

Nuklearne nesreće

Plevančić, Kristina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:484129>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-01**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Kristina Plevančić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

NUKLEARNE NESREĆE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc.dr.sc. Vesna Očelić Bulatović

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

Predsjednica prof. dr.sc. Anita Štrkalj, član doc. dr.sc. Vesna Očelić Bulatović, član prof. dr.sc. Ivan Brnardić, zamjenski član prof. dr.sc. Ljerka Slokar Benić

Sisak, rujan 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: KRISTINA

PREZIME: PLEVANČIĆ

MATIČNI
BROJ: BS-71/2020

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

NUKLEARNE NESREĆE

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, _____

(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.

Posebno se zahvaljujem se voditeljici i završnog rada doc.dr.sc. Vesni Očelić Bulatović na vodstvu i strpljenju tijekom cijelog procesa pisanja rada.

Također, želim se zahvaliti svojoj obitelji na njihovoj neizmjerljivoj podršci i razumijevanju tijekom studija. Hvala svim kolegama i prijateljima koji su mi pružili podršku, dijelili svoje znanje i iskustva te poticali moj akademski rast.

NUKLEARNE NESREĆE

Sažetak

U ovom radu analiziraju se posljedice ozbiljnih nuklearnih nesreća koje su se dogodile u tri ključne nuklearne elektrane: Otok Tri Milje (1979.), Černobil (1986.), i Fukushima (2011.). Rad detaljno proučava različite aspekte tih nesreća, istražujući njihov utjecaj na zdravlje ljudi, ekonomiju i okoliš, te kako su te posljedice oblikovale lokalne zajednice i širu društvenu dinamiku. S posebnim fokusom na svaku od ovih nesreća, rad razmatra broj žrtava, gubitak resursa i dugoročne ekološke implikacije koje i dalje postoje. Također se analizira važnost sigurnosnih mjera, komunikacije i suradnje svih relevantnih dionika kako bi se naučene lekcije primijenile u budućim nepredviđenim situacijama. Kroz ovaj pregled, rad naglašava ključna naučena iskustva iz spomenutih nuklearnih nesreća i ističe korake prema boljoj pripremljenosti i efikasnoj komunikaciji u slučaju budućih nuklearnih nesreća.

Ključne riječi: nuklearne nesreće, Otok Tri Milje, Černobil, Fukushima, posljedice, naučene lekcije, sigurnost

NUCLEAR ACCIDENTS

Abstract

This paper analyzes the consequences of severe nuclear accidents that occurred at three major nuclear power plants: Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986), and Fukushima (2011). The paper examines in detail various aspects of these accidents, their impacts on human health, the economy, and the environment, and the ways in which these consequences have shaped local communities and broader social dynamics. With particular attention to each of these disasters, the paper examines the number of fatalities, the loss of resources, and the long-term ecological impacts. The importance of safety measures, communication, and collaboration among all stakeholders will also be analyzed in order to apply lessons learned to future accidents. Through this review, the paper highlights key lessons learned from the mentioned nuclear accidents and highlights steps towards better preparedness and effective communication in case of future nuclear accidents.

Keywords: nuclear accidents, Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima, consequences, lessons learned, safety

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. NUKLEARNA ENERGIJA.....	1
2.1. Nuklearna fisija.....	2
2.2. Zračenje.....	3
2.3. Nuklearne nesreće.....	5
3. NUKLEARNA NESREĆA NA OTOKU TRI MILJE.....	6
3.1. Sigurnosni propusti i tehničke pogreške.....	7
3.2. Posljedice nesreće.....	8
3.2.1. Posljedice na stanovništvo.....	9
3.3. Naučene lekcije.....	9
4. ČERNOBILSKA KATASTROFA.....	11
4.1. Tehničke i sigurnosne pogreške.....	11
4.2. Posljedice nesreće.....	13
4.2.1. Kontaminacija kopnenog ekosustava.....	13
4.2.2. Kontaminacija vodenog ekosustava.....	14
4.2.3. Posljedice na stanovništvo.....	15
4.3. Naučene lekcije.....	16
5. NUKLEARNA NESREĆA U FUKUSHIMA DAIICHI.....	16
5.1. Sigurnosni propusti i tehničke pogreške.....	17
5.2. Posljedice nesreće.....	19
5.2.1. Kontaminacija kopnenog ekosustava.....	20
5.2.2. Kontaminacija vodenog ekosustava.....	21
5.2.3. Posljedice na stanovništvo.....	21
5.3. Naučene lekcije.....	22
6. ZAKLJUČAK.....	24
7. LITERATURA.....	25

1. UVOD

Nuklearna energija, iako s niskim emisijama stakleničkih plinova i neosporno učinkovita, ostaje najkontroverznijim oblikom proizvodnje električne energije u suvremenom društvu. Nuklearne elektrane su visoko složeni sustavi koji su izloženi različitim rizičnim faktorima kao što su mehanički kvarovi, materijalni nedostaci, ljudske pogreške, potresi, tsunamiji, poplave, terorizam itd. Uvijek postoji (nadamo se malen) rizik od nuklearne nesreće koje predstavljaju složene i ozbiljne incidente koji imaju dubok i dugoročan utjecaj na čovječanstvo, okoliš i energetska politiku. U svijetlu nedavnih događaja kao što su nesreće u nuklearnim elektranama Otok Tri Milje (SAD, 1979.), Fukushima Daiichi (Japan, 2011.) i Černobil (Ukrajina, 1986.), teškoće u ocjeni sigurnosti i upravljanju rizicima postale su izazov koji zahtijeva ne samo stručnost, već i odgovornost prema ljudima i okolišu [1].

Nuklearne nesreće se mogu definirati kao neplanirani događaji u kojima postoji nedostatak kontrole nad izvorima zračenja, što može dovesti do izravnih ili neizravnih rizika za život, zdravlje ili materijalna dobra ljudi i okoliša. Jedan od ključnih čimbenika koji doprinosi kompleksnosti nuklearne energije je pitanje sigurnosti. Nesreće u nuklearnim elektranama imaju potencijalno katastrofalne posljedice koje se protežu daleko izvan granica same elektrane. Način na koji se mogu dogoditi nuklearne nesreće s izvorima ionizirajućeg zračenja, intenziteti doza koje mogu postojati u okruženju izvora zračenja, vrste i količine radioaktivnih materijala koji se mogu raspršiti u okolišu te potencijalna razina izloženosti zračenju za stanovništvo i zaposleno osoblje mogu biti bitno različiti kod nuklearnih nesreća ovisno o izvorima zračenja [2].

Proučavanje povijesti nuklearnih nesreća i njihovog utjecaja na javnost i oblikovanje nuklearne politike ističe značaj nuklearne sigurnosti i potrebu za sustavnim dokumentiranjem takvih nesreća kako bi se bolje pripremili za potencijalne buduće nesreće. Također, razmatranje njihovih posljedica na okoliš, zdravlje ljudi i političke odluke ključno je za razumijevanje njihovog stvarnog utjecaja. Osim trenutačnih i vidljivih posljedica, nuklearne nesreće donose i dugoročne i nevidljive izazove. One postavljaju pitanja o radijaciji i njezinim učincima na ljudsko zdravlje, o čišćenju i dekontaminaciji zagađenih područja, te o dugoročnim ekološkim i zdravstvenim posljedicama [3].

2. NUKLEARNA ENERGIJA

Nuklearne elektrane proizvode električnu energiju gotovo na isti način kao i druge termoelektrane. Izgaranje goriva koristi se za stvaranje topline, koja se zatim pretvara u paru, a para se koristi za rad turbina, koje zauzvrat proizvode električnu energiju. Razlikuju se u tome što proizvode toplinu nuklearnom fisijom, a ne izgaranjem goriva. Nuklearni reaktori su postrojenja gdje izotopi urana, plutonija ili torija prolaze procese nuklearne fisije. Na temelju energije neutrona koji izazivaju većinski broj fisija, kategoriziraju se u termičke reaktore (gdje većinu fisija stvaraju termički neutroni) i brze reaktore (gdje fisije prvenstveno uzrokuju brzi neutroni) [3].

Reaktorske tehnologije razvijane su diljem svijeta od početka industrije nuklearne energije, a razlikuju se po izboru tehnoloških opcija. Tri ključna čimbenika koriste se za kategorizaciju reaktora: vrsta fisibilnog materijala koji se koristi kao nuklearno gorivo, poput

prirodnog urana, obogaćenog urana ili plutonija; rashladno sredstvo koje se koristi za povrat i prijenos topline proizvedene u jezgri i moderator, koji određuje prosječnu energiju neutrona u jezgri reaktora, npr. obična voda, teška voda, grafit. Kombinacija ove tri komponente proizvodi reaktore s različitim karakteristikama koji ne zadovoljavaju kriterije odabira reaktorske tehnologije na isti način. Ovi tehnički ili ekonomski kriteriji su se mijenjali tijekom vremena. Na primjer, prve razvijene tehnologije bile su potrebne za rad s prirodnim uranom kao gorivom, čime se ograničava izbor moderatora. S razvojem tehnologija obogaćivanja urana, uvedene su nove reaktorske tehnologije koje rade s obogaćenim uranom [1].

