

SIGURNOST I ZAŠTITA NA RADU U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

Bujanović, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:128:004076>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



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 na radu
Stručni studij sigurnosti i zaštite

Matija Bujanović

SIGURNOST I ZAŠTITA NA RADU U NUKLEARNOJ ELEKTRANI

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2023.

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

Matija Bujanović

**Safety and protection at work in
nuclear power plant**

FINAL PAPER

Karlovac, 2023.

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

Matija Bujanović

SIGURNOST I ZAŠTITA NA RADU U NUKLEARNOJ ELEKTRANI

ZAVRŠNI RAD

Mentor: dr.sc. Jasna Halambek, v. pred.

Karlovac, 2023

Izabrao sam ovu temu kao pisanje završnog rada iz razloga što je sama tematika nuklearnih elektrana poprilično širok pojam glede izloženosti raznim opasnostima i štetnostima pri obavljanju poslova.

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr.sc. Jasni Halambek što mi je pružila priliku obrane završnog rada te mi preporučila ovu temu.

SAŽETAK

Nuklearne elektrane su vrsta elektrana koje koriste proces nuklearne fisije za proizvodnju električne energije. To čine korištenjem nuklearnih reaktora u kombinaciji s Rankineovim ciklusom, gdje toplina koju stvara reaktor pretvara vodu u paru koja vrti turbinu i generator. Nuklearna energija svijetu daje oko 11% ukupne električne energije, a najveći proizvođači su Sjedinjene Države i Francuska. Osim po izvoru topline, nuklearne elektrane vrlo su slične elektranama na ugljen. Međutim, one zahtijevaju različite sigurnosne mjere budući da uporaba nuklearnog goriva ima znatno drugačija svojstva od ugljena ili drugih fosilnih goriva. Svoju toplinsku snagu dobivaju cijepanjem jezgri atoma u jezgri svog reaktora, pri čemu je uran dominantan izbor goriva u današnjem svijetu.

Ključne riječi: nuklearna elektrana, sigurnosne mjere, zaštita na radu, zračenje.

SUMMARY

Nuclear power plants are a type of power plant that use the process of nuclear fission in order to generate electricity. They do this by using nuclear reactors in combination with the Rankine cycle, where the heat generated by the reactor converts water into steam, which spins a turbine and a generator. Nuclear power provides the world with around 11% of its total electricity, with the largest producers being the United States and France. Aside from the source of heat, nuclear power plants are very similar to coal-fired power plants. However, they require different safety measures since the use of nuclear fuel has vastly different properties from coal or other fossil fuels. They get their thermal power from splitting the nuclei of atoms in their reactor core, with uranium being the dominant choice of fuel in the world today.

Keywords: nuclear power plant, safety measures, safety at work, radiation.

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA..... | I |
| PREDGOVOR..... | II |
| SAŽETAK..... | III |
| SUMMARY..... | III |
| SADRŽAJ..... | IV |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OPĆENITO O ZNR..... | 2 |
| 2.1. Sustav pravila zaštite na radu..... | 3 |
| 2.2. Međunarodni dan zaštite na radu..... | 5 |
| 2.3. Pružanje prve pomoći..... | 8 |
| 3. OPĆENITO O RADU NUKLEARNE ELEKTRANE..... | 12 |
| 3.1. Upravljanje reaktorom nuklearne elektrane..... | 13 |
| 3.2. Princip nuklearne energije..... | 16 |
| 4. OPĆI CILJ NUKLEARNE SIGURNOSTI..... | 17 |
| 4.1. Cilj zaštite od zračenja..... | 18 |
| 4.2. Cilj tehničke sigurnosti..... | 19 |
| 4.3. Kultura sigurnosti..... | 21 |
| 5. UPRAVLJANJE SIGURNOŠĆU U PROJEKTIRANJU NUKLEARNE ELEKTRANE..... | 22 |
| 5.1. Višestruki izvori napajanja u nuklearnoj elektrani..... | 22 |
| 5.2. Sigurnost postrojenja nuklearne elektrane..... | 24 |
| 6. OPASNOSTI I NESREĆE U Error! Bookmark not defined. | |
| 6.1. Opasnosti od kemijske reaktivnosti..... | 26 |
| 6.2. Požari i eksplozije..... | 27 |
| 7. PRAVILA PRIDRŽAVANJA ZNR PRI RADU U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA..... | 28 |
| 7.1. Formalna obuka radnika..... | 28 |
| 8. NAPREDNI DIZAJN REAKTORA..... | 31 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 33 |
| 10. LITERATURA..... | 34 |
| 11. PRILOZI..... | 36 |
| 11.1. Popis slika..... | 36 |
| 11.2. Popis tablica..... | 36 |

1. UVOD

Glavni zadatak zaštite na radu prilikom obavljanja poslova u nuklearnim elektranama je maksimalno umanjiti ozljede po život i zdravlje zaposlenika prilikom obavljanja nekog posla pri čemu je nužno poštivati i pravilno koristiti mjere i pravila zaštite na radu. Glavni motiv ovog rada je iskazati koje, i u kojim količinama treba upotrebljavati mjere zaštite na radu u nuklearnim elektranama kako bi se spriječila opasnost od ozljeda zaposlenika koji su svakim danom kontinuirano izloženi opasnostima po život i zdravlje. Smrtni slučajevi u nuklearnim elektranama nisu česti, no ipak događali su se slučajevi gdje je dolazilo do smrtnih slučajeva i to su najčešće bili prouzročeni kvarom tehničkih komponenti, ljudskim greškama ili prirodnim katastrofama. Zbog toga, provođenje sigurnosti i zaštite na radu jedan je od važnijih faktora u svakodnevnom obavljanju poslova u nuklearnoj elektrani.

2. OPĆENITO O ZAŠTITI NA RADU

Zaštita na radu je u pravilu skup načela, mjera, postupaka, te aktivnosti, sa čijom se organiziranom upotrebom ostvaruje i unaprijeđuje sigurnost i zaštita zdravlja na radu, s glavnim ciljem sprečavanja i smanjenja rizika na radu, profesionalnih bolesti, ozljeda na radu, bolesti vezanih za obavljani posao, te ostalih materijalnih i nematerijalnih šteta na radu i u vezi s radom. [1]

Zakon o ZNR uređuje i unaprijeđuje sustav zaštite na radu u Republici Hrvatskoj, a posebno aktivnosti i nacionalnu politiku, obveze poslodavaca, opća načela prevencije i pravila zaštite na radu, djelatnosti koje su povezane sa zaštitom na radu, obveze i prava radnika i povjerenika radnika zaštite na radu, nadziranje radnika, odgovornost prekršaja te se osniva Zavod za unaprjeđenje zaštite na radu i utvrđuje se njegova djelatnost i upravljanje. Glavni cilj tog zakona jest svakodnevno unapređivanje sigurnosti i zaštite zdravlja radnika i osoba na radu, sprječavanje nastanka profesionalnih i štetnih bolesti radnika, te ozljeda i drugih bolesti koje su direktno povezane sa radom.

Osnova zaštite na radu je kreirati sigurne uvjete rada kako ne bi došlo do profesionalnih bolesti, nezgoda i ozljeda na radu i u vezi s radom, odnosno kako bi se maksimalno smanjili potencijalni štetni učinci u slučaju da se ta određena opasnost ne uspije ukloniti na vrijeme. [1]

U području zaštite na radu izuzetno je važno razlikovati pojam nezgode i nesreće na radu. Nezgoda na radu u suštini podrazumijeva bilo koji neželjeni i nepredviđeni događaj, koji za posljedicu ima, ali ne mora nužno imati ozljedu, štetu, onečišćenje ili slično. Sa druge strane, nesreća na radu također se podrazumijeva kao neželjeni događaj koji uzrokuju materijalnu štetu, ozljedu radnika ili zagađenje okoliša. Tijekom obavljanja određenih poslova u radnoj okolini, na radnika utječe puno čimbenika. Kao posljedica djelovanja i utjecanja štetnih i opasnih čimbenika na radnika, može doći i do profesionalne bolesti. Ona može nastupiti naglo, nakon kratkotrajnog djelovanja neke štetnosti ili može biti prouzročena kao posljedica dugotrajnog djelovanja štetnih fizikalnih čimbenika

kao što su buka, vibracija, zračenja i slično te nepovoljnih higijenskih uvjeta u radnom postrojenju. [2]

2.1. SUSTAV PRAVILA ZAŠTITE NA RADU

Pravila zaštite na radu su određeni načini i mjere zaštite kojima se rizici i njihove štetne posljedice otklanjaju ili umanjuju, na za to predviđene načine.

