1 mSv/g, a može biti i nešto viša ako duže boravimo u zatvorenim prostorijama gdje mu je koncentracija veća. Kalij K-40 je također vrlo važan element u ljudskom organizmu zbog unutrašnjeg ozračenja. Iako je njegov udio u ljudskom tijelu vrlo malen, on ipak stvara ekvivalentnu dozu ozračenja od 0,18 mSv/g što je jednako gotovo dozi koju primamo iz svemira. Radionuklidi koji pristižu iz svemirskog zračenja dijelom ostaju u zraku, a dijelom se rasprše u tlo i vodu. Odatle oni stižu u žive organizme hranom i pićem, te disanjem. Najvažniji od njih su: tricij H-3, berilij Be-7, ugljik C-14 i natrij Na-22.

**Umjetno zračenje** uzrokuju mnogobrojni uređaji( uglavnom u medicini ) koji sami zrače, te koncentrirane ili raznesene prirodne i umjetne radioaktivne tvari. Kao najopasnije ističu se raznesene radioaktivne tvari koje nastaju nuklearnim eksplozijama, otpadom iz nuklearnih elektrana i industrije. Spominjajući zračenje u medicini, ono se najviše koristi u dijagnostici i terapiji. Ekvivalentna doza zračenja u dijagnostici razvijenih zemalja varira između 0,25 i 2 mSv/g te se procjenjuje da je srednja vrijednost 0,3 mSv/g s značajnom tendencijom smanjivanja. Kod terapija stvar je mnogo opasnija zbog vrlo visokih doza zračenja organa i tkiva koji iznose od 10 do 70 Sv. Zbog rijetkih korištenja takvih terapija srednja ekvivalentna doza je skoro zanemariva. Kod razmatranja ozračivanja stanovništva ljudskim djelovanjem važno je ne zanemariti pokusne nuklearne eksplozije u atmosferi kojih je izvedeno 430 do danas. Zbog takve opasnosti ozračivanjem ti se pokusi sve više provode pod zemljom. Posljedice nuklearnih eksplozija u atmosferi su stvaranje primarnih( otpadni radionuklidi od nuklearnog goriva u bombama ) i sekundarnih( tricij



H-3 i ugljik C-14 ) radionuklida koji su vrlo opasni, a neki od njih imaju dosta duga vremena poluraspada poput izotopa ugljika C-14 kojemu je vrijeme poluraspada 5730 godina. Ekvivalentna doza zračenja nastala nuklearnim pokusima na njihovom vrhuncu krajem šezdesetih godina iznosila je 5 mSv/g, dok je danas ta doza ipak mnogo manja te iznosi 0,05 mSv/g. Ta ekvivalentna doza je i dalje ostala utjecajem ugljika C-14 koji će još mnoge naraštaje ozračivati i prenositi oko 75% postojeće doze na buduće generacije. Izvor umjetnog zračenja je i samo ljudsko tijelo jer su i u njemu ugrađeni mnogi radionuklidi. Stojeći blizu drugog čovjeka, u kući, uredu, školi, prometu dobivamo godišnju dozu ozračenja uzrokovanu zračenjem ljudi. Ona iznosi od 0,12 do 0,15  $\mu$ Sv/g, a najviše u iznimnim situacijama može doseći 0,01 mSv/g.

Naposljetku kad se u obzir uzme sveukupna ozračenost, ukupna prosječna ekvivalentna doza ozračenosti ljudi iznosi 2,4 mSv/g. Od toga 85% otpada na prirodno, a ostatak na umjetno zračenje. Ne računajući unutrašnje zračenje, ukupna ekvivalentna doza ozračenja iznosi 1,4 mSv/g gdje 70% otpada na prirodno, a 30% na umjetno zračenje.

Govoreći o tome kolike su zapravo **dopuštene doze zračenja**, teško je postaviti jer pri zračenju vrlo malim dozama djelovanja su neznatna i teško ih je ustvrditi. Dakako da u takvim slučajevima nije moguća statistička obrada, ni neposredno promatranje, ni epidemijsko djelovanje, pa se dopuštene doze zračenja i njihov utjecaj temelji na teorijskim postavkama. Kažemo da su norme za zaštitu od zračenja stvar procjene, što ne znači da ih smijemo zanemariti i da u njihovo postavljanje nije uloženo mnogo truda. Glavna udruga koja je popisala te norme na međunarodnom planu je ICRP, a maksimalno dopuštene doze zračenja koje preporuča su:

- 5 mSv/g za spolne organe i koštanu srž
- 15 mSv/g za ostale organe pojedinačno, te za štitnu žlijezdu djece
- 30 mSv/g za kožu, kosti i štitnu žlijezdu
- 75 mSv/g za ruke i noge

Za osoblje i radnike u nuklearnoj elektrani zbog velikih doza zračenja također su donesene neke norme. Osoblje u nuklearnim elektranama dijeli se u dva dijela: osoblje u nuklearnom postrojenju elektrane( postoji mogućnost ozračenja ekvivalentnom dozom od 15 mSv/g ) i osoblje u konvencionalnom postrojenju elektrane( postoji mogućnost ozračenja ekvivalentnom dozom od 5 mSv/g ). Prema tome donesen je propis u kojem je dopuštena ekvivalentna doza ozračenja maksimalno 50 mSv u toku 30 godina. U krugu elektrane dopuštena ekvivalentna doza ne smije iznositi iznad 60  $\mu$ Sv/g od prirodne razine. Na većim udaljenostima od elektrane doza poprilično opada, pa primjerice na udaljenosti 1 km od elektrane ekvivalentna doza iznosi svega 1  $\mu$ Sv/g.



Slika 4. Znak za opasnost od radioaktivnosti

## 8. RADIOAKTIVNOST U NUKLEARNOJ ELEKTRANI

Razlikujemo dva izvora radioaktivnog zračenja u nuklearnoj elektrani, a to su: primarni produkti raspadanja nuklearnog goriva i jezgre koje su aktivirane apsorpcijom neutrona u rashladnom mediju. Oni predstavljaju problem pri pogonu nuklearne elektrane, te se ona mehanički konstrukcijom brani od štetnih utjecaja radioaktivnosti. Primarni produkti raspadanja nuklearnog goriva i produkti njegovog naknadnog raspadanja najviše ostaju u gorivim elementima, dok samo mali dio u rashladno sredstvo.