Postoji nekoliko vrsta reaktora koji se koriste za proizvodnju komercijalne električne energije diljem svijeta. Neki od njih danas više nisu u upotrebi. Popularna i korisna metoda kategorizacije reaktora je prema vrsti korištenog rashladnog sredstva:

- Lakovodni reaktori (LWR – eng. light water reactor) su hlađeni i moderirani običnom vodom čine oko 80% komercijalnih reaktora u svijetu. Dijele se na dvije glavne vrste – reaktori s vodom pod tlakom (PWR -eng. pressurized water reactor), koji uključuje rusku varijantu (VVER - eng. water-water energetic reactor), i reaktori s kipućom vodom (BWR – eng. boiling water reactor). Većina od preostalih 20% reaktora hladi se teškom vodom ili plinom.
- Reaktori hlađeni plinom (GCR – eng. gas-cooled reactor) dijele se na dvije vrste: Magnox (nazvan po leguri magnezija koja se koristi za oblaganje gorivih elemenata) i napredni reaktor hlađen plinom (AGR- eng. advanced gas-cooled reactor). Oba koriste ugljični dioksid kao rashladno sredstvo i grafit kao moderator. Razlikuju se po vrsti goriva, gdje Magnox koristi prirodni uran kao gorivo, a AGR obogaćeni uran.
- Lakovodni grafitni reaktor (LWGR – eng. light water-cooled graphite-moderated reactor), najčešće je korišten tip reaktora u bivšem SSSR-u (uključujući i uništenu černobilsku elektranu). LWGR reaktor je reaktor hlađen vodom s pojedinačnim kanalima za gorivo koji koristi grafit kao moderator.
- Teškovodni reaktor pod tlakom (PHWR – eng. pressurized heavy-water reactor) poznat kao CANDU, je jedina vrsta reaktora koja koristi tešku vodu (D_2O) kao rashladno sredstvo i moderator u komercijalnoj upotrebi.
- Termalni reaktor, poznati kao i brzi oplodni reaktor (FBR – eng. fast breeder reactor). Tehnološki iskorak u usporedbi s konvencionalnim energetske reaktorima. FBR reaktori su vrsta nuklearnih reaktora koji proizvode više fisijских materijala nego što ih troše [4].

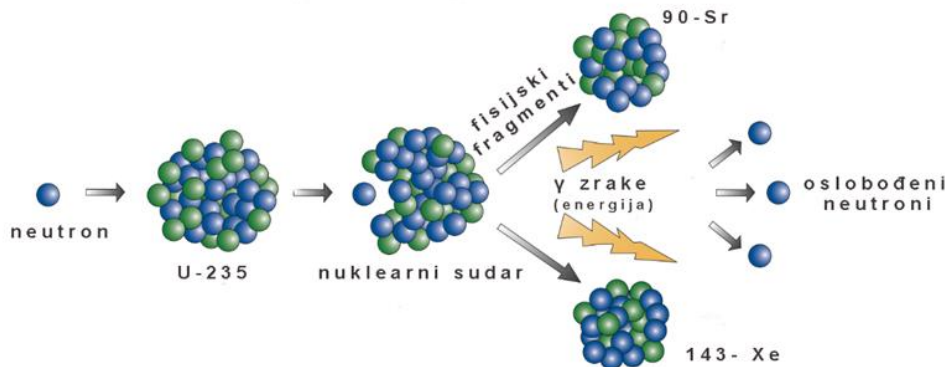
Neki reaktori su namijenjeni istraživanju i ne proizvode električnu energiju. Koriste se, za mjerenje neutronske svojstava reaktora, za proučavanje ponašanja materijala i goriva pod utjecajem zračenja, za mjerenje utjecaja nesreća, za provjeru valjanosti novih koncepata i prototipova itd. Istraživački reaktori također se koriste za proizvodnju radioelemenata koji se koriste u medicinskoj industriji za potrebe dijagnostike i radioterapije [4].

2.1. Nuklearna fisija

Nuklearna fisija je jednostavnim rječnikom cijepanje velikih atoma na manje atome pri čemu se oslobađa velika količina energije. Reakcija nuklearne fisije se može javljati prirodno ili umjetno, potaknuto čovjekovim djelovanjem. Prirodno se javlja u slučaju radioaktivnog raspadanja, gdje su elementi koji prolaze kroz ovaj proces poznati kao radioaktivni izotopi. Radioaktivni izotopi su atomi s nestabilnim jezgrama zbog viška energije. Ova nestabilnost uzrokuje njihovo spontano raspadanje ili "cijepanje" na dva manja atoma. Novi atomi koji

nastaju nakon cijepanja bit će sastavljeni od različitih elemenata u usporedbi s izvornim radioaktivnim izotopom, a njihove jezgre bit će stabilnije. Vrijeme kada će se određeni radioaktivni izotop raspasti ne može se predvidjeti, ali možemo izračunati prosječnu brzinu tog raspada, koja se naziva "vrijeme poluraspada" (poluživot). Vrijeme poluraspada odnosi se na vrijeme potrebno da se određena količina raspadljive tvari smanji za pola. Ono može značajno varirati, krećući se od nekoliko sekundi do milijuna godina [3].

Nuklearna fisija (slika 1.) odvija se unutar nuklearnog reaktora s ciljem proizvodnje topline za generiranje električne energije. Nuklearni reaktor je struktura od čelika koja sadrži nuklearno gorivo koje se sastoji od fisibilnih čestica tj. čestica koje se mogu potaknuti na cijepanje. Fisija u nuklearnom reaktoru se događa kada se atom potakne na cijepanje, što rezultira oslobađanjem značajne količine energije. Najčešće korišteno nuklearno gorivo u komercijalnim nuklearnim elektranama je uran (označen kemijskim simbolom U). Uran je kemijski metalni element koji se prirodno nalazi u zemljinoj kori. Prirodni uran se pojavljuje u tri različita izotopa od čega 99,3 % urana čini U-238, 0,7 % U-235, dok manje od 0,01 % čini U-234. U-235 je jedini fisibilni izotop urana koji se prirodno javlja i stoga je najčešće korišten materijal za nuklearno gorivo [3].



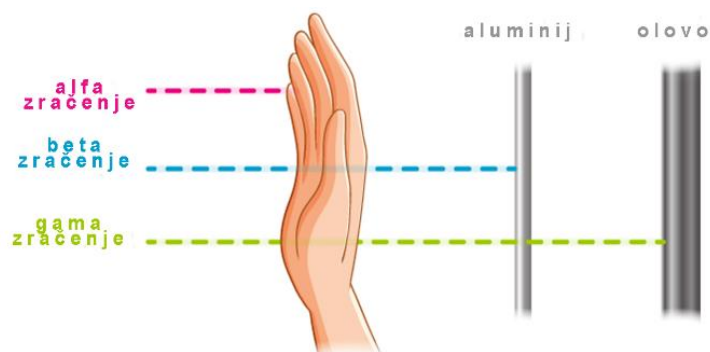
Slika 1. Nuklearna fisija [1]

2.2. Zračenje

Zračenje je oblik energije koji se širi u obliku valova ili tokova čestica i prisutno je u mnogim različitim oblicima u okolišu. U prirodi postoji mnogo radioaktivnih izotopa, kao što su uran i torij, koji su nastali tijekom formiranja Sunčevog sustava i kao rezultat interakcije kozmičkih zraka s molekulama u atmosferi. Čovjek je tokom života izložen pozadinskom zračenju koje predstavlja stalno prisutno ionizirajuće zračenje u prirodnom okolišu. UNSCEAR (Znanstveni odbor Ujedinjenih naroda za učinke atomskog zračenja) je definirao četiri glavna izvora izloženosti javnosti prirodnom zračenju: kozmičko zračenje, zemaljsko zračenje, udisanje i gutanje. Dodatno, ljudi su izloženi zračenju koje je rezultat ljudske aktivnosti, kao što su medicinski tretmani i aktivnosti koji uključuju uporabu radioaktivnih materijala. Radioizotopi se proizvode kao nusprodukti rada nuklearnih reaktora i generatora radioizotopa, poput ciklotrona. Mnogi radioizotopi koje je stvorio čovjek koriste se u područjima nuklearne medicine, biokemije, proizvodne industrije i poljoprivrede. Uran se upotrebljava u nuklearnim elektranama kako bi potaknuo lanac reakcija koje rezultiraju proizvodnjom pare, koja pokreće turbine za proizvodnju električne energije. Nuklearne

elektrane često ispuštaju male količine radioaktivnog materijala u okoliš na regulirani način kao dio svojih rutinskih operacija. Ove emisije su pažljivo kontrolirane kako bi se osiguralo da su doze zračenja za javnost znatno ispod dopuštenih ograničenja [6].