Također, zaštita na radu kao organizirano djelovanje obuhvaća osobito pravila pri projektiranju i izradi sredstava rada, pravila pri uporabi, održavanju, pregledu i ispitivanju sredstava rada, pravila koja se odnose na radnike te prilagodbu procesa rada njihovom spolu, dobi, fizičkim, tjelesnim i psihičkim sposobnostima, načine i postupke osposobljavanja i obavješćivanja radnika i poslodavaca sa svrhom postizanja odgovarajuće razine zaštite na radu, načine i postupke suradnje poslodavaca, radnika i njihovih predstavnika i udruga te državnih ustanova i tijela nadležnih za zaštitu na radu, zabranu stavljanja radnika u nepovoljniji položaj zbog aktivnosti poduzetih radi zaštite na radu, ostale mjere za sprječavanje rizika na radu, s ciljem uklanjanja rizika i njihovih štetnih posljedica. Uz to, zaštita na radu je sastavni dio organizacije rada i izvođenja radnog postupka koje poslodavac ostvaruje primjenom osnovnih, posebnih i priznatih pravila zaštite na radu u skladu s općim načelima prevencije. [3]

Osnovna pravila zaštite na radu

Osnovna pravila zaštite na radu imaju prednost u odnosu na posebna pravila zaštite na radu. Imajući u vidu važnost primjene pravila zaštite na radu kojima se zaštita na radu i ostvaruje, važno je shvatiti razliku između osnovnih i posebnih pravila te njihovu primjenu u praksi. Osnovna pravila zaštite na radu sadrže zahtjeve kojima sredstvo rada kada je u uporabi mora udovoljavati, a osobito je riječ o:

- Zaštiti od mehaničkih opasnosti
- Zaštiti od udara električne struje

- Sprječavanju nastanka požara i eksplozija
- Osiguranju mehaničke otpornosti i stabilnosti građevine
- Osiguranju potrebne radne površine i radnog prostora
- Osiguranju potrebnih putova za prolaz, prijevoz i evakuaciju radnika i drugih osoba
- Osiguranju čistoće
- Osiguranju propisane temperature, vlažnosti zraka i ograničenja brzine strujanja zraka
- Osiguranju propisane rasvjete
- Zaštiti od buke i vibracija
- Zaštiti od štetnih atmosferskih i klimatskih utjecaja
- Zaštiti od fizikalnih, kemijskih i bioloških štetnih djelovanja
- Zaštiti od prekomjernih napora
- Zaštiti od elektromagnetskog i ostalog zračenja
- Osiguranju prostorija i uređaja za osobnu higijenu [3].

Posebna pravila zaštite na radu

Ako rizike za sigurnost i zdravlje radnika nije moguće ukloniti ili ih je moguće samo djelomično ukloniti primjenjivanjem osnovnih pravila zaštite na radu, tada se dodatno primjenjuju posebna pravila zaštite na radu koja se odnose na radnike, način obavljanja poslova i radne postupke.

Posebna pravila zaštite na radu sadrže zahtjeve glede dobi, spola završenog studija obrazovanja i drugih oblika osposobljavanja i usavršavanja za rad, zdravstvenog stanja, tjelesnog stanja, psihofizioloških i psihičkih sposobnosti, kojima radnici moraju udovoljavati pri obavljanju poslova s posebnim uvjetima rada. [3]

Posebna pravila zaštite na radu, osim prethodnih zahtjeva, sadrže i prava i obveze u vezi s:

- Organizacijom radnog vremena i korištenjem odmora
- Načinom korištenja odgovarajuće osobne zaštitne opreme
- Posebnim postupcima pri uporabi, odnosno izloženosti fizikalnim štetnostima, opasnim kemikalijama i biološkim štetnostima
- Postavljanjem sigurnosnih znakova kojima se daje informacija ili uputa
- Uputama o radnim postupcima i načinu obavljanja poslova, posebno glede trajanja posla, obavljanja jednoličnog rada i rada po učinku u određenom vremenu (normalni rad) te izloženosti radnika drugim naporima na radu ili u vezi s radom
- Postupcima s ozlijeđenim ili oboljelim radnikom do pružanja hitne medicinske pomoći, odnosno do prijema u zdravstvenu ustanovu. [3]

Priznata pravila zaštite na radu

Ako u pravnom poretku Republike Hrvatske nisu na snazi pravna pravila zaštite na radu koja bi poslodavac trebao primijeniti radi sigurnosti i zaštite zdravlja radnika, potrebno je primijeniti priznata pravila zaštite na radu koja podrazumijevaju norme, pravila struke ili u praksi provjerene načine pomoću kojih se rizici na radu uklanjaju ili smanjuju i kojima se sprječava nastanak ozljeda na radu, profesionalnih bolesti, bolesti u vezi s radom te ostalih za radnike štetnih posljedica. [3]

2.2. MEĐUNARODNI DAN ZAŠTITE NA RADU

Godine 2003. Međunarodna organizacija rada (ILO) počela je obilježavati Svjetski dan kako bi naglasila prevenciju nesreća i bolesti na radu, kapitalizirajući tradicionalnu snagu ILO-a u socijalnom dijalogu.

Ova proslava sastavni je dio Globalne strategije o sigurnosti i zdravlju na radu ILO-a, kako je dokumentirano u zaključcima Međunarodne konferencije rada u

lipnju 2003. Jedan od glavnih stupova Globalne strategije je zagovaranje, Svjetski dan sigurnosti, a Zdravlje na radu značajan je alat za podizanje svijesti o tome kako rad učiniti sigurnim i zdravim te o potrebi podizanja političkog profila sigurnosti i zdravlja na radu.

28. travnja također je Međunarodni dan sjećanja na poginule i ozlijeđene radnike koji sindikalni pokret organizira diljem svijeta od 1996. godine. [4]

Prevenција ozljeda na radu i profesionalnih bolesti

Godišnji Svjetski dan sigurnosti i zdravlja na radu 28. travnja promiče prevenciju nesreća na radu i profesionalnih bolesti na globalnoj razini. To je kampanja podizanja svijesti namijenjena usmjeravanju međunarodne pozornosti na veličinu problema i na to kako promicanje i stvaranje kulture sigurnosti i zdravlja može pomoći u smanjenju broja smrtnih slučajeva i ozljeda povezanih s radom. [4]

Svatko od nas odgovoran je za zaustavljanje smrti i ozljeda na poslu. Vlade država odgovorne su pružanje infrastrukture, zakona i usluga koje su potrebne kako bi se osiguralo da radnici ostanu zaposleni i da poduzeća napreduju; to uključuje razvoj nacionalne politike i programa te sustav inspekcije za provođenje usklađenosti sa zakonodavstvom i politikom o sigurnosti i zdravlju na radu. Poslodavci su odgovorni za sigurno i zdravo radno okruženje. Radnici su odgovorni raditi na siguran način i zaštititi sebe i ne ugrožavati druge, poznavati svoja prava i sudjelovati u provođenju preventivnih mjera. [4]

Novi profesionalni rizici mogu biti uzrokovani tehničkim inovacijama ili društvenim ili organizacijskim promjenama, kao što su: nove tehnologije i proizvodni procesi, npr. nanotehnologija, biotehnologija itd.



Slika 1. Svjetski dan zaštite na radu [5]

Novi radni uvjeti, npr. veća opterećenja, intenziviranje rada od smanjenja broja zaposlenih, loši uvjeti povezani s radnom migracijom, poslovi u neformalnoj ekonomiji. Novi oblici zapošljavanja, npr. samozapošljavanje, outsourcing, privremeni ugovori. Oni mogu biti šire prepoznati kroz bolje znanstveno razumijevanje, npr. učinci ergonomske rizika na poremećaje mišićno-koštanog sustava. Na njih mogu utjecati promjene u percepciji važnosti određenih čimbenika rizika, npr. učinci psihosocijalnih čimbenika na stres vezan uz posao. [5]

2.3. PRUŽANJE PRVE POMOĆI NA RADNOM MJESTU

Svaki poslodavac dužan je osigurati odgovarajuće uvjete za pružanje prve pomoći unesrećenim radnicima do dolaska hitne medicinske pomoći ili prebacivanja u bolnicu ili ambulantu. To uključuje osiguranje osnovnog sanitetskog materijala (ormarić prve pomoći) te osposobljavanje djelatnika za pružanje prve pomoći.

Poslodavci su dužni imati jednu osobu osposobljenu za pružanje prve pomoći na svakoj lokaciji i u svakoj smjeni gdje istovremeno radi dvoje ili više djelatnika. Ako poslodavac zapošljava do 50 djelatnika osposobljava se jedna osoba za pružanje prve pomoći te dodatno još jedna na svakih daljnjih 50 djelatnika. Moguće je da će trebati osposobiti i više djelatnika za pružanje prve pomoći od propisanog minimuma, ovisno o organizaciji rada (broju lokacija, smjenama i slično).