Slika 5. Nuklearna elektrana kod koje se plinoviti i tekući otpaci ispuštaju u okolinu

U uređajima za pročišćavanje rashladnog sredstva izlučuju se radioaktivni izotopi iz rashladnog sredstva, te dio njih zbog malih propusta u konstrukciji izlazi u okolinu. Posljedica pročišćavanja rashladnog medija jesu plinoviti i tekući otpaci koji se ispuštaju u okoliš.

Raspodjela aktivnosti zračenja u elektrani nije svugdje jednaka, pa razlikujemo četiri različite zone:

- gorivi elementi s košuljicama kao barijerom
- primarni krug rashladnog sredstva s reaktorskom posudom i cjevovodima kao barijerama aktivnosti
- prostor postrojenja s biološkim štitom kao barijerom
- pogonske prostorije s reaktorskom zgradom kao barijerom



Slika 6. Obrambeni sustav nuklearne elektrane od radioaktivnog zračenja

U postrojenju nuklearne elektrane nalazi se reaktorska posuda, zatim generatori pare i pumpe rashladnog sredstva koji su izrazito ozračeni. Pogonske prostorije su od postrojenja odijeljene biološkim štitom kako bi spriječio prodiranje zračenja u ostale dijelove nuklearne elektrane. Ipak su i u pogonskim prostorijama prisutne male aktivnosti zračenja zbog posljedice raspadanja u gorivim elementima smještenima u bazenu gorivih elemenata. U ostalim dijelovima elektrane izvan reaktorske zgrade poput strojarnice i rasklopnih postrojenja zračenja skoro i nema. Zaključno prikazat ćemo vrijednosti aktivnosti zračenja u pojedinim prostorijama reaktorske zgrade i uvidjeti koncentracije aktivnosti u njima. U samom rashladnom sredstvu aktivnost zračenja iznosi  $1,9 \cdot 10^{12}$  Bq/m<sup>3</sup>, u postrojenju  $1,0 \cdot 10^6$  Bq/m<sup>3</sup>, dok u pogonskim prostorijama pada na takve prilike mali iznos od 4 do 40 Bq/m<sup>3</sup>.

## 9. RADIOAKTIVNI OTPAD I OBUSTAVA RADA NUKLEARNE ELEKTRANE

Kao što smo već spomenuli zbrinjavanje radioaktivnog otpada i problem obustavljene nuklearne elektrane jest široka tema i o njima se u svijetu vode mnogobrojne rasprave. Da bismo razumjeli problem radioaktivnog otpada objasniti ćemo njegove opće značajke i konačna odlaganja radioaktivnog otpada u okolišu.

**Radioaktivni otpad** nastaje kad se potrošeno nuklearno gorivo vadi iz nuklearnog reaktora, te se ono iz njega odlaže tako da se spontanim radioaktivnim raspadanjem smjese izotopa ne ugrozi okoliš. Problem nastaje jer smjesa istrošenog goriva i dalje zrači, dakako sve manje i manje, ali zna dosegnuti vremenski period od nekoliko stoljeća, pa zbrinjavanje radioaktivnog otpada seže u daleku budućnost. Upravo ova činjenica se upotrebljava kao argument protiv izgradnje nuklearnih elektrana. Kao usporedba koriste se podaci o zagađivanju okoliša i atmosfere iz jedne termoelektrane ložene ugljenom. Za njezinu godišnju proizvodnju potrebno je prvenstveno 3 do 5 milijuna tona ugljena. Izgaranjem tolike količine ugljena u atmosferu se emitira 9 do 13 milijuna tona ugljik-dioksida, te još sa sumporom 120 do 200 tisuća tona sumpor-dioksida godišnje. Osim toga potrebno je zbrinuti 500 tisuća tona pepela uz emisiju u atmosferu oko 10 tisuća tona godišnje. Utjecaj zagađenja okoliša jedne ovakve termoelektrane sigurno nije zanemariv. Uostalom smrtnost radnika je mnogo veća zbog ogromnih količina sumpor-dioksida i iznosi od 2 do 100 smrtnih slučajeva na godinu.



Slika 7. Dokaz za prednost nuklearnih elektrana s obzirom na transport goriva i zagađenje okoliša

Nasuprot tome, kod nuklearnih elektrana, ovisnost efekta zračenja o dozi zračenja vrlo je poznata, pa se svako zračenje može na vrijeme detektirati i omogućena je kontrola svakog poremećaja pri odlaganju radioaktivnog otpada. Bez obzira što su štetne materije iz otpada termoelektrane 300 tisuća puta veće od otpada iz nuklearne elektrane, radioaktivni otpad ne smijemo potcijenjivati, pogotovo jer se njegova opasnost proteže u budućnost. Istrošeno gorivo tokom rada proizvede mnoge proizvode raspada među kojima se ističu plutonij i izotop urana U-238. Treba voditi računa da su svi materijali u istrošenom gorivu radioaktivni, te da se spontano raspadaju i nakon što je gorivo izvađeno iz reaktora. Sastoji se od smjese različitih radioaktivnih izotopa s vrlo kratkim ili vrlo dugim vremenom poluraspada. U ovakvim reakcijama oslobađaju se goleme količine topline, te se zbog toga istrošeno gorivo mora nekoliko mjeseci hladiti prije bilo kakvog postupka s njim. Hlađenje se provodi u dubokim bazenima gdje se gorivo nalazi ispod sloja od nekoliko metara vode. Voda u tom slučaju služi i kao sredstvo hlađenja i kao zaštita od radioaktivnog zračenja. Gorivo koje je odležalo više godina u tim bazenima može se spremati i u suha spremišta jer više nije potrebno tako efikasno hlađenje budući da razvijena toplina s vremenom postaje sve manja. Dakle prije konačnog odlaganja treba preraditi istrošeno gorivo da bi se iz istrošnog goriva iskoristio plutonij i izotopi urana koji bi poslužili kao gorivo za nove reaktore i da bi se smanjila količina radioaktivnih otpadaka koje treba konačno odložiti u posebna spremišta.