Zračenje dolazi u dva temeljna oblika: neionizirajuće i ionizirajuće. Neionizirajuće zračenje karakterizira manja energija koja nije dovoljna kako bi izbacila elektrone iz atoma i stvorila ione. Primjeri neionizirajućeg zračenja uključuju Sunčevu svjetlost, infracrveno zračenje, radio valove, mikrovalove i vidljivu svjetlost. S druge strane, ionizirajuće zračenje posjeduje dovoljno energije za izbacivanje elektrona iz atoma što dovodi do stvaranja iona. Ioni su molekule i atomi koji su električki nabijeni nakon ovog procesa. Ionizirajuće zračenje uključuje zračenje koje dolazi od prirodnih i umjetnih radioaktivnih materijala. Razlikujemo nekoliko vrsta ionizirajućeg zračenja (slika 2.): alfa (α) zračenje, beta (β) zračenje, neutronska (n) zračenje, te fotonsko zračenje koje obuhvaća gama (γ) i rendgensko zračenje. Fotonsko zračenje može prodrijeti vrlo duboko i ponekad mu se intenzitet može smanjiti samo materijalima koji su prilično gusti, poput olova ili čelika. Općenito, fotonsko zračenje može prijeći puno veće udaljenosti od alfa ili beta zračenja i može prodrijeti u tjelesna tkiva i organe kada je izvor zračenja izvan tijela. Važno je napomenuti da fotonsko zračenje može biti opasno ako se nuklearne tvari koje emitiraju fotone unesu u tijelo [6].



Slika 2. Vrste zračenja [7]

Izloženost ionizirajućem zračenju predstavlja potencijalni rizik za zdravlje ljudi. Povećanje učestalosti određenih karcinoma, koji se inače javljaju prirodno (spontano), može rezultirati povećanim izlaganjem ionizirajućem zračenju. To povećanje je proporcionalno dozi zračenja tj. što je veća doza, to je veći rizik karcinoma. Važno je napomenuti da dosadašnja istraživanja nisu pokazala da osobe koje su kontinuirano izložene niskim dozama zračenja, nižim od otprilike 100 milisiverta (mSv) godišnje, imaju povećani rizik od razvoja malignih ili drugih bolesti. Većina sudionika u istraživanjima koji su pokazali negativne zdravstvene učinke bili su izloženi visokim dozama (više od 100 mSv) zračenja u vrlo kratkom vremenskom razdoblju, što se naziva "akutnom" izloženošću. S druge strane, osobe izložene zračenju zbog nuklearnih aktivnosti obično primaju znatno niže doze (ispod 100 mSv) tijekom dužeg razdoblja, što se opisuje kao "kronična" izloženošću. Na temelju procjena, rizik od narušavanja zdravlja je 1,5-2 puta veći kod akutne izloženosti zračenju u usporedbi s kroničnom izloženošću [6].

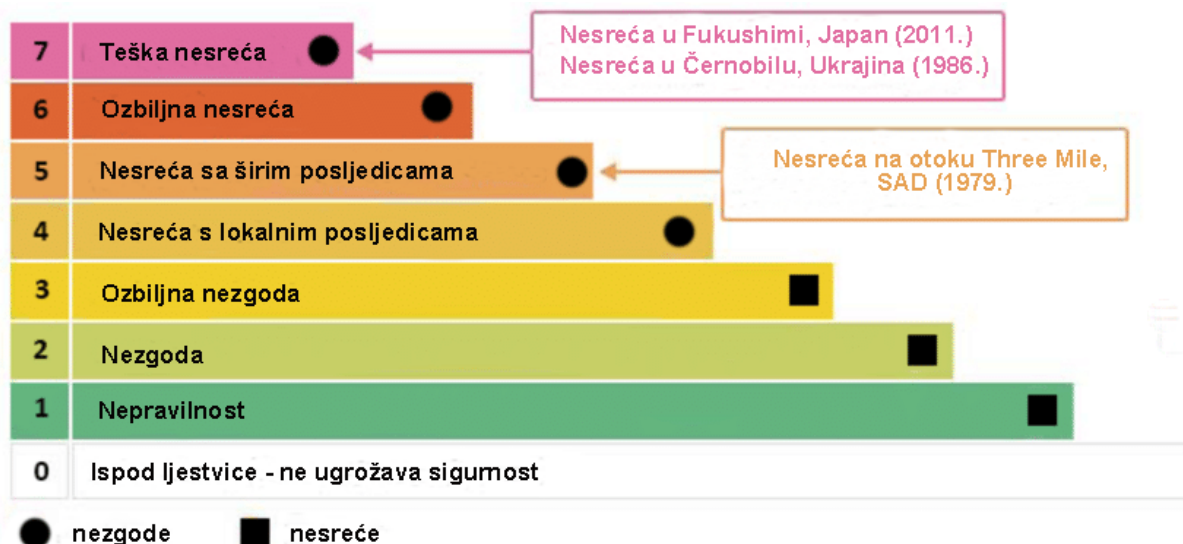
Ionizirajuće zračenje koje je rezultat ljudskih aktivnosti strogo je regulirano. Kako bi se smanjila izloženost zračenju za zaposlenike i opću populaciju, postavljene su granice doza zračenja. Također, oni koji posjeduju licence za rad s radioaktivnim materijalima moraju poduzeti sve razumne tehničke korake kako bi održavali razine zračenja što je niže moguće,

poznato kao "as low as (is) reasonably achievable" (ALARA). ALARA je načelo optimizacije u zaštiti od zračenja koje se primjenjuje kako bi se osiguralo da pojedinačne doze zračenja, doze na radnom mjestu i doze za opću populaciju budu što niže, uzimajući u obzir društvene i ekonomske faktore. ALARA ne postavlja stroge granice doza; to je praksa kojoj je cilj održavati doze na minimalnoj razini. Također je važno naglasiti da primjena zračenja mora biti opravdana i donositi korist. Na primjer, korištenje radioaktivnih izotopa u detektorima dima opravdano je jer ti uređaji spašavaju živote. Istovremeno, nuklearne elektrane proizvode električnu energiju uz pažljivo kontroliranje minimalnih rizika [6].

2.3. Nuklearne nesreće

Upotreba nuklearne energije postavlja značajna ekološka pitanja koja zahtijevaju ozbiljno razmatranje. Jezgra nuklearnog reaktora sadrži velik broj izuzetno radioaktivnih jezgara koja bi, ispuštanjem iz reaktora u slučaju nuklearne katastrofe, gotovo sigurno našla put prema ljudima i životinjama putem okoliša i prehrambenog lanca. Izloženost velikim količinama radioaktivnog materijala ima brze i smrtonosne posljedice, dok manje količine radioaktivnog materijala predstavljaju ozbiljnu opasnost s dugoročnim učincima. To uključuje širok spektar karcinoma, od kojih mnogi ne postaju vidljivi 20 ili više godina kasnije i genetske mutacije koje mogu rezultirati urođenim manama. Mogućnost nesreće koja bi rezultirala velikim ispuštanjem radionuklida izaziva duboku zabrinutost u vezi s nuklearnom energijom. Industrijska postrojenja nuklearnih elektrana kontinuirano rade na predviđanju i ugradnji sigurnosnih značajki kako bi se smanjila mogućnost nepredviđenih i opasnih situacija. Nažalost, nesreće koje su se dogodile u prošlosti na Otoku Tri Milje u SAD-u, u Černobilu u Ukrajini i Fukushima Daiichi u Japanu i dalje ostaju snažni simboli opasnosti iz kojih se mogu izvući naučene lekcije i poraditi na sigurnosti današnjih novih nuklearnih elektrana [8].

Nesreće u nuklearnim elektranama se klasificiraju prema Međunarodnoj ljestvici nuklearnih događaja (INES - The International Nuclear and Radiological Event Scale), koju je uspostavila Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA - International Atomic Energy Agency). Velike nesreće svrstavaju se u kategorije 6 ili 7 INES ljestvice te se opisuju kao „ozbiljne“ (razina 6) i „teške“ (razina 7), a s najmanje 'značajnim ispuštanjem radioaktivnog materijala koje će vjerojatno zahtijevati provedbu planiranih protumjera'. Nesreće razine 6 ili 7 posebno su značajne za znanstvenu zajednicu, politiku i javnost jer kod njih postoji potencijal za široko i značajno ispuštanje radioaktivnih izotopa, ponajviše cezija, ^{137}Cs , joda, ^{131}I i stroncija, ^{90}Sr . Takve nesreće mogu dovesti milijune ljudi u opasnost od kontaminacije, a lekcije iz Černobila i Fukushime sugeriraju da šira područja oko oštećenih reaktora ostaju nenaseljena. Nesreća u Černobilu i Fukushima Daiichi klasificirane su kao "teške nesreće" (razina 7), dok je nesreća na Otoku Tri Milje klasificirana kao " nesreća sa širim posljedicama" (razina 5) prema Međunarodnoj ljestvici nuklearnih događaja (slika 3.) [8].