Osposobljavanje djelatnika za pružanje prve pomoći provode licencirani specijalisti medicine rada, odnosno rada i sporta te Hrvatski crveni križ. Obuka zaposlenika za pružanje prve pomoći traje 10 sati i nakon čega se polaže pismeni ispit. Poslodavac je dužan najmanje jednom u četiri godine organizirati vježbu za provjeru i obnovu znanja iz područja prve pomoći.

Također, poslodavac mora osigurati na svakoj lokaciji ormarić prve pomoći sa odgovarajućim sanitetskim materijalom. Sadržaj ormarića propisan je Pravilnikom o postupcima pružanja prve pomoći, sredstvima, vrsti i količini sanitetskog materijala koja mora biti osigurana na mjestu rada te načinu i rokovima osposobljavanja radnika za pružanje prve pomoći. [6]

Sukladno Pravilniku, za poslodavce koji zapošljavaju do 20 radnika svaki ormarić prve pomoći mora sadržavati sve navedeno u Tablici 1.

Tablica 1. Broj zaštitnih sredstava u ormariću prve pomoći za poslodavce koji zapošljavaju do 20 radnika [6]

| R.br. | naziv materijala | kom. |
|-------|--|------|
| 1. | Prvi zavoj br. 1 : 8 cm x 5 m | 2 |
| 2. | Prvi zavoj br. 3 : 12 cm x 5 m | 2 |
| 3. | Kaliko zavoj 8 (ili 10) cm x 5 m | 3 |
| 4. | Kaliko zavoj 5 cm x 5 m | 4 |
| 5. | Aluplast ili Alufolija (za opekline) *** manji - sterilni | 2 |
| 6. | Aluplast ili Alufolija (za opekline)*** veći 50 x 80 - sterilni | 1 |
| 7. | Kompresse sterilne gaze 5x8 cm (pojedinačno pakirane) paket (10 kom) | 1 |
| 8. | Kompresse sterilne gaze 10 x 10 cm (pojedinačno pakirane) | 4 |
| 9. | Kompresse sterilne gaze 0,5 m (pojedinačno pakirane) | 2 |
| 10. | Kompresse sterilne gaze 1 m (pojedinačno pakirane) | 1 |
| 11. | Flaster - vrpca 2,5 cm x 5 m | 1 |
| 12. | Flaster- strip (sa gazom) – komplet – 10 kom - pakiranje | 1 |
| 13. | Trokutni rubac | 4 |
| 14. | Igle sigurnice | 10 |
| 15. | Škare sa zaobljenim vrhom | 1 |
| 16. | Rukavice (gumene, kirurške, sterilne, za jednokratnu uporabu) - par | 2 |
| 17. | Polietilenska vrećica (najmanje 30 cm x 60 cm) | 2 |
| 18. | Metalizirana folija (najmanje 100 cm x 200 cm) | 1 |
| 19. | Zaštitna folija za umjetno disanje (sa filterom ili nepovratnim ventilom) – paket (10 kom) | 1 |

| | | |
|-----|---|---|
| 20. | Maska za umjetno disanje sa nepovratnim ventilom (sukladna ISO-standardu) | 1 |
| 21. | Vata sanitetska - paket od 50 gr. | 2 |
| 22. | Mrežica Surgifix br. 4 - pakiranje od 2 m. | 1 |
| 23. | Mrežica Surgifix br. 7 - pakiranje od 2 m. | 1 |
| 24. | Hibisept (5%) 200 ml ili odgovarajuće dezinfekciono sredstvo | 1 |
| 25. | Fiziološka otopina (0,9%) 500 ml | 1 |
| 26. | Priručnik prve pomoći na radnom mjestu (preporučen od HZMR) | 1 |
| 27. | Specifikacija sadržaja ormarića (kutije) prve pomoći | 1 |
| 28. | Kramerove udlage duljine 100 cm – obložene, | 2 |
| 29. | Kramerove udlage duljine 50 cm – obložene, | 2 |

Ako na tom mjestu rada radi više od 20, a manje od 50 radnika potrebno je osigurati još jedan takav ormarić prve pomoći. [6]

Za mjesta rada gdje radi do 5 radnika potrebno je osigurati najmanje (Tablica 2.):

Tablica 2. Broj zaštitnih sredstava u ormariću prve pomoći za poslodavce koji zapošljavaju do 5 radnika [6]

| R.br. | naziv materijala | kom. |
|-------|--|------|
| 1. | Prvi zavoj br. 1 : 8 cm x 5 m | 2 |
| 2. | Prvi zavoj br. 3 : 12 cm x 5 m | 1 |
| 3. | Kaliko zavoj 8 (ili 10) cm x 5 m | 2 |
| 4. | Kaliko zavoj 5 cm x 5 m | 2 |
| 5. | Kompresse sterilne gaze 5x8 cm (pojedinačno pakirane) paket (10 kom) | 1 |

| | | |
|-----|---|---|
| 6. | Kompresse sterilne gaze 10 x 10 cm (pojedinačno pakirane) | 2 |
| 7. | Kompresse sterilne gaze 0,5 m (pojedinačno pakirane) | 2 |
| 8. | Flaster - vrpca 2,5 cm x 5 m | 1 |
| 9. | Flaster- strip (sa gazom) – komplet – 10 kom - pakiranje | 1 |
| 10. | Trokutni rubac | 2 |
| 11. | Igle sigurnice | 2 |
| 12. | Škare sa zaobljenim vrhom | 1 |
| 13. | Rukavice (gumene, kirurške, sterilne, za jednokratnu uporabu) - par | 1 |
| 14. | Polietilenska vrećica (najmanje 30 cm x 60 cm) | 1 |
| 15. | Zaštitna folija za umjetno disanje (sa filterom ili nepovratnim ventilom) | 2 |
| 16. | Vata sanitetska - paket od 50 gr. | 1 |
| 17. | Hibisept (5%) 100 ml ili odgovarajuće dezinfekciono sredstvo | 1 |
| 18. | Priručnik prve pomoći na radnom mjestu (preporučen od HZMR) | 1 |
| 19. | Specifikacija sadržaja ormarića (kutije) prve pomoći | 1 |

3. OPĆENITO O RADU NUKLEARNE ELEKTRANE

Nuklearna elektrana je vrsta termoelektrane kojoj je izvor energije toplina dobivena fisijama nuklearnog goriva, najčešće uranija, u nuklearnom reaktoru.

Reaktor se zagrijava kada se brze čestice nastale lančanim reakcijama atomskih jezgri nuklearnoga goriva sudaraju s drugim česticama u reaktoru i predaju im dio svoje kinetičke energije. S pomoću vodene pare ili nekoga drugog prijenosnog medija, slično kao i u termoelektrani, dobivena toplinska energija se termodinamičkim kružnim procesom u turbini pretvara u mehaničku energiju. Turbina tada pokreće električni generator, u kojem se nastala mehanička energija pretvara u električnu.

Nuklearna elektrana proizvodi električnu energiju bez ispuštanja stakleničkih plinova u atmosferu čime se utječe na smanjenje globalnog zagrijavanja. Loša strana ovakve proizvodnje električne energije je ta da u procesu lančane reakcije u nuklearnom reaktoru nastaju produkti fisije koji su radioaktivni i štetni za zdravlje. Također, trajno deponiranje radioaktivnog otpada proizvedenoga radom elektrane nije još u potpunosti riješeno.

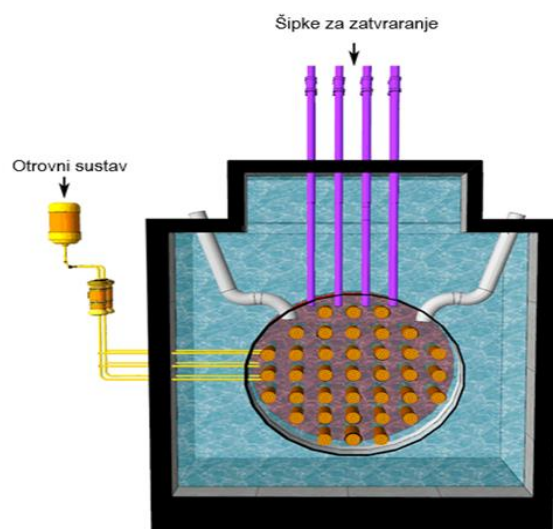
Nuklearne elektrane postoje u 13 zemalja Europske unije (Belgija, Bugarska, Češka, Finska, Francuska, Mađarska, Njemačka, Nizozemska, Rumunjska, Slovačka, Slovenija, Španjolska i Švedska) i proizvode oko 25% ukupne električne energije proizvedene na području Europske unije. Najviše električne energije u nuklearnim elektranama proizvedeno je u Francuskoj (51,8%).

Republika Hrvatska nema nuklearnih elektrana, ali je Hrvatska elektroprivreda 50%-tna vlasnica Nuklearne elektrane Krško u Sloveniji. Elektrana je ušla u probni rad 1981., a u komercijalni pogon 1983.