Slika 9. Voda kao zaštita od radioaktivnog zračenja istrošenog goriva



Slika 8. NE s brzim oplodnim reaktorom.

Zaključno ćemo proanalizirati problem konačnog odlaganja radioaktivnog otpada i uvidjeti razne metode i pokušaje njegova trajnog zbrinjavanja.

Konačno se odlažu posljednji proizvodi fisije nakon prerade nuklearnog goriva, od kojih u nuklearnom otpadu ostaju manje količine urana i plutonija. Njihova vremena poluraspada su relativno kratka, te biološku opasnost predstavljaju tada cezij Cs-137 i stroncij Sr-90, kod kojih se bitno smanjenje aktivnosti pojavljuje tek nakon 700 godina. Zbog svega toga treba pronaći konačno odlaganje radioaktivnog otpada kako radioaktivni izotopi ne bi predstavljali biološku opasnost. Pojavile su se razne metode, a spomenut ćemo i obrazložiti ih nekoliko.

Odlaganje radioaktivnog otpada u oceanske dubine vrijedi samo ako spremnik otpada predstavlja veliko osiguranje jer zbog agresivnosti morske vode spremnik može popustiti. Kad bi se oslobodili radioaktivni izotopi iz spremnika vrlo lako bi ušli u prirodni prehrambeni ciklus. Razmatrala se i mogućnost odlaganja radioaktivnog otpada u oceanske tektonske rovove, tj. između kontinentalnih ploča na Zemlji, ali zbog nedovoljne istraženosti tog procesa odustalo se od takvog prijedloga. Isprva se mislilo da je metoda odlaganja radioaktivnog otpada u antarktički led izvrsna ideja jer je ledena površina ogromna i nema naseljenih područja, međutim taj prijedlog ruši nekoliko činjenica. Antarktički led nije geološki stara formacija, prilike na dnu ledenog pokrova nisu dovoljno poznate i svakih 10 000 godina se javljaju ubrzane kretnje leda. Uostalom kad bi spremnici prodrli do dna leda, postoji mogućnost stvaranja kapljevito sloja koji bi uzrokovao nestabilnosti. Što se tiče metode izvanzemaljskog otpremanja radioaktivnog otpada, koristeći se raketama mogao bi se otpremiti samo manji dio otpada jer bi trošak bio vrlo visok. Spremnik bi također morao biti konstruiran na način da u slučaju neuspjelog lansiranja onemogući oslobađanje radioaktivnosti. Na kraju, najveće izgleda za trajno odlaganje radioaktivnog otpada ima odlaganje u stabilne geološke formacije, gdje nema podzemnih voda. Za to su pogodna ležišta soli, graniti, neke vrste škrljavaca i karbonata. Pohranjivanje radioaktivnog otpada moguće je u stijene koje se nalaze više stotina metara ispod površine. Međutim trajnost posuda u kojima bi se odlagao otpad ne bi bio dovoljno dug za razdoblje od 700 godina koliko je potrebno da se smanji aktivnost nuklearnog otpada. Za osiguranje dugoživućih izotopa potrebno je mnogo dulje vrijeme. Širenje te radioaktivnosti tijekom daljnjih godina ovisi o prirodnim putovima i uvjetima, o prisustvu vode, topljivosti radioaktivnog otpada, propusnosti stijena itd. Za primjer je uzeto vrijeme potrebno da se neki izotopi iz

podzemnih voda probiju na površinu, pa tako cezij Cs-137 je 1000 puta sporiji od ekvivalentne brzine koja iznosi 100 godina, americij i plutonij su 10 000 puta sporiji, a radij 100 tisuća puta sporiji. Primjerice jod I-129 i tehnecij Tc-99 su takvi izotopi koji mogu stići do površine za vrijeme manje od tisuću godina. Zbog svega ovoga zaključuje se da se može uspješno izolirati radioaktivni otpad za dugo vremensko razdoblje. Prilike bi se još bitnije popravile kad bi se na spremnik nanio zaštitni sloj od titana ili olova. Odlaganje radioaktivnog otpada u stabilne geološke formacije potvrdila je i *Međunarodna agencija za atomsku energiju* koja smatra da podzemno odlaganje radioaktivnog otpada pruža čovjeku i okolišu sigurnost od ikakvog potencijalnog rizika.

Uz odlaganje radioaktivnog otpada suočavamo se i s problemom **obustave rada** nuklearne elektrane. Iz obustavljene elektrane ozračeno gorivo se nosi na preradu, ne samo iz sigurnosnih već i ekonomskih razloga. Dijelovi koji nisu pod utjecajem radioaktivnog zračenja se koriste u ostale svrhe. Ostaje praktički samo reaktorska posuda, dijelovi primarnog kruga i betonski štit oko reaktorske zgrade. Kako se ona dalje razgrađuje prikazala je Američka nuklearna regulatorna komisija preko tri scenarija. Prvi scenarij DECON podrazumijeva uklanjanje svih radioaktivnih materijala s lokacije nuklearnog objekta kako bi se omogućila daljnja upotreba prostora.

Vrijeme trajanja procjenjuje se na 15 godina. Drugi scenarij SAFSTOR se sastoji u sigurnom zatvaranju elektrane na određeno vrijeme dok se ne steknu uvjeti za njezinu potpunu razgradnju. Period izolacije predviđa se na 40 godina. Scenarij ENTOMB podrazumijeva djelomično uklanjanje radioaktivnih materijala uz dugoročni nadzor lokacije. Preostali dijelovi se prekriju u betonskoj strukturi da se spriječi radioaktivno zračenje sve dok se ne osiguraju uvjeti za potpunu razgradnju. Trajanje scenarija procjenjuje se na 110 godina.