Slika 3. Međunarodna ljestvica nuklearnih događaja (INES) [9]

3. NUKLEARNA NESREĆA NA OTOKU TRI MILJE

Otok Tri Milje (Three Mile Island, TMI), smješten na rijeci Susquehanna, nalazi se 16 kilometara jugoistočno od Harrisburga, Pennsylvania, u Sjedinjenim Američkim Državama. Nuklearna elektrana (slika 4.) na otoku započela je s radom 1978. godine. Unutar radijusa od 80 kilometara od nuklearne elektrane živjelo je više od dva milijuna ljudi. Otok je ravna površina i ima nekoliko četvornih kilometara, što ga je učinilo idealnim izborom za lokaciju nuklearne elektrane s dva bloka, nazvana „TMI-1“ i „TMI-2“. Svaki blok ima svoj generator i reaktor za pretvaranje pare u električnu energiju. Na temelju prosječne potrošnje američkih kućanstava, oba bloka zajedno mogla bi isporučiti 1700 MW u mrežu, što bi bilo dovoljno za napajanje potreba 300.000 domova [10].

Dana 28. ožujka 1979. godine došlo je do topljenja dijela reaktora nuklearne elektrane bloka 2. Iako manja istjecanja radioaktivnih materijala nisu imala vidljivih negativnih utjecaja na zdravlje radnika elektrane i okolnog stanovništva, nuklearna nesreća na Otoku Tri Milje bila jedna od najtežih u povijesti rada komercijalnih nuklearnih elektrana u SAD-u. Posljedice nesreće dovele su do znatnih promjena u mnogim aspektima, uključujući planiranje za hitne situacije, obuku osoblja reaktora, inženjering ljudskih faktora, radiološku sigurnost i brojna druga područja vezana za rad nuklearnih elektrana. Osim toga, potaknuo je Nacionalnu regulatornu komisiju (NRC)¹ da dodatno ojača i proširi svoju regulativnu kontrolu, a naučene lekcije iz nuklearne nesreće znatno su poboljšale sigurnost nuklearnih reaktora u SAD-u. Djelomično otapanje bloka 2 i minimalne emisije radioaktivnosti izvan same lokacije uzrokovani spojem neispravne opreme, nedostataka u samom dizajnu postrojenja i ljudske pogreške [11].

¹ The Nuclear Regulatory Commission (NRC) - Nuklearna regulatorna komisija za Sjedinjene Američke Države. Neovisna je agencija vlade Sjedinjenih Država zadužena za zaštitu javnog zdravlja i sigurnosti u vezi s nuklearnom energijom [11].



Slika 4. Nuklearna elektrana Otok Tri Milje [12]

3.1. Sigurnosni propusti i tehničke pogreške

Nuklearna nesreća u nuklearnoj elektrani Otok Tri Milje dogodila se oko 4 sata ujutro 28. ožujka 1979. godine, kada je elektrana doživjela kvar u sekundarnom, nenuklearnom dijelu elektrane. Mehanički i posljedično električni kvar spriječio dovod vode za hlađenje jezgre reaktora. To je uzrokovalo automatsko gašenje generatora, a potom i samog reaktora. Tlak u primarnom sustavu počeo je rasti. Kako bi se kontrolirao tlak, automatski se otvorio pilotski sigurnosni ventil koji se nalazio na vrhu tlačnika. Sigurnosni ventil se trebao zatvoriti kad je tlak pao na odgovarajuću razinu, ali se zaglavio i ostao otvoren. Međutim, instrumenti u kontrolnoj sobi pokazivali su osoblju postrojenja da je ventil zatvoren. Kao rezultat toga, osoblje postrojenja nije bilo svjesno da rashladna voda u obliku pare izlazi iz zaglavljeno otvorenog ventila. Dok su alarmi zvonili i svjetla upozorenja bljeskala, operateri nisu shvatili da je postrojenje doživjelo nesreću zbog gubitka rashladne tekućine. Drugi instrumenti dostupni osoblju postrojenja dali su neadekvatne i pogrešne informacije što se događa u postrojenju. Tijekom normalnog rada reaktora, velika tlačna posuda koja je držala jezgru reaktora uvijek je bila do vrha ispunjena vodom. Stoga nije bilo potrebe da se posumnja u razinu vode u jezgri reaktora. Radnici postrojenja u kontrolnoj sobi nisu imali razloga posumnjati u neispravnost, te ikakvu sumnju da jezgra reaktora nije propisano prekrivena vodom jer su i instrumenti pokazivali da je razina vode u tlačnoj jedinici dovoljno visoka. Nažalost, to nije bio slučaj. Nesvjesni zaglavljeno otvorenog sigurnosnog ventila kao i posljedično nedostatka vode za hlađenje jezgre reaktora, osoblje je poduzelo niz radnji koje su otkrile jezgru. Zaglavljeno ventil je smanjio tlak u primarnom sustavu, što je uzrokovalo prestanak rada pumpi za hlađenje jezgre reaktora. Kako bi izbjegli prekomjerno punjenje kompresora s rashladnom vodom, osoblje je smanjilo dotok vode za hitno hlađenje. Ovime je razina vode u tlačnoj posudi znatno opala, što je dovelo do ozbiljnog pregrijavanja jezgre reaktora i topljenja radioaktivnih gorivih šipki [11].

Primarni zaključak temelju istrage nesreće koja se dogodila bio je da ljudske pogreške do kojih je došlo tijekom TMI incidenta nisu bile uzrokovane nedostacima operatera, već neadekvatnostima u dizajnu opreme, prezentaciji informacija, hitnim postupcima i obuci:

- Zbog odsutnosti temeljite analize potreba za prioritnim informacijama određeni ključni parametri koji su bili bitni za sigurnost elektrane nisu bili vidljivi operaterima na upravljačkoj ploči ili drugim kontrolnim instrumentima, neki nisu bili odmah dostupni operaterima zbog lokacije, a operateri su bili opterećeni nepotrebnim informacijama,
- Dizajn kontrolne ploče vezan za blok „TMI-2“ nije adekvatno konstruiran jer zahtjeva nepotrebno i prečesto kretanje operatera, stvara radno opterećenje, veću vjerojatnost pogreške i zakašnjele odgovore,
- Postupci za hitne slučajeve na bloku „TMI-2“ nisu bili dovoljno korisni operaterima, prvenstveno zbog nedostatka sustavne metode za dijagnosticiranje problema,
- Znanje operatera nije bilo adekvatno kako bi se snašli u nepredviđenim situacijama, za brzu identifikaciju problema i poduzimanje odgovarajućih radnji,
- Oprečne informacije vezane za kontrolnu ploču, nedovoljno znanje operatera i brzo reagiranje onemogućile su pravovremenu dijagnozu i učinkovit odgovor na nesreću koja se dogodila [13].

3.2. Posljedice nesreće

Nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Otok Tri Milje u Middletownu, EPA² je brzo pokrenula operacije praćenja ispuštanja radionuklida u okoliš radi osiguranja zaštite ljudskog zdravlja i okoliša. Stručnjaci iz EPA-e su zabilježili izrazito niske razine zračenja u području gdje se nesreća dogodila. Srećom, nesreća nije rezultirala značajnim povećanjem razine radioaktivnosti koje bi predstavljalo prijetnju ljudskom zdravlju i okolišu. U analiziranim uzorcima tla, vode, sedimenta i biljaka nije pronađena kontaminacija radioaktivnim česticama. Prosječna dopuštena doza zračenja za stanovnike koji žive unutar 16 kilometara od nuklearne elektrane iznosila je 0,08 mSv. Razina zračenja od 0,08 mSv otprilike je jednaka jednoj rendgenskoj snimci prsnog koša, a 1 mSv je otprilike jedna trećina prosječne pozadinske razine zračenja kojoj su građani SAD-a izloženi u jednoj godini [14].

U mjesecima nakon nesreće postojala su zabrinutost i pitanja o mogućim negativnim utjecajima zračenja na ljudski život i okoliš u području u nuklearne elektrane. Različite vladine agencije koje su nadzirale to područje proveli su obimna ispitivanja i prikupili tisuće uzoraka zraka, vode, životinjskog mlijeka, vegetacije, tla i hrane kako bi analizirali razine zračenja. Rezultati su pokazali izrazito niske razine radionuklida koje bi se mogle povezati s ispuštanjem tijekom nesreće. Sveobuhvatna istraživanja i procjene koja su proveli ugledni instituti, uključujući Sveučilište Columbia i Sveučilište u Pittsburghu zaključile su da je unatoč

² U.S. Environmental Protection Agency (EPA) - Agencija za zaštitu okoliša američke vlade odgovorna za kontrolu onečišćenja zraka i vode, pesticide, opasnost od radijacije i onečišćenje bukom. Agencija je također uključena i u istraživanja kojima se nastoje ispitati učinci onečišćenja [14].

ozbiljnim oštećenjima na reaktoru, stvarni utjecaj ispuštanja radioaktivnih čestica na fizičko zdravlje ljudi i okoliš je bio zanemariv [11].