3.1. UPRAVLJANJE REAKTOROM NUKLEARNE ELEKTRANE

Upravljanje reaktorom uključuje povećanje, smanjenje ili zaustavljanje lančane reakcije koja se odvija unutar reaktora. Kada reaktor radi, lančana reakcija (ili razina snage) kontrolira se pomicanjem šipki za podešavanje i mijenjanjem razine vode u okomitim cilindrima. Osjetljivi detektori neprestano prate različite aspekte, poput temperature, tlaka i razine snage reaktora.

Svi nuklearni reaktori imaju dva neovisna, brzo-djelujuća i jednako učinkovita sustava za gašenje. Prvi sustav za isključivanje (slika 2) sastoji se od šipki koje se automatski spuštaju i zaustavljaju lančanu reakciju ako se otkrije nešto nepravilno. Drugi sustav ubrizgava tekućinu, odnosno otrov, unutar reaktora kako bi odmah zaustavio lančanu reakciju. Oba sustava rade bez napajanja ili intervencije operatera. Međutim, mogu se aktivirati i ručno. Ovi sustavi se redovito i sigurno testiraju. [9]



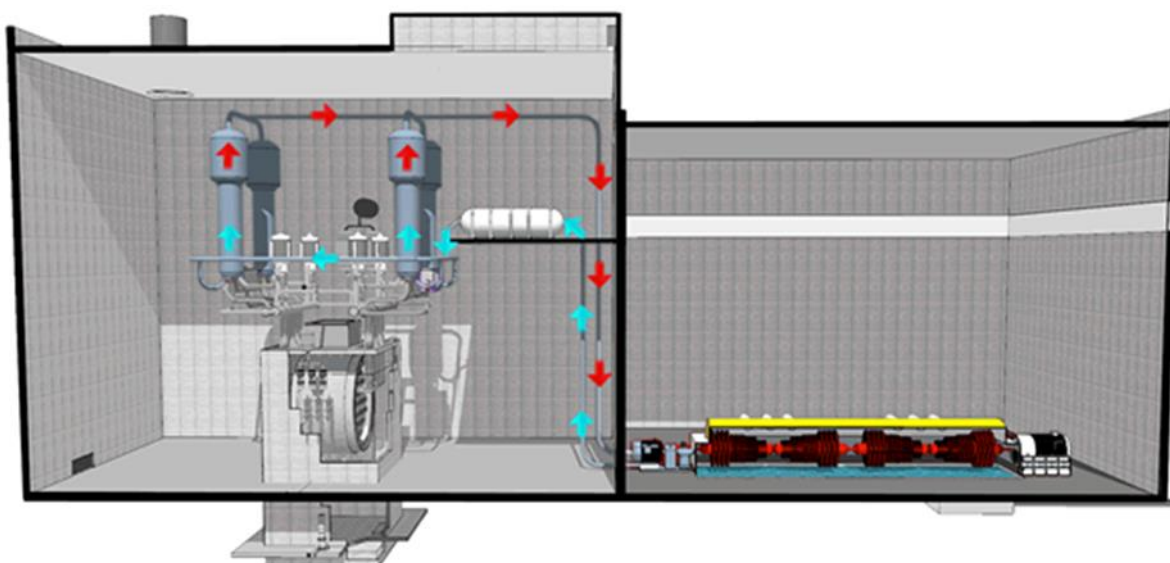
Slika 2. Primjer sustava za isključivanje u slučaju opasnosti [9]

Nakon što se reaktor ugasi, ostat će tako sve dok ga operateri u kontrolnoj sobi ponovno ne pokrenu. Ne postoji mogućnost da se reaktor slučajno sam od sebe ponovno pokrene nakon gašenja. Reaktor se mora ponovno ručno pokrenuti. Ovo je još jedna važna sigurnosna značajka.

Nakon gašenja, količina energije koju proizvodi reaktor brzo se smanjuje. Nuklearno gorivo će, međutim, nastaviti proizvoditi nešto topline i mora se ohladiti. Ta toplina, koja se naziva toplina raspada, predstavlja mali dio topline proizvedene tijekom normalnog rada. [9]

Glavni sustavi hlađenja goriva uključuju tri glavna sustava:

- Sustav za prijenos topline
- Parni sustav
- Sustav hlađenja kondenzatora



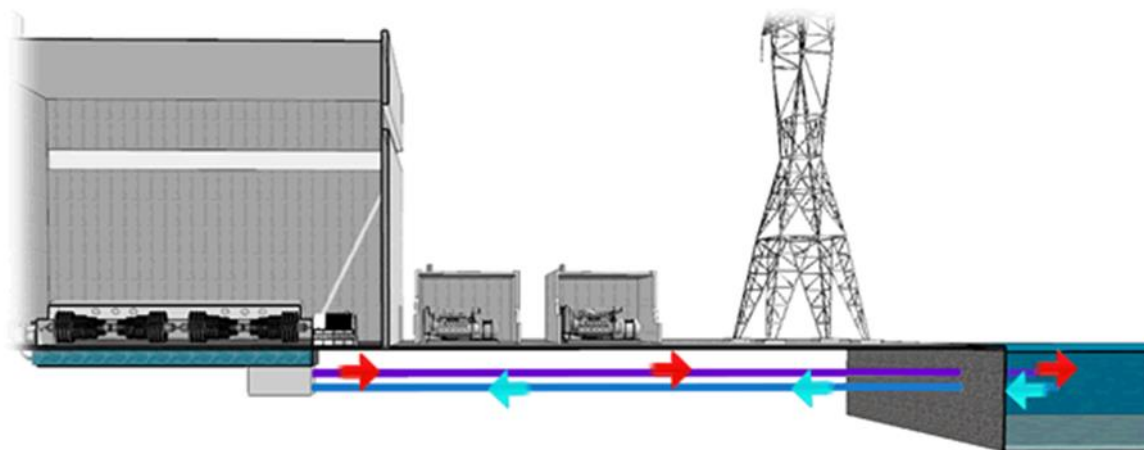
Slika 3. Parni sustav [9].

Parni sustav (slika 3), koristi normalnu vodu. Toplina iz reaktora pretvara ovu vodu u paru za pokretanje turbina i generatora.

Ta se para zatim hladi i kondenzira pomoću trećeg sustava koji pumpa hladnu vodu iz vodenog tijela kao što je jezero ili rezervoar. To se zove sustav hlađenja kondenzatora. Kao i ostale komponente, sustavi za hlađenje pare i kondenzatora (slika 4) redovito se provjeravaju. Te se inspekcije odvijaju tijekom životnog vijeka nuklearnih postrojenja kako bi se potvrdilo da zastarjela oprema funkcionira kako je izvorno projektirana.

Jednostavniji sustav hlađenja koristi se kada je reaktor zatvoren na dulje vrijeme, na primjer tijekom planiranog remonta. Za funkcioniranje zahtijeva malo energije i izravno je spojen na sustav za prijenos topline. Omogućuje djelomično ispuštanje primarnog rashladnog sustava radi obavljanja pregleda i radova na održavanju (npr. pregled cijevi generatora pare ili zamjena komponenti pumpe).

[9]



Slika 4. Izgled rada isključnog sustava hlađenja u nuklearnoj elektrani [9]

3.2. PRINCIP NUKLEARNE ENERGIJE

Atomi su građeni poput minijaturnih solarnih sustava. U središtu atoma nalazi se jezgra; oko njega kruže elektroni. Jezgra se sastoji od protona i neutrona, vrlo gusto zbijenih zajedno. Vodik, najlakši element, ima jedan proton; najteži prirodni element, uran, ima 92 protona.

Jezgru atoma drži zajedno velika sila pod nazivom, "najjača sila u prirodi". Kada se bombardira neutronom, može se rascijepiti, što se naziva fisija. Nuklearne elektrane kao gorivo upotrebljavaju izotop urana U-235, koji je vrlo pogodan za fisiju. Budući da su atomi urana tako veliki, atomska sila koja ih povezuje je relativno slaba, što uran čini dobrim za fisiju.

U nuklearnim elektranama neutroni se sudaraju s atomima urana, cijepajući ih. Ovo razdvajanje oslobađa neutrone iz urana koji se pak sudaraju s drugim atomima, uzrokujući lančanu reakciju. Ova lančana reakcija se kontrolira "kontrolnim šipkama" koje apsorbiraju neutrone. Hoće li se lančana reakcija razviti i odvijati kontrolirano ovisi o bilanci nastajanja i gubitaka neutrona u nakupini fisibilnih jezgara. Nakupina mora biti dovoljno velika da bijeg neutrona u okolinu ne bi prevladao, što određuje minimalnu masu, tzv. kritičnu masu potrebnu da se lančana reakcija može održati.