Slika 10. NE pri obustavi rada scenarijem SAFSTOR



Slika 11. Primjer nuklearne elektrane izgrađene uz obradivu površinu

## 10. KVAROVI U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA I POSLJEDICE NA OKOLIŠ

Od intenzivnijeg djelovanja nuklearnih elektrana, dakle početkom šezdesetih godina zabilježena su dva veća kvara u nuklearnim elektranama. To je kvar u nuklearnoj elektrani *Otok tri milje* u SAD-u 1979. godine i kvar u nuklearnoj elektrani *Černobil* u Ukrajini 1986. godine. Razmotrit ćemo ih i ukratko opisati te uvidjeti kakve su posljedice takvih događaja na čovjeka i okoliš.

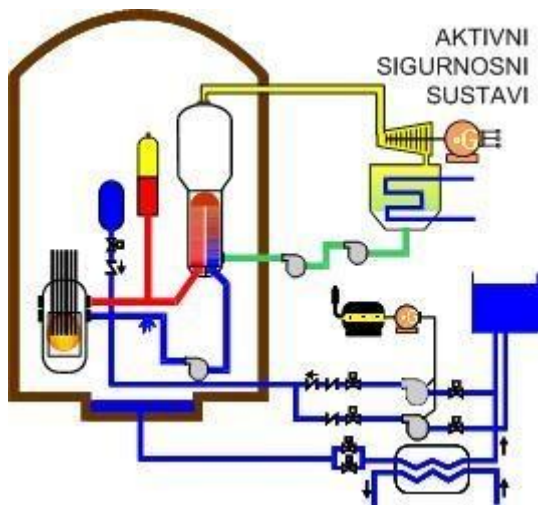
U nuklearnoj elektrani *Otok tri milje* glavni dovod rashladne vode koji odvodi toplinu iz reaktora prestao je funkcionirati. Zbunjujućim djelovanjima osoblja elektrane, pomoćni rashladni sistem je prekasno stavljen u pogon, što je uzrokovalo povišenje temperature i tlaka primarnog rashladnog medija. Jedan od operatora je automatski morao zatvoriti ventil tlačnika, ali je to učinjeno tek 2 sata poslije. U tom vremenu u tlačniku se podigla razina vode koja je posljedica dotjecanja vode i pare, te je primarni sistem ostao opasno prepun vode. Sistem je stavljen izvan pogona, uz istodobno otvaranje odvoda vode iz reaktora, te je jezgra ostala bez hlađenja. Jezgra se pregrijala, te je kao takva predstavljala veliku opasnost da ne eksplodira, ali je ipak na kraju uspješno potopljena borovom vodom nakon kvara. Prema proračunima radioaktivna voda je isпустиła radioaktivnost od  $9 \cdot 10^6$  Bq plemenitih plinova i  $5 \cdot 10^{11}$  Bq jodida. Stanovništvo nije bilo značajnije ugroženo jer je proračunato da je pojedini stanovnik bio ozračen do maksimalno  $15 \mu\text{Sv}$  što je manje od 0,1% ekvivalentne godišnje doze zračenja.

Mnogo štetnije posljedice uzrokovao je kvar u nuklearnoj elektrani Černobilj. Kvar je nastao na grafitnom reaktoru snage 1000 MW. Dakle, sve je krenulo pokusom korištenja novog tipa turbogeneratorske jedinice za tjeranje rashladne vode za hlađenje reaktorske jezgre. Da bi reaktor bio spreman za pokus smanjeno mu je njegovo opterećenje na polovičnu vrijednost. Ekpa koja je obavljala pokus u elektrani je trebala nastaviti smanjivati snagu reaktora da bude spreman preuzet nepredviđeno moguće (nastalo) opterećenje turbogeneratorske jedinice, a osim toga je i zaboravila uključiti uređaje za kontrolu stanja u reaktoru kod malih opterećenja reaktora. Snaga je reaktora naposljetku smanjena na 1% ukupnog opterećenja, te da se ponovo vrati na snagu koja je potrebna za pokus, izvučeno je nekoliko kontrolnih šipki. To je uglavnom bio presudno krivi potez jer se dotok vode pri pokusu povećao, a snaga reaktora se nastavila smanjivati sve do obustave lančanih reakcija u jezgri. Operatori su zbog toga izvukli još kontrolnih šipki iz reaktorske jezgre čime se prešla svaka mjera.

Oslobođena energija u reaktoru je počela nekontrolirano rasti, dobava vode u reaktor je smanjena zbog uzroka pokusa koji je predviđao prekid opskrbe pumpa električnom energijom, intenzivnost lančane reakcije je povećan zbog prodora mjehurića u rektor.

Spriječiti povećanje snage moglo se samo obustavom rada reaktora, ali je već tada bilo prekasno jer je snaga u 4 sekunde povećana za 100 puta u odnosu na normalnu snagu. Operatori su osjetili snažan udar. U tom trenutku začule su se dvije eksplozije koje su izbacile užareni materijal iznad reaktorske zgrade koji je izazvao niz požara. Prvu eksploziju uzrokovalo je gorivo od uran-oksida koje se rastalilo pri temperaturi od 3000°C. Drugu eksploziju uzrokovao je vodik proizveden tokom zagrijavanja kemijskim reakcijama. Grafit koji je služio kao moderator, došao je u doticaj sa zrakom i počeo je gorjeti. Plinovi koji su izgarali i ugrijani zrak sa sobom su u atmosferu ponijeli radioaktivne produkte jer oko reaktora nije postojao biološki štiti koji bi to spriječio. Naglašena je i činjenica da eksplozija nije jednaka ni blizu eksploziji nuklearne bombe i da je požar zahvatio čitavu reaktorsku zgradu. Što se tiče unesrećenih, najviše ih je bilo među osobljem elektrane i vatrogascima. Dva radnika su poginula direktno od eksplozije, a 29 ljudi je umrlo od posljedice zračenja. Oni su bili ozračeni dozama od 2 do 16 Sv. Zbog daljnjih djelovanja zračenja u krugu elektrane polumjera 30 km evakuirano je 135 000 stanovnika. Prema nekim procjenama od nesreće štetnih posljedica većih razmjera nije bilo, već se pretpostavlja da je broj oboljelih od raka i drugih zloćudnih bolesti povećan za 2% u odnosu na normalne uvjete. To i nije nekakav strašan podatak s obzirom na vrstu nesreće i ostale posljedice koje su se mogle dogoditi da se nije hitno interveniralo. Neposredno nakon kvara u nuklearnoj elektrani Černobilj smjer vjetra je bio takav da je 36 sati nakon kvara u Švedskoj i ostalim skandinavskim zemljama opaženo povećanje radioaktivnosti. Sljedećih dana prevladavalo je zračno strujanje prema zapadu, pa je povećanje radioaktivnosti registrirano u cijeloj srednjoj i ponešto u zapadnoj Europi. Srećom prilike su se stabilizirale tjedan dana nakon uz napomenu stanovništvu dodatnim mjerama opreza, pa je povećanje radijacije nešto dugotrajnije zabilježeno na području Skandinavije i bivšeg SSSR-a.