3.2.1. Posljedice na stanovništvo

U nesreći nuklearne elektrane Otok Tri Milje, došlo je do značajnog raspršenja radioaktivnog plemenitog plina ksenona-133, Xe-133, (s poluzivotom od 5.25 dana) u okoliš. Iako je poznato da je izloženost pogođenost stanovništva gama zračenju bila jednaka ili niža od godišnje doze pozadinskog zračenja (oko 1 mSv), pitanje stvarnog utjecaja nesreće na zdravlje ljudi nikada nije potpuno razjašnjeno. Izvješće predsjedničke komisije o nesreći na Otoku Tri Milje, često nazivano Izvješće komisije „Kemeny“, zaključilo je da su svi negativni učinci na fizičko ili mentalno zdravlje ljudi koji žive unutar 32 km od mjesta nesreće bili uzrokovani emocionalnim stresom. S obzirom na dostupne informacije o samoj nesreći i vrsti izloženosti osoba koje su bile u blizini, općenito se ne smatra da je izloženost ionizirajućem zračenju imala značajne utjecaje na ljudsko zdravlje [15].

Međutim, važno je napomenuti da postoje kontradiktorni dokazi koji se ne trebaju odbaciti. Istodobno, izvještaji stotina lokalnih stanovnika opisuju simptome koji su usklađeni s mogućom značajnom izloženosti ionizirajućem zračenju, kao što su crvenilo kože, gubitak kose, mučnina i povraćanje. Pretpostavku da su ti simptomi posljedica isključivo duševnog stresa teško je prihvatiti, jer neki od pogođenih pojedinaca nisu bili svjesni da je nakon nesreće došlo do radiološkog ispuštanja iz nuklearne elektrane Otok Tri Milje i nisu mogli biti svjesni mogućih posljedica izloženosti zračenju [15].

Nadalje, mnoga epidemiološka istraživanja su dokumentirala pogoršanje zdravlja u populaciji koja je bila izložena unutar 16 km od mjesta nesreće te su otkrila povećana oboljenja od raka dojke i pluća, bolesti srca i ranu smrtnost. Većina istraživača je oklijevala u tumačenju ovih epidemioloških rezultata kao čvrstih dokaza o povezanosti između izloženosti ionizirajućem zračenju i učinaka na zdravlje iz razloga što su doze koje je populacija primila bile relativno male, a vidljivi učinci na zdravlje nisu bili u skladu s očekivanjima za takvu vrstu izloženosti. Međutim, tim istraživača s Sveučilišta Sjeverna Karolina u Chapel Hillu (UNC) došao je do spoznaje koja sugerira suprotno. Njihova istraživanja ukazuju na to da bi emisije ionizirajućeg zračenja izazvane nesrećom mogle biti odgovorne za povećanu učestalost raka pluća u području unutar 16 km od nuklearne elektrane, a njihovi rezultati jasno pokazuju koje razine izloženosti ionizirajućem zračenju su potrebne za razvoj raka pluća. Tim zaključkom su istraživači UNC-a isticali da su doze ionizirajućeg zračenja nakon nesreće daleko veće nego što se smatra. S druge strane, Kemenyjeva komisija je, na primjer, zaključila da je maksimalna izloženost bilo koje osobe kao posljedica nuklearne nesreće bila samo približno 0,7 mSv [15].

3.3. Naučene lekcije

Primarni zaključak na temelju analize nesreće u nuklearnoj elektrani Otok Tri Milje je da ljudske pogreške do kojih je došlo tijekom nesreće nisu bile uzrokovane nedostacima operatera, već neadekvatnostima u dizajnu opreme, prezentaciji informacija, hitnim postupcima i obuci. Blok „TMI-2“ je dizajniran i izgrađen bez središnjeg koncepta ili filozofije

integracije čovjeka i stroja. Drugim riječima, prilikom projektiranja i konstrukcije ove nuklearne elektrane nije postojao jasno definiran plan ili smjernica o tome kako će ljudi (operateri) i računalni sustavi (strojevi) zajedno raditi i surađivati. Nedostatak takvog centralnog koncepta može dovesti do problema u upravljanju i rukovanju nuklearnim reaktorom tijekom izvanrednih situacija. Operateri se mogu suočiti s nedostatkom smjernica i jasnih uputa o tome kako reagirati u kriznim situacijama, što može rezultirati pogreškama, kašnjenjima i lošim odlukama. Nedostatak središnjeg koncepta čovjek-stroj rezultirao je nedostatkom definicije uloge operatera tijekom hitnih situacija [13].

Detaljna analiza događaja nuklearne nesreće na Otoku Tri Milje dovela je do širokih promjena u američkoj komercijalnoj nuklearnoj industriji. Potaknula je NRC u implementaciji novih, strožih propisa koji se odnose na poboljšanu obuku, planiranje odgovora na hitne slučajeve, nadogradnje dizajna postrojenja i zahtjeve za opremu. Nesreća je naglasila važnost ljudskih faktora u nuklearnoj sigurnosti. Isključivo zbog ljudske pogreške operatera koji su slučajno prekinuli dotok hlađenja dogodila se ozbiljna nesreća s oštećenjem jezgre i ispuštanjem radioaktivnih materijala. Operateri nuklearnih elektrana sada prolaze kroz detaljnu obuku kako bi bolje razumjeli cjelokupnu fiziku sustava nuklearne elektrane. To im omogućava bolje korištenje svojih operativnih znanja i postupaka u postrojenju kako bi se nosili s nepredvidivim scenarijima nezgoda. Naglasak je stavljen na komunikaciju i timski rad, a gotovo polovica obuke provodi se u punom elektroničkom simulatoru kontrolne sobe TMI, omogućujući operaterima da se pripreme za različite scenarije nesreća [12].

Osim toga, nesreća je dovela do osnivanja Instituta za operacije nuklearne energije (INPO)³ sa sjedištem u Atlanti i Nacionalne akademije za nuklearnu obuku, koje promiču izvrsnost u radu nuklearnih postrojenja i akreditiraju programe obuke. INPO je stvoren kako bi osigurao koherentan industrijski pristup upravljanju nuklearnim postrojenjima, obuci i operacijama s ciljem unaprjeđenja nuklearne sigurnosti. Program obuke operatera nuklearne elektrane Otok Tri Milje prošao je kroz nekoliko revizija pod INPO akreditacijom. INPO i Svjetsko udruženje nuklearnih operatera (WANO)⁴ prate ključne pokazatelje i promiču trendove ka sigurnijoj i pouzdanijoj nuklearnoj industriji. Također, NRC je proširio svoje međunarodne aktivnosti kako bi dijelio važne tehničke nadogradnje i sa drugim zemljama, pridonoseći globalnom napretku u sigurnosti nuklearnih postrojenja. Ova temeljita analiza nesreće rezultirala je poboljšanjem sigurnosti i pouzdanosti u nuklearnim elektranama, smanjenjem broja značajnih događaja i povećanjem faktora sposobnosti nuklearnih elektrana [16].

³ Institute of Nuclear Power Operations (INPO) - Institut za operacije nuklearne energije organizacija je koju je 1979. godine osnovala industrija nuklearne energije SAD-a kao odgovor na preporuke Izvješća Komisije Kemeny, nakon istrage nesreće na otoku Three Mile Island [16].

⁴ The World Association of Nuclear Operators (WANO) - Svjetsko udruženje nuklearnih operatera neprofitna je međunarodna organizacija s misijom maksimiziranja sigurnosti i pouzdanosti svjetskih komercijalnih nuklearnih elektrana.

4. ČERNOBILSKA KATASTROFA

Černobilska nuklearna elektrana u blizini grada Pripjata, bila je jedna od četiri nuklearne elektrane u Ukrajini kao dio brzog širenja nuklearnih kapaciteta za proizvodnju električne energije. Elektrana se sastojala od četiri reaktora tipa 'RBMK-1000'. Prvi reaktor, poznat kao reaktor 1, počeo je s proizvodnjom električne energije 1977. godine. Proizvodnja električne energije u reaktoru 4, u kojem se dogodila nesreća, započela je 1983. godine, a izgradnja još dva reaktora, reaktora 5 i 6, počela je 1986. godine, ali je zaustavljena nakon nesreće. Iako postoje nejasnosti oko točnih uzroka i događaja koji su doveli do nesreće, ključni faktoru su danas dobro poznati. Nesreća se dogodila tijekom planiranog testiranja sustava hlađenja u slučaju gubitka vanjskog napajanja. Originalno je planirano smanjenje snage reaktora na otprilike 30%, no snaga reaktora je naglo pala na svega 7%, što je bio prevelik pad, te je uzrokovalo otkazivanje sustava za hlađenje [17].