U jezgri nuklearnih reaktora, fisija atoma urana oslobađa energiju koja zagrijava vodu na oko 300°C. [14]

4. OPĆI CILJ NUKLEARNE SIGURNOSTI

Za nuklearne elektrane i druge ustanove s primarnim ciljem proizvodnje energije definirana su dva sigurnosna cilja. Prvi je vrlo opće prirode. Druga dva su komplementarni ciljevi koji tumače opći cilj, koji se bavi zaštitom od zračenja i tehničkim aspektima sigurnosti. Svaka održiva metoda proizvodnje električne energije ima jedinstvene prednosti i moguće štetne učinke.

U definiciji općeg cilja nuklearne sigurnosti, radiološka opasnost podrazumijeva štetne zdravstvene učinke zračenja na radnike postrojenja i ljude u neposrednoj blizini elektrane, te radioaktivno onečišćenje tla, zraka, vode ili prehrambenih proizvoda. To ne uključuje niti jednu od konvencionalnijih vrsta opasnosti koje prate bilo koju industriju. Sustav zaštite je učinkovit kao što je navedeno u cilju ako sprječava značajan dodatak riziku za zdravlje ili riziku od drugih oštećenja kojima su kao posljedica izloženi pojedinci, društvo i okoliš. U ovoj primjeni, rizik povezan s nesrećom ili događajem definira se kao aritmetički umnožak vjerojatnosti te nesreće ili događaj i štetni učinak koji bi proizveo. Ukupni rizik tada bi bio dobiven razmatranjem cijelog skupa potencijalnih događaja i zbrajanjem proizvoda njihovih odgovarajućih vjerojatnosti i posljedica. U praksi, zahvaljujući velikim neizvjesnostima koje se mogu povezati s različitim vjerojatnostima i posljedicama, je prikladnije i korisnije razdvojiti vjerojatnosti i posljedice mogućih događaja.

Općenito govoreći, razina rizika odnosno potencijalnih opasnosti od rada nuklearnih elektrana je niža u odnosu na druge načine dobivanja električne energije. Usporedba rizika koji postoje zbog rada nuklearnih postrojenja s drugim industrijskim rizicima kojima ljudi i okoliš mogu biti izloženi, čini nužnim korištenje matematičkih modela u analizi rizika. Poznato je da, iako interesi društva zahtijevaju zaštitu od štetnih učinaka zračenja, oni se ne bave samo radiološkom sigurnosti ljudi i izbjegavanjem onečišćenja okoliša. Nuklearna energija negativno utječe na zdravlje ljudi kao i na sam okoliš prvenstveno stvaranjem

radioaktivnog otpada, oslobađanjem malih količina radioaktivnih izotopa tijekom rada, kao i moguće zagađenje u slučaju nuklearne katastrofe [7].

4.1. CILJ ZAŠTITE OD ZRAČENJA

Postoji uska veza između sigurnosti i pouzdanog rada nuklearne elektrane. Kvarovi opreme ili ljudske pogreške koje bi mogle uzrokovati nesreće i posljedičnu štetu za javnost slične su nedostacima koji dovode do faktora niskog kapaciteta ili zahtijevaju skupe popravke. Nasuprot tome, mjere koje pridonose sigurnosti postrojenja često će pomoći u postizanju dobrih rezultata rada.

Zaštita od zračenja je osigurana u nuklearnim elektranama u normalnim uvjetima, a zasebne mjere bile bi dostupne u okolnostima nezgode. Za planirane radne uvjete postrojenja i očekivane radne događaje, usklađenost sa standardima zaštite od zračenja na temelju preporuka Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP) osigurava odgovarajuću zaštitu od zračenja. [7]



Slika 5. Svjetski prepoznatljivi logo za radioaktivnost [8]

Prije spomenuti standardi zaštite od zračenja razvijeni su kako bi se spriječili štetni učinci ionizirajućeg zračenja, održavajući doze zračenja dovoljno niskim da deterministički učinci budu isključeni. Ovo se prvenstveno odnosi na kontrolirane okolnosti. U slučaju bilo kakvih nezgoda koje bi mogle uzrokovati da izvor izloženosti nije u potpunosti pod kontrolom, planirane su sigurnosne odredbe u postrojenju i protumjere izvan pogona pomoću kojih se može i mora ublažiti šteta koja proizlazi iz takvog djelovanja i to ne samo prema pojedincima, već i populaciji i okolišu. [7]

4.2 CILJ TEHNIČKE SIGURNOSTI

Glavni motiv je s velikom pouzdanošću spriječiti nesreće u nuklearnim postrojenjima; osigurati da za sve rizike koji su uzeti u obzir pri projektiranju postrojenja (čak one vrlo niske vjerojatnosti), radiološke posljedice u slučaju nesreće budu što manje; te kako bi se osiguralo da vjerojatnost teških nesreća s ozbiljnim radiološkim posljedicama budu izuzetno male. Sprječavanje nesreća prvi je sigurnosni prioritet dizajnera i operatera [7]

Međutim, ni u jednom ljudskom nastojanju ne može se jamčiti da će pokušaji sprječavanja nesreća biti potpuno uspješni. Projektanti nuklearnih elektrana stoga pretpostavljaju da su komponente, sustavi i ljudske pogreške moguće i mogu dovesti do različitih pojava, u rasponu od manjih smetnji u radu elektrane, do nesreće većih razmjera. Potrebna dodatna zaštita postiže se ugradnjom mnogih projektiranih sigurnosnih značajki u postrojenje. One su predviđene da zaustave napredovanje potencijalne nesreće, kao i ublažavanje potencijalnih posljedica. Za postojeća postrojenja projektne nesreće općenito su povezane s pojedinačnim početnim događajima; ocjenjuju se konzervativnim pretpostavkama uključujući otežavajuće kvarove i obično ne impliciraju ozbiljnije štete.[7]

Pozornost je također usmjerena na nesreće vrlo niske vjerojatnosti koje bi mogle biti uzrokovane višestrukim kvarovima ili koje bi mogle dovesti do ozbiljnijih

stanja u postojećim postrojenjima od onih koja su izričito razmatrana u dizajnu (nezgode „izvan dizajna“. osnova'). Neke od ovih teških nesreća mogle bi uzrokovati takvo pogoršanje uvjeta u postrojenju da bi se otežalo održavanje ispravnog hlađenja jezgre ili da može doći do oštećenja goriva iz drugih razloga. Te bi nesreće imale potencijal za velike radiološke posljedice, ako nije zaustavljeno širenje i proboj radioaktivnih materijala.

Budući da bi se takve nesreće velikih razmjera ipak mogle dogoditi, druge proceduralne mjere predviđene su za upravljanje njihovim tijekom i ublažavanjem njihovih posljedica. Ove dodatne mjere definirane su na temelju poslovanja iskustvom, sigurnosnih analiza i rezultata sigurnosnih istraživanja. Ograničenje posljedica nesreće zahtijeva mjere za osiguranje sigurnog isključivanja rada elektrane, kontinuirano hlađenje jezgre, odgovarajući integritet zatvorenog prostora i izvanredna pripravnost za hitne slučajeve. Stoga su teške nesreće s velikim posljedicama vrlo malo vjerojatne jer se učinkovito sprječavaju ili ublažavaju. [7]

Bez obzira na tako postignutu visoku razinu sigurnosti, povećano razumijevanje teških nesreća izvan projektiranih događaja dovelo je do komplementarnog dizajna značajki koje se provode u nekim nuklearnim elektranama koje rade, kao i proširene smjernice i/ili postupci za suočavanje s teškim nesrećama vrlo niske vjerojatnosti izvan projektne osnove.

Za buduće nuklearne elektrane, razmatranje višestrukih i teških kvarova nesreća postići će se na sustavniji i potpuniji način od faze projektiranja. To će uključivati poboljšanje prevencije nesreća (na primjer, smanjenje uobičajenih kvarova načina rada, smanjena složenost, povećana mogućnost pregleda i održavanja, proširena upotreba pasivnih značajki, optimizirano sučelje čovjek-stroj, proširena upotreba informacijske tehnologije) i daljnje smanjenje mogućnosti i posljedica radioaktivnog ispuštanja izvan lokacije.

Cilj za postojeće nuklearne elektrane u skladu s tehničkom sigurnošću je učestalost pojave ozbiljnog oštećenja jezgre koja je ispod oko 10^{-4} događaja po pogonskoj godini postrojenja [7].