Kvar u nuklearnoj elektrani Černobilj najveći je kvar u dosadašnjem korištenju nuklearne energije. Također je to i kvar s najvećim negativnim posljedicama, premda one nisu tako katastrofalne kako je izgledalo u prvom trenutku. Naravno da bi negativne posljedice bile mnogo manje da je reaktor u Černobilju bio opkoljen biološkim štitom koji bi sprječio toliku emisiju radioaktivnosti u atmosferu i da nije bio upotrebljen grafit kao moderador. Da se ne bi u budućnosti dogodila slična ovakva tragična nesreća s posljedicama na ljude i okoliš svi reaktori prema propisu moraju imati zaštitnu građevinu i ne smiju upotrebljavati grafit kao moderador.



Slika 12. Shema aktivnog sigurnosnog sustava u nuklearnoj elektrani

## 11. ČERNOBILSKA KATASTROFA

Černobil je mali gradić u Ukrajini, gotovo na samoj granici Ukrajine s Bjelorusijom koji je sve do subote 26. travnja 1986 bio potpuno nepoznat u svjetskim okvirima, a nakon tog datuma postao sinonim katastrofe radi eksplozije unutar nuklearnog reaktora koja je prouzročila najveću nuklearnu katastrofu u povijesti. Sama nuklearna elektrana nije bila smještena u samom gradu Černobilu već ustvari 18 km sjeverozapadno od gradića Černobila, a sastojala se od četiri reaktora tipa RBMK-1000, od kojih je prvi stavljen u pogon 1977 godine, a kobni četvrti reaktor 1983 godine. Černobilska nuklearna elektrana je u punom kapacitetu sa sva četiri reaktora u radu davala otprilike 10 % ukupne električne energije Ukrajine. Eksplozija je globalno odjeknula u svim svjetskim medijima i pojavio se velik strah u sigurnost sovjetskih nuklearnih postrojenja te je i sama sovjetska vlada pod pritiskom svjetske javnosti morala maknuti veo tajnosti sa svojih nuklearnih projekata, budući da su daljnje eksplozije uzrokovane eksplozijom unutar nuklearnog reaktora četiri proširile radioaktivni oblak izvan granica tadašnjeg sovjetskog saveza u istočnu, zapadnu i sjevernu Europu pa čak i u neke istočne dijelove sjeverne Amerike.



Slika 13. Položaj Černobila na karti

## 11.1. EKSPLOZIJA NUKLEARNOG REAKTORA BROJ ČETIRI

Dan uoči kobne eksplozije, odnosno 25. travnja 1986 godine vršena su testiranja u nuklearnoj elektrani koja su trebala testirati sposobnost turbina da generiraju dovoljne količine električne energije za pokretanje sigurnosnih sistema samog reaktora. Budući je za rad nuklearnog reaktora RBMK-1000 potrebna voda koja neprestano cirkulira u jezgri dokle god ima nuklearnog goriva, cilj testa je ustvari bio utvrditi mogu li turbine u fazi gašenja proizvesti dovoljno energije da pokrenu vodne pumpe o kojima ovisi rad samog nuklearnog reaktora. U skladu s tim testiranjem tijekom četvrtka 25. travnja 1986. godine pripremljeni su svi potrebni uvjeti kako bi testiranje moglo početi te se tako počela postepeno smanjivati i produkcija električne energije sve do 50% posto mogućnosti reaktora, a zatim se potpuno neočekivano isključila regionalna elektrana koja je to područje opskrbljivala potrebnom električnom energijom. Nakon toga uslijedila je naredba od strane kontrolora u Kijevu da se daljnje postepeno smanjivanje odgodi jer je još bila večer te je struja bila potrebna čitavoj regiji. Zahvaljujući toj neželjenoj okolnosti testiranje je odgođeno i povjereno u ruke noćne smjene koja je imala vrlo malo iskustva s radom u nuklearnim elektranama jer je velika većina njih bila dovedena iz elektrana koje su funkcionirale na ugljen.

Oko 23 sata navečer tog dana kontrolor je dao odobrenje za nastavak postupka te je nazivna snaga reaktora od 3.2 GW trebala biti smanjena na 0.7-1.0 GW kako bi se moglo provesti testiranje na donjoj granici snage reaktora. No problem je postojao u činjenici što nova smjena nije znala da je prva smjena već uradila postepeno smanjivanje snage reaktora, te su slijedili izvorne smjernice testiranja, a što je prouzročilo prebrzo smanjenje snage reaktora. Posada je vjerovala kako je uzrok brzom opadanju snage reaktora kvar u jednom od automatskih regulatora snage, što je bio potpuno pogrešni zaključak. Prilikom rapidnog opadanja snage reaktora, reaktor proizvodi više nuklearno otrovnih produkata xenon-135, a koji su uspjeli smanjiti snagu na 30 MW što je otprilike samo 5 % one snage koja se testiranjem htjela postići. Nakon toga posada elektrane poduzela je sigurnosne mjere u vidu uklanjanja kontrolnih poluga (control rods) iznad nuklearnog reaktora no to nije previše pomoglo jer se snaga reaktora povećala samo do 200 MW, što još uvijek nije predstavljalo ni trećinu minimuma potrebnog za eksperiment. Čak i usprkos toj činjenici posada je odlučila nastaviti sa eksperimentom te su u

01:05 sljedećeg dana bile uključene vodne pumpe koje su trebale biti pogonjene od strane turbina, te tako povećale protok vode iznad dopuštenih sigurnosnih mjera u 01:19. A u točno 01:23:04 započeo je fatalni eksperiment. Na kontrolnoj ploči nije bilo nikakvog znaka koji bi upozoravao posadu na opasnost koja im prijeti. Crpkama za vodu je bio prekinut dovod energije, a turbina je bila odvojena od reaktora te se iz tog razloga povećala količina pare u središtu reaktora, a time i temperatura te su se u cijevima počeli stvarati džepovi pare.