Černobilska nuklearna katastrofa spada među najpoznatije tragedije u povijesti nuklearnih nesreća. Bila je rezultat kombinacije ozbiljne operatorske pogreške, inherentnih problema u dizajnu reaktora, nedostatka obuke, loše sigurnosne kulture i političke izolacije tijekom Hladnog rata. Posljedice radioaktivnih čestica koje su se oslobodile tijekom nesreće imale su ozbiljan utjecaj na živote stotina tisuća ljudi u bivšem Sovjetskom Savezu, a kontaminacija se proširila i na druge dijelove Europe. Černobil služi kao poučan primjer o tome što treba izbjegavati u modernoj upotrebi nuklearne tehnologije [17].

4.1. Tehničke i sigurnosne pogreške

Operateri postrojenja odlučili su započeti planirano testiranje sustava hlađenja u slučaju gubitka vanjskog napajanja s postupnim smanjenjem snage reaktora. U 01:23 sati, testiranje je pokrenuto, unatoč nizu ozbiljnih faktora: izlazna snaga reaktora bila je znatno ispod razine potrebne za provođenje testiranja, neki sigurnosni sustavi reaktora bili su namjerno onemogućeni kako bi se omogućila provedba testiranja, i broj kontrolnih šipki u reaktoru bio je samo polovica minimalnog potrebnog za siguran rad. Trideset sekundi nakon početka eksperimenta, snaga reaktora počela je rapidno rasti, a deset sekundi kasnije operateri su pokušali zaustaviti taj rast umetanjem kontrolnih šipki. Unatoč tome, snaga reaktora i dalje je eksponencijalno rasla, što je dovelo do kvara u sustavu hlađenja pod tlakom. Osam sekundi kasnije, došlo je do eksplozije pare u reaktoru (nuklearna eksplozija se nije dogodila), koja je rezultirala raspršivanjem gorućih dijelova jezgre po okolnom području. Uništeni reaktor 4 prikazan je na slikama 5. i 6. [18].

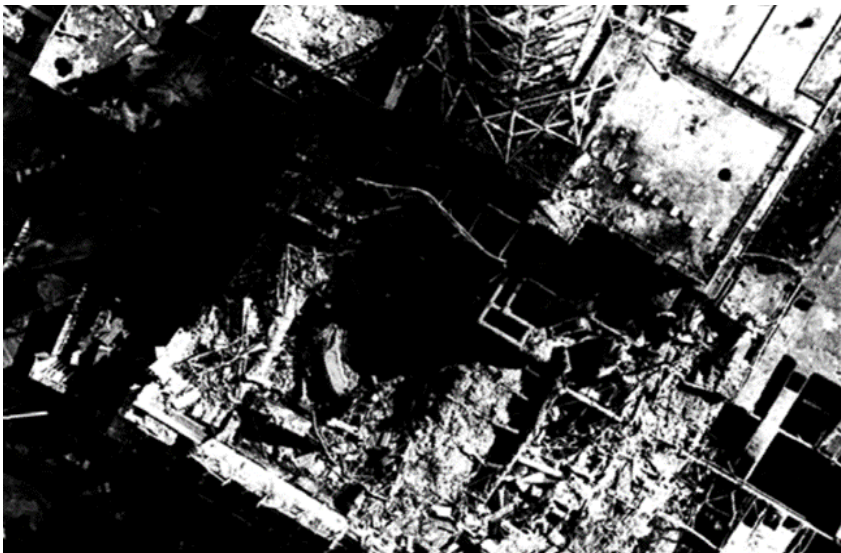
Glavni uzroci ove nesreće mogu se pripisati ljudskim pogreškama operativnog osoblja i problemima u dizajnu reaktora. Nedostaci u obuci, nedostatak komunikacije između sigurnosnih i operativnih timova te kršenje operativnih propisa su igrali ključnu ulogu. Na primjer, nedostatak komunikacije je vidljiv u isključivanju glavne kontrole s reaktora, prelasku s automatiziranih procesa na ljudske operatere te isključenju sustava tehničke zaštite bez prethodnog obavještanja operatera [18].

Ključne povrede operativnih pravila od strane operatera obuhvaćaju sljedeće:

- Nisu se provodile redovite provjere radne operativne margine (ORM)⁵ od strane posade u kontrolnoj sobi, što je prekršilo relevantne propise. Navodi se da su se poštovali relevantni propisi, nesreća se ne bi dogodila,
- Operativni tim je prekršio procedure promjenom uvjeta ispitivanja na licu mjesta i izveo test na snazi od 200 MWth bez prethodne analize,
- Ispitni program sam po sebi sadržavao je propuste u kontroli, iako nisu utjecali na tijek nesreće [19].



Slika 5. Uništena zgrada reaktora bloka 4 u nuklearnoj elektrani Černobil [18]



Slika 6. Pogled iz zraka na uništeni reaktor Černobil [18]

⁵ Operativna reaktivna margina (ORM) je izračunata granica reaktivnosti koja se temelji na raspodjeli i položajima snage i kontrolne šipke, dana u smislu broja upravljačkih šipki, gdje je 30 minimalno dopušteno [16].

Tadašnje Ministarstvo strojogradnje, nadležno za projektiranje i izgradnju reaktora, nije pružilo detaljne informacije Ministarstvu atomske energije, koje je bilo odgovorno za rad reaktora. Kao rezultat toga, uprava i operateri nisu bili obaviješteni o nestabilnostima reaktora i opasnostima koje su se mogle pojaviti pri radu na niskoj snazi. Važno je napomenuti da operateri nisu bili svjesni sljedećih nedostataka reaktora: upravljačke šipke su bile dizajnirane s dijelom koji je apsorbirao vodu, što je rezultiralo istiskivanjem vode kada su šipke spuštene u jezgru; tlačne cijevi su bile pretanke (s debljinom od samo 4 mm) i nisu mogle izdržati pritisak u nenormalnim uvjetima, što je dovelo do pucanja cijevi i curenja vode u grafitni dio reaktora; također, postojao je pozitivan koeficijent praznina⁶ [18].

4.2. Posljedice nesreće

Radionuklidi koji su ispušteni iz reaktora tijekom 10 dana nakon nesreće u Černobilu uključivali su jod, ^{131}I i cezij, ^{134}Cs i ^{137}Cs . Vjetar je nosio radioaktivne čestice u različite smjerove, s najvećim širenjem prema zapadu i sjeveru. Područje Sovjetskog Saveza pretrpjelo je ozbiljno zagađenje, s više od 150.000 km² kontaminiranih površina i više od 5 milijuna stanovnika izloženih radijaciji. Posljedice nesreće proširile su se i na Europu, gdje je više od 200.000 km² kontaminirano radiocezijem. Najveći dio Europe koji je bio pogođen protezao se kroz Bjelorusiju, Rusku Federaciju i Ukrajinu, čineći 71% zagađenog područja, a koncentracije radionuklida u tragovima mogle su se izmjeriti u gotovo svim zemljama sjeverne hemisfere. Važno je napomenuti da se kontaminirana područja postupno oporavljaju kako se ^{137}Cs raspada, a očekuje se da će se udio kontaminiranih površina smanjiti sa 23% na 10% do 2046. godine [19].

Prosječne efektivne doze za stanovništvo koje je najviše bilo pogođeno nesrećom procijenjene su na oko 120 mSv za 530 000 radnika koji su radili na sanaciji, 30 mSv za 115 000 evakuiranih osoba i 9 mSv tijekom prva dva desetljeća nakon nesreće za stanovništvo koje nije htjelo napustiti svoje domove nakon nesreće te su ostali živjeti u kontaminiranom području Černobila. Više od 100.000 ljudi je evakuirano iz područja zahvaćenih radioaktivnom kontaminacijom, a oko 200.000 stanovnika Bjelorusije, Ruske Federacije i Ukrajine odselilo je nakon kobne velike nuklearne nesreće. Pet milijuna ljudi i dalje živi na područjima koja su još uvijek kontaminirana nuklearnom katastrofom. Uz pomoć međunarodnih organizacija, nacionalne vlade triju pogođenih zemalja uložile su značajne resurse u pružanje medicinske skrbi, čišćenje kontaminiranih područja i obnovu društvene i gospodarske stabilnosti [20,21].