4.3. KULTURA SIGURNOSTI

Izraz 'kultura sigurnosti' odnosi se na osobnu posvećenost i odgovornost svakog pojedinca uključenog u bilo koju aktivnost u radu nuklearne elektrane, no polazna točka za sva važna pitanja vezana uz sigurnost leži na komunikaciji s višim rukovodstvom elektrane. Od iznimne je važnosti uspostaviti i provesti politiku koja osigurava ispravnu praksu, s prepoznavanjem da njihova važnost ne leži samo u samim praksama, već i u okruženju sigurnosne svijesti koje stvaraju. Jasne linije odgovornosti, komunikacija i autoritet potkrijepljen odgovarajućim resursima moraju biti uspostavljeni unutar nuklearnog postrojenja; moraju se provoditi interni pregledi aktivnosti povezanih sa sigurnošću u radu, kao i kontinuirano osposobljavanje osoblja [7].

Obuka radnika naglašava važnost njihovih pojedinačnih zadataka, ne samo sa stajališta osnovnog razumijevanja te poznavanja postrojenja i opreme kojom upravljaju, već i važnost njihovog poimanja mogućih posljedica u slučaju kršenja sigurnosnih protokola.

Tablica 3. Razine obrane u postojećim nuklearnim elektranama [7]

| Razine | Zadatak | Značajna sredstva |
|----------|---|--|
| Razina 1 | Prevenција abnormalnog rada i kvarovi | Konzervativni dizajn i visoka kvaliteta gradnje i operacija |
| Razina 2 | Kontrola abnormalne kontrole rada i otkrivanje neuspjeha | Kontrola, ograničavanje i sustavi zaštite i druge značajke nadzora |
| Razina 3 | Kontrola nesreća unutar osnove dizajna | Konstruirane sigurnosne značajke i postupci u slučaju nezgode |
| Razina 4 | Kontrola teških uvjeta u biljkama, uključujući prevenciju progresije nesreće i ublažavanje posljedica | Komplementarne mjere i upravljanje nezgodama |

| | | |
|----------|--|---------------------------------|
| | teških nesreća | |
| Razina 5 | Ublažavanje radioloških posljedica značajnih ispuštanja radioaktivnih materijala | Odgovor na izvanredne situacije |

5. ČIMBENICI SIGURNOSTI VAŽNI KOD PROJEKTIRANJA NUKLEARNE ELEKTRANE

Temeljno načelo rada nuklearnih elektrana u svijetu je da je operater odgovoran za sigurnost. Podnositelj zahtjeva za dozvolu za izgradnju i/ili rad nuklearne elektrane bit će odgovoran za osiguranje da je dizajn dostavljen regulatornom tijelu, dokument koji ispunjava sve važeće sigurnosne zahtjeve. Nacionalno regulatoro tijelo odgovorno je da korisnik licence sigurno upravlja postrojenjima i da je projekt odobren. Drugi važan koncept je da je misija regulatornih tijela zaštititi ljude i okoliš, kao i certifikacija dizajna reaktora.

Sigurnosne odredbe uključuju niz fizičkih barijera između jezgre radioaktivnog reaktora i okoliša, pružanje višestrukih sigurnosnih sustava, svaki s rezervom i dizajniranih za prilagođavanje ljudske pogreške. Osim fizičkih aspekata sigurnosti, postoje i institucionalni aspekti koji nisu ništa manje važni [10].

5.1. VIŠESTRUKI IZVORI NAPAJANJA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI

Rashladni sustavi trebaju električnu energiju za rad. Pod normalnim radom, oni svoju električnu energiju dobivaju iz iste električne mreže kao i mi ostali. Nuklearna elektrana je također opremljena s višestrukim izvorima rezervnog napajanja ako se isključe iz mreže. Izvori rezervnog napajanja uključuju napajanje na licu mjesta - to jest, snagu koju proizvodi samo postrojenje. Osim toga, dostupno je sljedeće:

- dva ili tri rezervna generatora struje (slika 6)
- dva ili tri generatora struje za hitne slučajeve
- hitne baterije [9].



Slika 6. Generatori struje za hitne slučajeve [9].

Moguće je saznati što bi se dogodilo u vrlo malo vjerojatnom slučaju potpunog zamračenja stanice - situacija koja je dovela do nesreće u Fukušimi nakon velikog tsunamija koji je uništio sve dostupne izvore energije na licu mjesta. [9]



Slika 7. Spremnici dušika pod tlakom za hitne slučajeve [9]

U malo vjerojatnom slučaju gubitka teške vode, koji bi, primjerice, mogao biti uzrokovan puknućem cijevi, sustav za hitno ubrizgavanje osigurao bi da voda nastavi cirkulirati preko spremnika koji sadrže gorivo kako bi ga ohladili. Sabirni bazen smješten u podrumu zgrade reaktora prikupljao bi vodu i pumpao je natrag u reaktor dok se ne poprave. [9]

Tijekom normalnog rada, elektrane ispuštaju vrlo male količine zračenja u zrak i vodu. Ta ispuštanja dolaze iz reaktora i njegovog sustava te iz aktivnosti gospodarenja otpadom. Kako bi se smanjila ispuštanja u zrak, u sklopu ventilacijskih sustava ugrađeni su visoko učinkoviti filtri i monitori zračenja. Filtri uklanjaju preko 99% zračenja iz zraka prije nego što se ispusti u okoliš. Slični sustavi također su instalirani za uklanjanje radioaktivnosti iz ispuštanja koja se prenose vodom. Razine ispuštanja znatno su ispod propisanih granica i ne predstavljaju nikakav rizik za zdravlje i sigurnost osoba ili okoliš. Sustavi za filtriranje redovito se kontroliraju, a operateri elektrana moraju, prema zakonu, prijaviti sva radioaktivna ispuštanja u okoliš. [9]

5.2. SIGURNOST POSTROJENJA NUKLEARNE ELEKTRANE

Dugo se tvrdilo da su nesreće nuklearnih reaktora vrhunac rizika niske vjerojatnosti, ali visokih posljedica. Razumljivo, imajući to na umu, neki ljudi nisu bili skloni prihvatiti rizik, koliko god mala bila vjerojatnost. Međutim, fizika i kemija reaktorske jezgre, u kombinaciji s inženjerstvom, ukazuju na to da su posljedice nesreće zapravo mnogo manje teške od onih iz drugih industrijskih i energetskih izvora. Iskustvo, uključujući Fukushimu, to potvrđuje.

Glavne sigurnosne značajke većine reaktora su negativni temperaturni koeficijent i negativni koeficijent reaktivnosti praznine. Prvi znači da izvan optimalne razine, kako temperatura raste, učinkovitost reakcije opada (ovo se zapravo koristi za kontrolu razina snage u nekim novim dizajnim). Drugi znači da ako se u vodi za hlađenje stvori para, dolazi do smanjenja učinka moderacije, tako da manje neutrona može izazvati fisiju i reakcija se automatski usporava.

Osim kontrolnih šipki koje su umetnute kako bi apsorbirale neutrone i regulirale proces fisije, glavne projektirane sigurnosne odredbe su pomoćni

sustav za hlađenje jezgre u nuždi za uklanjanje viška topline (iako je to više za sprječavanje oštećenja postrojenja nego za javnu sigurnost) i zadržavanje.

Neke od osnovnih mjera sigurnosti u tipičnom postrojenju su: gorivo je u obliku čvrstih keramičkih (UO_2) kuglica, a produkti radioaktivne fisije ostaju uglavnom vezani unutar tih kuglica dok gorivo izgara. Peleti su pakirani unutar zatvorenih cijevi od cirkonijeve legure kako bi se formirale gorive šipke. One su zatvorene unutar velike čelične tlačne posude sa stijenkama debljine do 30 cm – pripadajući cjevovod primarnog vodenog hlađenja također je značajan. Sve je to pak zatvoreno unutar robusne armiranobetonske zaštitne konstrukcije sa zidovima debljine najmanje jedan metar. To predstavlja tri značajne barijere oko goriva, koje je samo po sebi stabilno do vrlo visokih temperatura. [9]

6. OPASNOSTI I NESREĆE U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

Nesreća u nuklearnoj elektrani Three Mile Island (Pensilvanija, SAD) 1979. godine pokazala je važnost inherentnih sigurnosnih značajki. Unatoč činjenici da se otprilike polovica jezgre reaktora otopila, radionuklidi oslobođeni iz otopljenog goriva većinom su se taložili u unutrašnjosti postrojenja ili su se otopili u kondenziranoj pari. Zaštitna zgrada u kojoj se nalazio reaktor dodatno je spriječila bilo kakvo značajno ispuštanje radioaktivnosti. Nesreća se pripisuje mehaničkom kvaru i zbunjenosti operatera. Ostali zaštitni sustavi reaktora također su funkcionirali kako je projektirano. Sustav za hitno hlađenje jezgre spriječio bi bilo kakvu štetu na reaktoru da nije bilo intervencije operatera.