Princip rada reaktora RBMK-1000 ima veliki koeficijent ispražnjenja. Koeficijent ispražnjenja (void coefficient) je broj koji služi za procjenu koliko se povećava ili smanjuje termalna produktivnost nuklearnog reaktora, a u ovom slučaju pozitivni koeficijent ispražnjenja naglo je povećao snagu reaktora budući se smanjila voda koja inače apsorbira neutrone te je u tom stanju reaktor postao vrlo nestabilan i nepredvidljiv. U 01:23:40 operatori su pritisnuli dugme na kontrolnoj ploči AZ-5 koje se koristi za isključivanje reaktora u slučaju nužde, a time su također stavljene u rad i manualne kontrolne poluge koje su ranije bile izvađene. No sporost mehanizma umetanja kontrolnih šipaka koje traje od 18-20 sekundi te loš dizajn kontrolnih šipaka ustvari su postigli suprotni efekt te povećali samu brzinu reakcije. U tom stadiju zbog povećane proizvodnje energije nastala je deformacija rada mehanizma kontrolnih poluga jer su se kontrolne poluge zaustavile na jednoj trećini punog ciklusa i nisu mogle zaustaviti reakciju. Sedam sekundi kasnije u 01.23.47 snaga reaktora porasla je na 30 GW, odnosno deset puta više od uobičajenoga te su se počele otapati cijevi za gorivo i rapidno se povećao pritisak pare, a sve to rezultiralo je ogromnom eksplozijom pare koja je pomaknula i uništila poklopac reaktora i cijevi hladila te napravila ogromnu rupu u krovu. Nakon što je odletio komad krova došlo je do reakcije između kisika iz zraka sa vrlo visokim temperaturama reaktora i grafitnog moderatora na krajevima kontrolnih poluga, uzrokujući takozvanu "Grafitnu vatru" koja je najviše pridonijela širenju radioaktivnog oblaka na daljnja područja.



Slika 14. Nuklearni reaktor broj četiri nakon eksplozije. Vidljiva su znatna oštećenja reaktora (u sredini) i generatorske zgrade (dolje).



## **11.2. STANJE ZA VRIJEME NESREĆE I POSLJEDICE NESREĆE**

Stanje za vrijeme nesreće je bilo veoma loše i to prvenstveno zbog dva faktora: nepripremljenosti na mogućnost nesreće te pomanjkanja adekvatne opreme, a što je dovelo do mnoštva daljnjih negativnih posljedica i krivih procjena o tome što dalje napraviti. Stupnjevi radijacije u najžešće pogođenim područjima iznosili su oko 20.000 rendgena po satu, a usporedbe radi smrtonosna doza radijacije iznosi oko 500 rendgena na pet sati. To je rezultiralo činjenicom da su neki nezaštićeni radnici u samo nekoliko minuta zadobili smrtonosne doze radijacije. Negativnu okolnost je predstavljala naročito činjenica da osoblje elektrane nije znalo koliko je radijacija ustvari velika jer je glavni uređaj za mjerenje radijacije stradao prilikom eksplozije, a svi ostali uređaji imali su premalu skalu očitavanja radijacije (0.001 R/s) te su pokazivali samo da je stupanj radijacije iznad gornje granice skale. Poradi toga posada elektrane krivo je pretpostavila kako stupanj radijacije iznosi negdje oko 3.6 R/h dok je stvarni stupanj bio oko 5.600 puta veći. Zbog tih lažnih prikaza tada jedino radećih uređaja šef posade Aleksandar Akimov je procijenio da je reaktor ostao netaknut, te olako ignorirao dokaze u formi komadića grafita i goriva reaktora oko zgrade, a kasnije je čak ignorirao i očitavanja novog dozimetra radijacije koji je pokazivao povećani stupanj radijacije tvrdeći kako je riječ o neispravnom uređaju. Akimov je zajedno s posadom ostao do jutra nastojeći napumpati vodu u reaktor, a da pritom nitko od njih nije nosio zaštitno odijelo. Posljedica toga bila je smrt od posljedica radijacije Akimova i svih članova posade u roku manjem od tri tjedna nakon nesreće. No među žrtvama nije bila samo neiskusna posada elektrane jer su u pomoć posadi pristigli i vatrogasci kako bi ugasilu vatru koja je izbila kao posljedica eksplozije, a kojima nije rečeno da je riječ o eksploziji nuklearnog reaktora, te su oni mislili, a i postupali kao da je riječ o gašenju običnog požara izazvanog strujom. U pet sati ujutro vatrogasci su ugasilu požar, no velika većina njih zadobila je smrtonosne doze radijacije.

27. travnja, dan poslije eksplozije reagirala je i sovjetska vlada nakon što se uvjerala u visoki stupanj radijacije te evakuirala stanovništvo okolnog grada Pripjata. Od posljedica radijacije neposredno nakon nesreće stradao je ukupan broj od 29 spasilaca, vatrogasaca i članova posade, a oko 350.000 ljudi evakuirano je iz kontaminiranih područja u blizini reaktora. Prema procjenama agencijama UN-a daljnjih 4.000 do 9.000 ljudi je umrlo od posljedica te nuklearne katastrofe čiji je stupanj radijacije prema procjenama bio jednak onome od 400 atomskih bombi bačenih na Hiroshimu. Ekosistem u blizini reaktora također je pretrpio katastrofalne posljedice jer su četiri kvadratna kilometra okolne šume promijenile boju u nijansu ljubičasto-smeđe boje, te su prozване "Crvenom šumom" (Red Forest) od strane BBC-a, a stradao je i velik broj životinja dok su neke u potpunosti izgubile sposobnost razmnožavanja.



Slika 15. Posljedice nuklearne katastrofe u Černobilju. Radioaktivni plinovi dospjeli su čak do Italije i Njemačke.