4.2.1. Kontaminacija kopnenog ekosustava

Evakuacija stanovništva iz pogođenih područja, poput obližnjeg grada Pripjata i okolnih gradova, igrala je ključnu ulogu u sprječavanju početnog nakupljanja visokih doza vanjskog zračenja uzrokovanog taloženjem radioaktivnih čestica. Kontaminacija se proširila na različite otvorene površine u urbanim područjima, uključujući travnjake, parkove, ulice, autoceste, trgove, krovove i zidove. Nakon nesreće, površinska kontaminacija radioaktivnim materijalom u naseljenim i rekreativnim područjima značajno se smanjila zbog prirodnih čimbenika kao što su vjetar i kiša, kao i ljudske aktivnosti, uključujući čišćenje ulica i promet.

⁶ Koeficijent praznine daje odnos između promjene reaktivnosti jezgre i udjela nastale pare u rashladnom sredstvu. U reaktorima kod kojih je voda i rashladno sredstvo i moderator, koeficijent praznina je negativan. RBMK reaktori imaju pozitivan koeficijent praznina. Kako su voda i rashladno sredstvo drugačiji materijal, veći udio pare uzrokuje smanjeno hlađenje reaktora, a moderiranje neutrona ostaje netaknuto i lančana reakcija se nastavlja [18].

Jedna od slijednih posljedica bila je sekundarna kontaminacija kanalizacijskog sustava. Brzina doze zračenja iznad većine kontaminiranih naselja postupno se vratila na razinu koja je bila prije nesreće u Černobilu. Ove mjere i procesi doprinijeli su smanjenju razine radijacije u tim područjima [21].

U početnoj fazi nakon nesreće, kontaminacija poljoprivrednih površina i ugroženost životinja koje su se hranile njima uglavnom je uzrokovana izravnim površinskim taloženjem radionuklida. U Bjelorusiji, Ruskoj Federaciji i Ukrajini, radioaktivni jod (^{131}I) brzo je kontaminirao životinjsko mlijeko, što je rezultiralo visokim apsorbiranim dozama zračenja u štitnjači, koje su bile posebno visoke za djecu koja su konzumirala mlijeko. Povišene razine radioaktivnog joda u životinjskom mlijeku zabilježene su i u određenim pogođenim južnim regijama Europe. Ovisno o razinama taloženja i fazi vegetacije, različite vrste usjeva, posebno zeleno lisnato povrće, također su bile kontaminirane različitim radionuklidima u različitim stupnjevima. Otprilike dva mjeseca nakon nesreće, veliku zabrinutost izazvalo je izravno taloženje radionuklida na površinama biljaka. Tijekom dužeg vremenskog razdoblja, ljudi su i dalje konzumirali hranu (meso, mlijeko i povrće) koja je bila kontaminirana radioaktivnim tvarima iz nesreće u Černobilu što je rezultiralo postupnom akumulacijom radioaktivnih materijala u njihovim tijelima i kroničnom izloženosti tijekom godina [21].

Nadalje, biljke i životinje u planinskim i šumskim područjima imale su iznimno visoku apsorpciju radionuklida cezija, ^{137}Cs , koji potječe iz nuklearne katastrofe u Černobilu. Šumski proizvodi poput gljiva i bobičastog voća pokazali su se kao posebno značajni nositelji aktivnosti ^{137}Cs što ukazuje na trajnu kontaminaciju šumskih prehrambenih proizvoda i naglašava potrebu za dugoročnim praćenjem i upravljanjem ovim problemom. Osim toga, korištenje drvenih materijala i njihovih nusproizvoda, iako u malim količinama, može dodatno izložiti javnost radijaciji zbog potencijalno visokih razina ^{137}Cs u drvenom pepelu. Unatoč tome, u industriji drvnih proizvoda prisutnost radioaktivnog cezija ostaje zanemariva [21].

4.2.2. Kontaminacija vodenog ekosustava

Na području blizu Černobila, kao i u mnogim dijelovima Europe, sustavi površinskih voda bili su kontaminirani radionuklidima nakon nuklearne nesreće. Ovo onečišćenje uzrokovano je izravnim taloženjem radionuklida na površine rijeka i jezera, pri čemu su prevladavali kratkoživući radionuklidi, osobito jod, ^{131}I . U prvim danima nakon nuklearne nesreće, postojala je posebna zabrinutost zbog koncentracije radionuklida u pitkoj vodi iz kijevskog rezervoara. Također, na najugroženijim lokacijama su otkrivene znatne količine radionuklida cezija u ribama, a taj se problem proširio čak do Skandinavije i Njemačke kao rezultat bioakumulacije radionuklida u vodenom prehrambenom lancu. Najveća onečišćenja zabilježena su u zatvorenim jezerskim ekosustavima u Bjelorusiji, Ruskoj Federaciji i Ukrajini, posebice u jezerima s ograničenim dotocima i odljevima. U tim područjima, konzumacija ribe često je bila glavni izvor unosa ^{137}Cs za određenu populaciju [21].

Osim toga, dugoročna sekundarna kontaminacija postoji i danas (iako u manjoj mjeri), zbog ispiranja dugotrajnih radionuklida poput cezija, ^{137}Cs i stroncija, ^{90}Sr iz zagađenog tla te njihove migracije iz sedimentnih slojeva. Drugim riječima, nakon nuklearne nesreće, ovi radionuklidi su se taložili ili pohranili u tlo i sedimente u okolišu. Međutim, zbog prirodnih procesa, kao što su erozija tla, oborine, vodeni tokovi ili promjene u okolišu, bivaju ponovno otpušteni iz tih prvobitnih položaja i ponovno dospijevaju u okoliš. Iako su razine tih radionuklida manje nego što su bile odmah nakon nesreće, dugotrajna sekundarna kontaminacija i dalje predstavlja problem jer može pridonijeti dugoročnoj izloženosti ljudi i okoliša radioaktivnom zračenju [21].

4.2.3. Posljedice na stanovništvo

Prema Izvješću UNSCEAR-a iz 2008. godine doneseni su sljedeći opći zaključci o zdravstvenim učincima izloženosti zračenju nakon nesreće u Černobilu [22].:

- Visoke doze zračenja uzrokovale su akutni radijacijski sindrom kod 134 zaposlenika elektrane i osoblja za hitne slučajeve te su nažalost bile smrtonosne za 28 osoba,
- Kontaminacija mlijeka radioaktivnim jodom, ^{131}I , za koje su nedostajale brze protumjere, rezultirala je visokim apsorbiranim dozama zračenja u štitnjači, što je uzrokovalo značajan porast od više od 6000 prijavljenih karcinoma štitnjače do danas,
- Većina ljudi koji su bili izloženi posljedicama Černobilske nuklearne nesreće ne treba ozbiljno brinuti o negativnim zdravstvenim posljedicama zbog niskih razina zračenja. Međutim, postoje skupine koje su imale veće izloženosti zračenju, poput djece i adolescenata koji su bili izloženi radioaktivnom jodu te osoba uključenih u sanaciju, koje su podložne većem riziku od zdravstvenih problema izazvanih izlaganju visokim dozama zračenja,
- Većina radnika i građana ugroženog područja bila je izložena niskim razinama zračenja koje su bile usporedive ili, najviše, nekoliko puta veće od godišnjih pozadinskih razina, a izloženost se i dalje smanjuje kako se taloženi radionuklidi raspadaju i raspršuju u okoliš.
- Iako je cjelokupan život stanovništva poremećen nesrećom u Černobilu iz radiološke perspektive, budućnost i zdravlje ljudi svakako imaju pozitivne izgleda u tom području. [22].

Tijekom početnih dana nuklearne katastrofe, otprilike 1000 osoba, uključujući djelatnike hitne pomoći i radnike na licu mjesta, izložilo se visokim dozama zračenja, koje su, nažalost, uzrokovale smrtnost u nekim slučajevima. Kasnije se više od 600.000 osoba prijavilo kao "likvidatori", sudjelujući u sanaciji područja te kao radnici hitne pomoći. Unatoč tome što su neki primili visoke doze zračenja, većina radnika na sanaciji i stanovnici kontaminiranih područja primili su niske doze zračenja, slične prirodnom pozadinskom zračenju [23].

Zdravstveni učinci zračenja bili su znatno smanjeni zahvaljujući mjerama ublažavanja, uključujući evakuaciju iz najviše kontaminiranih područja. Unatoč tome, nuklearna nesreća imala je ozbiljne posljedice na okoliš, javno zdravlje i socioekonomske uvjete. Najčešći zdravstveni problem u pogođenom stanovništvu bio je rak štitnjače kod djece uzrokovan ispuštanjem radioaktivnog joda. Osim velikog broja slučajeva raka štitnjače kod osoba izloženih u ranijoj dobi, nije bilo značajnog povećanja pojave drugih vrsta tumora ili leukemije među najviše pogođenom populacijom [23].