U obje nesreće TMI i Fukushima problemi su počeli nakon što su reaktori zaustavljeni – odmah u TMI-ju i nakon sat vremena u Fukushimi, kada je stigao tsunami. Potreba za uklanjanjem raspadne topline iz goriva nije zadovoljena u svakom slučaju, tako da se taljenje jezgre počelo događati unutar nekoliko sati. Hlađenje zahtijeva cirkulaciju vode i vanjski hladnjak. Ako crpke ne mogu raditi zbog nedostatka energije, mora se osloniti na gravitaciju, ali to neće dovesti vodu u sustav pod tlakom – bilo u reaktorskoj tlačnoj posudi ili zatvorenom prostoru.

Katastrofa u černobilskoj nuklearnoj elektrani u Ukrajini u travnju 1986. bila je rezultat velikih nedostataka u dizajnu tipa reaktora RBMK, kršenja radnih procedura i nepostojanja sigurnosne kulture. Jedna posebna značajka dizajna RBMK-a bila je ta da je kvar rashladne tekućine mogao dovesti do snažnog povećanja izlazne snage iz procesa fisije (pozitivan koeficijent reaktivnosti praznine). Međutim, to nije bio glavni uzrok černobilske nesreće. Za razliku od zapadnog sigurnosnog inženjeringa, černobilski reaktor nije imao strukturu zadržavanja poput onih korištenih na Zapadu ili u sovjetskim projektima nakon 1980. godine.

Nesreća u Černobilu bila je jedinstven događaj i jedini put u povijesti komercijalne nuklearne energije da je došlo do smrtnih slučajeva povezanih s radijacijom. Glavni pozitivni ishod ove nesreće za industriju bilo je osnivanje Svjetske udruge operatera nuklearnih elektrana (WANO), na temelju američkog presedana. [9]

6.1. OPASNOSTI OD KEMIJSKE REAKTIVNOSTI

Zakonska ograničenja koja se provode su važne vrijednosti koje se ne smiju prekoračiti. Operateri su dužni smanjiti zračenje doze na "najnižu koliko je razumno izvedivo", pravni izraz koji znači da moraju imati u određenom mjestu mjere koje osiguravaju da su primljene doze zračenja vrlo niske. U stvarnosti, prosječna doza koju je primio radnik ili osoba u blizini elektrane zbog rada nuklearne elektrane je daleko manja od zakonskih granica. Tipično radnik u nuklearnoj elektrani prima samo 0,18 mSv zračenja godišnje, što je mnogo manje od tipičnih izvora zračenja, a manje od jedne stotine Zakonskog ograničenja od 20 mSv. [15]

U svakom nuklearnom reaktoru tamo gdje se koristi obična voda (a ne teška), vodik nastaje radiolitičkom razgradnjom vode. To se treba riješiti kako bi se izbjegla mogućnost eksplozije s prisutnim kisikom, a mnogi reaktori su naknadno opremljeni pasivnim autokatalitičkim rekombinatorima vodika u svom zatvorenom prostoru, zamjenjujući vanjske rekombinatore koji su morali biti

spojeni i napajani, izolirani iza radioloških barijera. Također u nekim vrstama reaktora, posebno u tipovima rane kipuće vode, zaštitni omotač postaje inertan ubrizgavanjem dušika. U situaciji nesreće kao što je u Fukushima gdje je gorivo postalo vrlo vruće, mnogo vodika nastaje oksidacijom cirkonijeve obloge goriva u pari na oko 1300°C. To je izvan mogućnosti normalnih rekombinatora vodika da se nose s tim, a operateri se moraju osloniti na ispuštanje u atmosferu ili neutralizaciju spremnika dušikom. [15]

6.2. POŽARI I EKSPLOZIJE

1975. godine u nuklearnoj elektrani Griefswald u Istočnoj Njemačkoj, došlo je do požara kabela uzrokovanog kratkim spojem i neispravno postavljenom diodom. Nepredvidivo i slučajno, tijekom požara su uništeni neki upravljački i strujni kabeli. To je uzrokovalo kvar komponentni važnih za sigurnost. Ova ozbiljna nesreća uzrokovana je ljudskim neuspjehom i nedostatkom iskustva, nedostatkom prostornog odvajanja sigurnosnih sustava i nedovoljnom kontrolom kvalitete. Požar u nuklearnoj elektrani Sellafield u Velikoj Britaniji zbio se 1957. godine. Postrojenje se sastojalo se od dva nuklearna reaktora hlađena plinom, a do nesreća je došlo kada je rutinsko zagrijavanje grafitnih kontrolnih blokova reaktora izmaklo kontroli uzrokovavši pucanje susjednih uranskih uložaka. Tako oslobođeni uran počeo je oksidirati, oslobađajući radioaktivnost i izazivajući požar koji je gorio 16 sati prije nego je ugašen. Požar je ostavio oko 10 tona radioaktivnog goriva otopljenog u jezgri reaktora. [16]

7. PRAVILA PRIDRŽAVANJA ZNR PRI RADU U NUKLEARNIM ELEKTRANAMA

Osnovna pravila pridržavanja ZNR pri radu u nuklearnim elektranama u osnovi podrazumijeva radiološku zaštitu i kemijski program kojim se prate kemijski parametri rashladnih sustava. Zaštita od zračenja u nuklearnim elektranama podrazumijeva provođenje postupaka zaštite radnika od zračenja ili izbjegavanja zračenja. Zadaće zaštite od zračenja su i nadzor izloženosti zaposlenika zračenju, sprječavanje širenja izvora zračenja, mjerenja u radnom okruženju, mjerenja koncentracija radioaktivnosti u emisijama u zrak i vode (mjerenja ispusta) te u okolini elektrane. [11]

Radnici koji rade u nuklearnim postrojenjima moraju imati posebno stručno obrazovanje koje se stječe redovitim obrazovanjem, specijalističkim obrazovanjem ili dodatnim obrazovanjem o čemu moraju imati pisani dokaz.

7.1. FORMALNA OBUKA RADNIKA

Mnoge velike nuklearne elektrane imaju formalne matrice obuke ne samo za nove zaposlenike, već i za zaposlenike na mnogim razinama i položajima u cijeloj njihovoj organizaciji. Te matrice obuke omogućuju tvrtkama da identificiraju i razviju planove za smanjenje nedostataka kompetencija kod zaposlenika prije nego što budu unaprijeđeni ili promijene posao. Tablica 4. prikazuje primjer popisa obuke o sigurnosti procesa za nove zaposlenike. Ona je samo skraćeni primjer ovog načina obuke; puna matrica obuke vjerojatno će uključivati informacije kao što su pred uvjetni tečaj i je li tečaj temeljen na računalnoj obuci ili obučavanje u učionici. Malo ili srednje poduzeće neće nužno morati provoditi formalnu matricu obuke. Svaka tvrtka će imati vlastitu metodu za određivanje nove obuke potreba inženjera. [12]

Tablica 4. Primjer pojednostavljene matrice razreda obuke o sigurnosti procesa.
[12]

| Tečaj | Namijenjeni radnici | Trajanje |
|--|---|---|
| Razumijevanje i upravljanje zapaljivim atmosferama | Obavezno za sve inženjere, kemičare uključene u dizajn, održavanje i rad | Prve dvije godine |
| PHA metodologija i trening vođenja tima | Preporučeno tehničkim osobama uključenih u dizajn, operacije i sigurnosne preglede, uključujući MOC-ove i PHA-ove. Potrebno za PHA vođenje tima | Prve dvije godine kao kao i zahtjev zatim za voditelja PHA tima |
| MOC pregled sigurnosti treninga vođe time | Preporučeno za članove glavnog tima MOC-a Preporučljivo za MOC sigurnosne voditelje timova koji nisu pohađali trening voditelja PHA tima | Prve dvije godine |
| Posljedična procjena | Preporučeno uključenim osobama u modeliranju ispuštanja kemikalija i energije. | Prije upotrebe posljedično modeliranih alata |

| | | |
|--|---|---|
| Primjena uređaja za otpuštanje tlaka | Obavezno za inženjere i preporučuje se dizajnerima uključenih u PRD dizajn, primjenu, dimenzioniranje i odabir. | Prije uključivanja u dizajnu, primjeni, dimenzioniranju i odabiru PRD-ova |
| Dizajn i primjena SCAI-a i sigurnosno razrađenih sustava | Potreban za I&E, kontrolu i Inženjere procesa i preporučuje se dizajnerima uključenih u dizajne, preglede i specifikacije sustava isključivanja | Namijenjeno prije uključenosti u pregled, dizajniranje ili korištenje sustava za isključivanje ili preporučeno korištenje unutar prve dvije godine. |
| Istraga nesretnih slučajeva | Preporučljivo inspektorima i sudionicima nesreća | Prije vođenja ili sudjelovanja u istrazi incidenata |

Još jedna značajka mnogih sigurnosnih programa je redovit obilazak određenog dijela pogona ili inspekcija područnog osoblja. Organizacije mogu imati popise stvari koje treba pogledati za vrijeme obilaska pogona koje uključuju stavke kao što su:

- Jesu li prolazi sigurni i čisti
- Da li je osvjetljenje prihvatljivo
- Jesu li prijenosna crijeva istrošena
- Jesu li izlazi slobodni ili blokirani

- Jesu li oznake vidljive ili istrošene.