### 11.3. MOGUĆI UZROCI KATASTROFE

Dvije su osnovne i oprečne teorije zašto je došlo do nuklearne katastrofe u Černobilskoj nuklearnoj elektrani. Prva teorija isključivim i jednim krivcima smatra osoblje koje je u to vrijeme radilo u elektrani, dok druga teorija smatra kako je za katastrofu isključivo kriv dizajn nuklearnog reaktora RBMK-1000. Također postoji i teorija zavjere koja smatra kako se otpočetak znalo da RBMK reaktor ima ozbiljnih problema te da se su te informacije namjerno skrivene od osoblja te kako je to ustvari glavni razlog zašto je većina osoblja bila sastavljena od ljudi koji nisu znali gotovo ništa o RBMK reaktoru.

Kao glavni razlozi u prilog teorije o lošem dizajnu reaktora navode se opasno visoki koeficijent ispražnjenja što pospješuje nuklearnu reakciju ukoliko se u reaktorskoj vodi za hlađenje počnu stvarati mjehurići pare te vrlo lako dovodi do nekontrolirane reakcije, ukoliko nema vanjskog posredovanja. S druge strane veliki nedostatak reaktora je bio i u građi kontrolnih poluga. Naime u nuklearnom reaktoru se kontrolne poluge stavljaju u reaktor kako bi se usporila reakcija, a u reaktoru RBMK su krajevi tih kontrolnih poluga u dužini od jednog metra bili od grafita, šuplji i napunjeni s vodom dok je stvarno funkcionalni ostatak koji apsorbira neutrone i sprečava reakciju bio napravljen od borovog karbida. Zbog tog dizajna u trenutku kad su šipke inicijalno umetnute u reaktor grafit koji je neutronske moderatore ustvari je pospješio nuklearnu reakciju, umjesto da je uspori. Poradi toga se i u prvih nekoliko sekundi od aktivacije kontrolnih poluga povećala produktivna snaga reaktora, umjesto da se je kako je to bilo željeno smanjila. Nepripremljeno i neiskusno osoblje nije znalo da su postigli suprotan efekt. Također kanali s vodom teku vertikalno kroz jezgru što znači da se temperatura vode povećava kako voda ide prema gore i stoga čini temperaturno stupnjevanje u jezgri. Taj efekt naročito dolazi do izražaja ukoliko se gornji dio pretvori u potpunosti u paru jer taj dio nakon te pretvorbe više nije propisno i dovoljno hlađen te se time znatno povećava reaktivnost. U prilog lošeg dizajna svakako valja ubrojiti i samo djelomični sustav zaštite od kontaminacije, a kojim su se htjeli izbjeći veliki troškovi koje bi puni sustav zahtijevao obzirom na veličinu reaktora, a reakciji su svakako pridonijeli i nusprodukti fisije koji su se taložili u radu reaktora koji je bio u pogonu duže od dvije godine.

Kao glavni razlozi teorije po kojoj je osoblje isključivi krivac za nastalu nuklearnu katastrofu ističe se da se osoblje nije držalo propisanih procedura i sigurnosnih mjera i to prvenstveno zahvaljujući njihovom neznanju i neiskustvu, loše komunikacije između glavnih operatera i samog osoblja u elektrani te naročito činjenica da je noćnu smjenu radilo drugo osoblje koje nije bilo upoznato s problemima oko prvotnog provođenja testa od strane dnevnog osoblja te ponovno započelo ispočetka provoditi već započeti proces.

#### **11.4. ČERNOBIL DANAS**

Prije eksplozije planirano je proširenje nuklearne elektrane s još dva reaktora, ali nakon havarije nuklearnog reaktora broj četiri prekinut je daljnji rad na nedovršenim reaktorima pet i šest, a oštećeni reaktor četiri je bio zatvoren te je između mjesta nesreće i operacijskih zgrada postavljeno 200 metara betona. Prva tri reaktora su ipak uredno nastavila s radom zbog pomanjkanja struje u Ukrajini. No i oni su u ovom trenutku stavljeni van pogona i to reaktor broj dva nakon požara koji je izbio 1991, reaktor broj jedan 1996, a reaktor broj tri 2000 godine kada ga je prilikom svečanosti zatvaranja kompletne elektrane zatvorio tadašnji predsjednik Ukrajine Leonid Kutchma.

No još uvijek potencijalna opasnost leži u takozvanom betonskom sarkofagu, kako je u javnosti poznat zaštitni sloj betona stavljen preko oštećenog reaktora broj četiri, odnosno njegovoj sposobnosti da zadrži radijaciju. Naime budući da je sarkofag bio ishitreno napravljen poradi brzog sprečavanja daljnjeg širenja radijacije ne predstavlja dugoročno optimalno rješenje, a već je također prošao i znatan niz godina od njegove izgradnje te se na njemu jasno vide znakovi vremena. Procjene govore da bi već jedan manji potres bio dovoljan da sruši krov sarkofaga, a što bi značilo ispuštanje novog radioaktivnog oblaka. Velik problem predstavlja i voda koja ulazi u sarkofag, te širi radioaktivne čestice čitavom uništenom zgradom, a u zadnje vrijeme velik problem predstavlja i prašina budući se mnoge radioaktivne čestice slične pepelu gomilaju i talože. Taj problem je djelomično otklonjen ugradnjom filtracije zraka 2001 godine. Ukrajinska vlada je u rujnu 2007 usvojila prijedlog za izgradnjom čeličnog kućišta oko reaktora koji će stajati 1.4 milijardi

dolara, a koji će biti dugačak 200 metara i širok 190 metara. Njegova gradnja trebala bi biti završena 2012 godine. Završetkom gradnje tog čeličnog kućišta trebalo bi se započeti i sa rastavljanjem samog nuklearnog reaktora.



Slika 16. Černobil danas. Na sredini slike je betonski sarkofag koji okružuje kobni reaktor broj četiri.