U svakom industrijskom okruženju poslodavac će zahtijevati da inženjeri razumiju i pridržavaju se svih sigurnosnih pravila. Čak i kao novi zaposlenik u industriji, očekuju se inženjeri koji će biti uzor u svakom aspektu zaštite na radu, prijavljivanju i/ili ispravljanju bilo kojih zapažanja nesigurnih stanja ili radnja. Uvijek treba biti spreman prijaviti sve incidente, uključujući i ozljede ili potencijalnih ozljeda koje se dogode. [12]

Primjeri nekih zadataka vezanih uz sigurnost procesa u kojima novi inženjer može sudjelovati, ali možda nije bio podučavan njima u školi uključuje; cjelokupnu strukturu sustava upravljanja sigurnošću objekta, kada i kako provoditi analize opasnosti procesa, upravljanje promjenama i sigurnosti prije pokretanja pregleda, procjena posljedica ispuštanja opasnih materijala, dimenzioniranje uređaja za pomoć u hitnim slučajevima, kako napraviti analizu razine zaštite, kao i sigurnosnih procesa i incidenta u organizaciji. [12]

8. NAPREDNI DIZAJN REAKTORA

Nekoliko se problema javlja pri produljenju životnog vijeka nuklearnih elektrana koje su izvorno projektirane za nominalni radni vijek od 30 ili 40 godina. Sustavi, strukture i komponente čije se karakteristike postupno mijenjaju s vremenom ili uporabom predmet su pozornosti, koja se primjenjuje sa znatno većim znanstvenim i tehničkim znanjem od onoga koje je bilo dostupno izvornim dizajnerima prije mnogo desetljeća. Projekti nuklearnih elektrana koji se razvijaju za implementaciju u nadolazećim desetljećima sadrže brojna sigurnosna poboljšanja temeljena na operativnom iskustvu. Prva dva od ovih naprednih reaktora počela su s radom u Japanu 1996.

Jedna glavna karakteristika koja im je zajednička (osim sigurnosnog inženjeringa koji je već standard u zapadnim reaktorima) su pasivni sigurnosni sustavi, koji ne zahtijevaju intervenciju operatera u slučaju većeg kvara. Glavna

metrika koja se koristi za procjenu sigurnosti reaktora je vjerojatnost taljenja jezgre zbog gubitka rashladnog sredstva. Ovi novi dizajni imaju jedan ili dva reda veličine manju vjerojatnost da će pretrpjeti nesreću taljenja jezgre od starijih.

Pri dugogodišnjem radu nuklearne elektrane, neke se komponente jednostavno istroše, korodiraju ili degradiraju na nisku razinu učinkovitosti i njih je potrebno zamijeniti. Generatori pare su najistaknutiji i najskuplji od njih, a mnogi su zamijenjeni nakon otprilike 30 godina kada reaktor inače ima izgled da radi 60 godina. Drugo pitanje je zastarjelost. Na primjer, stariji reaktori imaju analogne instrumente i upravljačke sustave, te se mora suočiti s pitanjem jesu li oni zamijenjeni digitalnim, tijekom velikog remonta u srednjem životnom vijeku ili se jednostavno održavaju. Treće, svojstva materijala mogu se pogoršati s starenjem, osobito toplinom i neutronskim zračenjem. U nekim ranim ruskim reaktorima s vodom pod tlakom, tlačna posuda je relativno uska i stoga je izložena većem bombardiranju neutronima nego šira. To postavlja pitanja o krтости i mora se pažljivo provjeriti prije produljenja licenci. Performanse opreme stalno se prate kako bi se identificirale greške i kvarovi komponenti. [9, 13]

9. ZAKLJUČAK

Zaštita na radu u području nuklearnih elektrana je ključni dio prilikom obavljanja poslova u toj ustanovi. Sve osobe uključene u rad u nuklearnoj elektrani, a to su radnici i poslodavci, nužni su biti svjesni posljedica koje bi ih snašle u slučaju da se ne pridržavaju propisanih pravila zaštite na radu na za to predviđena mjesta. Osnovna pravila pridržavanja ZNR pri radu u nuklearnim elektranama u osnovi podrazumijeva radiološku zaštitu i kemijski program kojim se prate kemijski parametri rashladnih sustava. Važno je naglasiti da radnici koji rade u nuklearnim postrojenjima moraju imati posebno stručno obrazovanje koje se stječe redovitim obrazovanjem, specijalističkim obrazovanjem ili dodatnim obrazovanjem kako bi se mogli pridržavati svih pravila zaštite na radu.

Usprkos mnogim potencijalnim rizicima i opasnostima s kojima se radnici mogu susresti pri radu u nuklearnom pogonu, razina rizika odnosno potencijalnih opasnosti je zapravo niža u odnosu na druge načine dobivanja električne energije.

10. LITERATURA

[1] Zakon o zaštiti na radu, NN 71/14, 118/14, 154/14 , 94/18, 96/18.

<https://www.zakon.hr/z/167/Zakon-o-za%C5%A1titi-na-radu>

[2] Zaštita na radu – psihofiziološki naponi i ozljede na radu

<https://preventa.hr/zastita-na-radu-upit/psihofizioloski-naponi>

[3] Ivan Krmek, „Pravila zaštite na radu i opća načela prevencije“, Zagreb (2022.)

<https://centarznr.hr/osnovna-pravila-zastite-na-radu/>

[4] Ujedinjeni narodi „Međunarodni dan zaštite na radu“ (2022.)

<https://www.un.org/en/observances/work-safety-day>

[5] Novonastali rizici na poslovanju

<https://www.oparya.com/world-day-for-safety-and-health-at-work-world-industrial-safety-day-2023-theme/>

[6] Pružanje prve pomoći na radnom mjestu

<https://www.zastitanaradu.com.hr/novosti/Pruzanje-prve-pomoci-na-radnom-mjestu---obveze-poslodavca-128>

[7] Međunarodna savjetodavna skupina za nuklearnu sigurnost, „Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3 Rev. 1 INSAG-12“, Beč (1999.)

https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/p082_scr.pdf

[8] Radiation Safety, James Madison University

<https://www.jmu.edu/labsafety/radiation.shtml>

[9] World Nuclear Association, Safety of Nuclear Power Reactors

<https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>

[10] Internacionalna agencija za atomsku energiju (IAEA), „Safety of Nuclear Power Plants: Design“, Beč (2012.)

https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1534_web.pdf

[11] Nuklearna elektrana Krško: <https://www.nek.si/hr/pogon/podrska-pogonu#kemijski-program>

[12] Centar za sigurnost kemijskih procesa: „Introduction to process safety for undergraduates and engineers“, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey (2016.), ISBN: 978-1-118-94950-4

[13] Explosions at Nuclear Power Plants, U.S. Government Accountability Office, 1978. <https://www.gao.gov/products/emd-78-99>

[14] Sindikat zabrinutih znanstvenika: „Kako se nuklearna energija proizvodi“, SAD (2014.) <https://www.ucsusa.org/resources/how-nuclear-power-works>

[15] ARUP group limited „Pregled opasnosti nuklearne elektrane“

<file:///C:/Users/ploko/Downloads/Nuclear%20Hazards%20Brochure.pdf>

[16] Britannica: Windscale fire, <https://www.britannica.com/event/Windscale-fire>
, pristupljeno: 28.05.2023.

11. PRILOZI

11.1 Popis slika

| | |
|---|----|
| Sl. 1. Svjetski dan zaštite na radu | 7 |
| Sl. 2 Primjer sustav za isključivanje u slučaju opasnosti | 13 |
| Sl. 3 Parni sustav..... | 14 |
| Sl. 4 Izgled rada isključnog sustava hlađenja u nuklearnoj elektrani..... | 15 |
| Sl. 5. Svjetski prepoznatljivi logo za radioaktivnost..... | 18 |
| Sl. 6. Generatori struje za hitne slučajeve..... | 23 |
| Sl. 7. Spremnici dušika pod tlakom za hitne slučajeve..... | 23 |

11.2 Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tab 1. Broj zaštitnih sredstava u ormariću prve pomoći za poslodavce koji zapošljavaju do 20 radnika..... | 9 |
| Tab 2. Broj zaštitnih sredstava u ormariću prve pomoći za poslodavce koji zapošljavaju do 5 radnika..... | 10 |
| Tab. 3. Razine obrane u širini u postojećim nuklearnim elektranama..... | 21 |
| Tab. 4. Primjer pojednostavljene matrice razreda obuke o sigurnosti procesa..... | 29 |