## 12. ZAKLJUČCI

Studirali smo problem nuklearnih elektrana kao proizvođača električne energije i koje sve posljedice ima za okoliš i za same ljude. Zbog potencijalnih opasnosti kvarova u nuklearnim elektranama i izbijanja tragedija s dugoročnim posljedicama visokog inteziteta radioaktivnog zračenja( kao u Černobilju ) čovječanstvo se pribojava daljnjem nastavku gradnji i masovnom iskorištenju nuklearne energije. Znanstvenici znaju da je ostataka prirodnih resursa vrlo malo i da u ovakvom tempu života neće još dugo opskrbljavati ljude prijeko potrebnom energijom, te da treba tragati za novim, alternativnim izvorima koji će jednako dobro zadovoljiti sve ljudske potrebe za energijom. Jedan od takvih izvora energije jest nuklearna energija koja je prva u Rusiji upotrebljena za proizvodnju električne energije. Dakako da znanstvenici znaju da je to rizičan potez i da nuklearna energija još nije doživjela afirmaciju kao standardan izvor energije jer je kao takav potencijalno opasan zbog radioaktivnog zračenja. Međutim uviđaju se mnoge činjenice prednosti korištenja nuklearne energije umjesto prirodnih energenata. Usporedimo li različite vrste elektrana prema vrsti goriva koje koriste za proizvodnju toplinske energije uočava se veliki nesrazmjer. Za godišnji rad elektrane od 1000 MW potrebno je 2,3 milijuna tona ugljena za termoelektanu na ugljen, 1,4 milijuna tona nafte za termoelektanu na naftu, 1,1 milijuna tona prirodnog plina za termoelektanu na prirodni plin, a za nuklearnu elektanu 30 tona nuklearnog goriva za proizvodnju u nuklearnoj elektrani s termičkim reaktorom. Očigledna je činjenica da je za proizvodnju električne energije u elektrani iste snage potrebna najmanja masa, a pogotovo volumen goriva u slučaju nuklearne energije. Drugi važan čimbenik je veličina površine terena koju zauzimaju elektrane s pratećim objektima. Za elektanu snage 1000 MW na biomasu potrebna je površina od 24 000 km<sup>2</sup>, na vjetar 100-200 km<sup>2</sup>, za fotonaponske ćelije 20-100 km<sup>2</sup>, a za nuklearne elektrane do 1 km<sup>2</sup>. Očigledno je da nuklearne elektrane zauzimaju mnogo manje prostora nego elektrane koje rabe obnovljive izvore energije, što ipak na kraju ne znači da ih ne treba rabiti.

Danas se nuklearne počinju sve više graditi, primjerice trenutno najviše u Finskoj. U Europi samo Francuska nije prekidala svoj energetski program zasnovan na nuklearnim elektranama. Rusija i Ukrajina imaju u izgradnji nekoliko novih reaktora. U sljedećem desetljeću gradnju nuklearnih elektrana predvodit će zemlje Istočne Azije poput Japana i Južne Koreje.

Černobilska nuklearna katastrofa najgora je nuklearna katastrofa u ljudskoj povijesti koja je pozitivno osvijestila svjetsku javnost oko potencijala opasnosti koju u sebi nosi nuklearna energija. Ova nuklearna katastrofa pokazala je kako skupe mogu biti greške prilikom rada sa nuklearnim reaktorima i nagnala Vlade država koje koriste nuklearne elektrane da traže nove i sigurnije vrste nuklearnih reaktora te da postave na najviši mogući stupanj sigurnosne mjere oko postupanja u nuklearnim elektranama. O tome je li katastrofa nastala zbog lošeg i neiskusnog osoblja ili zbog lošeg dizajna još se uvijek vodi debate, iako su vjerojatno oba ta uzroka pridonijela nuklearnoj katastrofi. 29 ljudi umrlo je od posljedica izlaganju radioaktivnim tvarima nedugo nakon eksplozije, a UN pretpostavlja kako će od posljedica kontaminiranosti okolnih područja umrijeti još nekoliko tisuća ljudi.

## 13. LITERATURA

1. <http://www.nek.si/>
2. [http://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna\\_elektrana\\_Kr%C5%A1ko](http://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_elektrana_Kr%C5%A1ko)
3. [http://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna\\_energija](http://hr.wikipedia.org/wiki/Nuklearna_energija)
4. [http://www.izvorienergije.com/cernobil\\_katastrofa.html](http://www.izvorienergije.com/cernobil_katastrofa.html)
5. [http://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobilska\\_katastrofa](http://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobilska_katastrofa)
6. Danilo Feretić, Nikola Čavlina, Nenad Debrecin, 1995.  
Nuklearne elektrane, Zagreb, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu



## 14. POPIS SLIKA

Slika 1. Nuklearna elektrana Krško

Slika 2. 1975. – početak iskopavanja i građevinskih radova na gradilištu

Slika 3. Pojednostavljeni prikaz rada Nuklearne elektrane Krško

Slika 4. Znak za opasnost od radioaktivnosti

Slika 5. Nuklearna elektrana kod koje se plinoviti i tekući otpaci ispuštaju u okolinu

Slika 6. Obrambeni sustav nuklearne elektrane od radioaktivnog zračenja

Slika 7. Dokaz za prednost nuklearnih elektrana s obzirom na transport goriva i zagađenje okoliša

Slika 8. NE s brzim oplodnim reaktorom

Slika 9. Voda kao zaštita od radioaktivnog zračenja istrošenog goriva

Slika 10. NE pri obustavi rada scenarijem SAFSTOR

Slika 11. Primjer nuklearne elektrane izgrađene uz obradivu površinu

Slika 12. Shema aktivnog sigurnosnog sustava u nuklearnoj elektrani

Slika 13. Položaj Černobila na karti

Slika 14. Nuklearni reaktor broj četiri nakon eksplozije. Vidljiva su znatna oštećenja reaktora (u sredini) i generatorske zgrade (dolje).

Slika 15. Posljedice nuklearne katastrofe u Černobilju. Radioaktivni plinovi dospjeli su čak do Italije i Njemačke.

Slika 16. Černobil danas. Na sredini slike je betonski sarkofag koji okružuje kobni reaktor broj četiri.

## **15. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mjesečna proizvodnja električne energije u 2013. godini

Tablica 2. Godišnja proizvodnja električne energije