Međutim, pojavio se porast psiholoških problema među oboljelima nakon nuklearne nesreće, koji su dodatno pogoršani nedostatkom informacija o učincima zračenja, društvenom nestabilnošću i ekonomskim problemima koji su uslijedili nakon raspada Sovjetskog Saveza. Pogođeno stanovništvo i dalje pati zbog ozbiljnih zdravstvenih problema, socijalnih izazova i ekonomske neizvjesnosti. Iako je evakuacija bila nužna za mnoge ljude iz najviše kontaminiranih područja, mnogi se i dalje suočavaju s dugotrajnim poteškoćama prilagodbe i ozbiljnim psihološkim, ekonomskim i društvenim teškoćama. Samo manji broj ljudi odlučio je ostati živjeti u najugroženijim regijama. Posljedice nesreće su se protezale i na šire društvene aspekte te blagostanje stanovnika Bjelorusije, Ukrajine i Rusije, stvarajući negativan dojam o tim zemljama na širem području. Ova nesreća je nametnula značajan financijski teret nacionalnim proračunima kroz troškove obnove, kompenzacije i oporavka. Financijska opterećenja preusmjerile su resurse s drugih važnih sektora, uključujući zdravstvo, obrazovanje i infrastrukturna ulaganja, što se događalo u vremenu ekonomske krize [23].

4.3. Naučene lekcije

Glavni uzrok Černobilske nuklearne nesreće leži u organizacijskim faktorima, a IAEA identificirala je "slabu sigurnosnu kulturu" kao ključni čimbenik. Ova nuklearna nesreća usporediva je s nesrećom u nuklearnoj elektrani Otok Tri Milje koja se dogodila 1979. godine. Postoji nekoliko sličnosti između tih događaja; nepažljivost operatera i nuklearne industrije, namjerno zanemarivanje sigurnosnih mjera i nedostatak znanja operatera o vlastitim postrojenjima. Ovo ističe ključnu ulogu ljudskog faktora u ovim nesrećama [17].

Kako bi se spriječile nuklearne nesreće, ključno je da dizajneri temeljito testiraju i simuliraju projekte, a osoblje koje upravlja postrojenjem treba proći kvalitetnu i opsežnu obuku u pogledu sigurnosti, operativnosti i rješavanja problema. Jasna komunikacija između operativnog osoblja i timova za sigurnost bitna je tijekom neuobičajenih situacija, kao što je bilo u slučaju testnog programa u nuklearnoj elektrani Černobil. Dizajneri, proizvođači opreme i operateri moraju blisko surađivati prije izvođenja testnih aktivnosti, a oba faktora, dizajn i osoblje, moraju strogo slijediti proces projektiranja [17].

Iako je nuklearna nesreća u Černobilu bila iznimno teška nesreća, moguće je izvući i naučene lekcije koje su relevantne i za manje nesreće:

- Važno je utvrđivanje specifičnih rutina, pravila i postupaka kako bi se izbjegli kvarovi,
- Važno je prepoznavanje važnosti iskustva i kontinuiranog učenja kako bi se smanjila vjerojatnost ozbiljnih neuspjeha,
- Važan je razvoj vještina potrebnih za prevenciju i oporavak od neuspjeha,
- Važna je integracija naučenih lekcija u nove dizajne, uključujući održavanje neovisnih sustava upravljanja i isključivanja,
- Bitan je naglasak na jednostavnom i izdržljivom mehaničkom dizajnu,
- Važno je testirati sustave u stvarnim uvjetima kako bi se osigurala pouzdanost sustava [17].

5. NUKLEARNA NESREĆA U FUKUSHIMA DAIICHI

Snažan potres pogodio je istočni dio Japana 11. ožujka 2011. godine, koji je posljedično izazvao lanac tsunamija te poplavo veliki dio istočne obale Japana. Epicentar potresa, magnitude 9 prema Richterovoj ljestvici, bio je na dubini od 24 km, 10 km istočno od japanskog poluotoka Oshika, na granici Sjevernoameričke i Pacifičke tektonske ploče. Pomicanje morskog dna dovelo je do niza tsunamija koji je poplavo stotine četvornih kilometara japanske obale, uništio i/ili oštetio više od milijun građevinskih objekata u obalnim lukama i gradovima. Nažalost, to je uzrokovalo više od 19 000 smrtnih slučajeva, 2559 nestalih osoba i 6233 ranjenih [24].

Nuklearna elektrana Fukushima Daiichi, u vlasništvu i pod upravom Tokyo Electric Power Company (TEPCO), pretrpjela je ozbiljnu katastrofu zbog tsunamija. Unatoč tome, prema procjenama, zračenje nakon nesreće nije izravno utjecalo na ljudsko zdravlje. Međutim, negativni utjecaj na zdravlje i dobrobit više od 150 000 stanovnika u okolnim područjima bio je posljedica hitne evakuacije zbog tsunamija, problema s pristupom medicinskoj skrbi i lijekovima, stresa i drugih čimbenika [24].

Japanske vlasti izvršile su izuzetno težak posao prilikom rješavanja posljedica ove katastrofe sljedećih deset godina nakon nje. Tijekom tog razdoblja, uz pomoć međunarodne zajednice, obnovljena je društvena i gospodarska struktura pogođenih područja. Japan je

također izvukao važne lekcije o povećanju nuklearne sigurnosti na globalnoj razini, zahvaljujući suradnji vlasti, industrijskih lidera i međunarodnih organizacija i poduzeća [24].

5.1. Sigurnosni propusti i tehničke pogreške

Nuklearna elektrana Fukushima Daiichi ima šest reaktora s ključajućom vodom, poznatih kao BWR reaktori (Boiling Water Reactor). Sam potres nije uzrokovao nikakvu štetu na sigurnosnim sustavima reaktora, a tri pogonske jedinice (blokovi 1, 2 i 3) automatski su se isključile, što je bilo predviđeno u njihovom dizajnu kao reakcija na jak potres. Međutim, jak potres je uzrokovao gubitak svih vanjskih izvora napajanja. Srećom, zbog dobrog projektiranja, generatori za hitno napajanje su se automatski pokrenuli, kao što su i bili dizajnirani za takve hitne slučajeve. Unatoč snažnom potresu, nuklearna elektrana nije bila ugrožena, sve se odvijalo kako je i predviđeno u slučaju bilo kakvih nepoželjnih vanjskih utjecaja. Reaktori su bili osigurani, a jezgre su se i dalje hladile na predviđeni način [24].

Otprilike 50 minuta nakon potresa, tsunami je pogodio široko područje sjeveroistočnog Japana i poplavio nuklearnu elektranu Fukushima Daiichi. Tsunami je donio ogroman val vode i krhotina koji su uzrokovali ozbiljne štete na postrojenju, posebno na blokovima 1, 2, 3 i 4 te njihovim potpornim sustavima. Poplava je oštetila crpke za morsku vodu koje su služile za glavne krugove kondenzatora i za pomoćne krugove hlađenja, uključujući sustav za uklanjanje zaostale topline (RHR)⁷. Također je potopila dizel generatore za hitne slučajeve, električne razvodne uređaje i istosmjerne baterije koji su se nalazili u podrumskim dijelovima turbinskih zgrada. Kao posljedica ovih događaja, došlo je do potpunog gubitka električne energije u blokovima 1, 2 i 3 (scenarij poznat u nuklearnom sektoru kao SBO⁸) koji su bili u punom pogonu prije potresa. Ovaj gubitak potrebne električne energije onemogućio je operaterima praćenje stanja, kontrolu procesa i osvjetljenje, kao i mogućnost praćenja stanja iskorištenog goriva u reaktorskom sustavu i bazenima za pohranu iskorištenog goriva (SFP⁹). Stanje u elektrani postalo je izuzetno teško i izazovno [24].

Bez rashladne vode došlo je do pregrijavanja jezgre u tri bloka, dio goriva se otopilo što je posljedično dovelo do eksplozije prouzrokovane vodikom, prvo u bloku 1, zatim u bloku 3 i bloku 4 u razmaku od tri dana. Eksplozija prouzrokovana vodikom značajno je oštetila gornje strukture zgrade reaktora. Reaktori u bloku 2 nastavili su raditi kako bi se spriječilo taljenje jezgre, no nažalost pokušaji su bili neuspješni. Zbog uspješnosti operatera u bloku 2 nije došlo do eksplozije jer su brзом reakcijom uspjeli ispustiti vodik i time spriječiti još jednu eksploziju. Na slici 7. prikazana je nuklearna elektrana Fukushima Daiichi te gašenje požara zbog eksplozije prouzrokovane vodikom u blokovima 1, 3 i 4 [24].

⁷ Eng. Residual heat removal system (RHR) - sustav za uklanjanje zaostale topline [24].

⁸ Eng. Station blackout (SBO) – zamračenje stanice [24].

⁹ Eng. spent fuel pool (SFP) - bazen istrošenog goriva [24].



Slika 7. Gašenje požara uzrokovanog eksplozijom vodika u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiich [25]

Analiza niza lančanih problema koji su se nizali u nesreći nuklearne elektrane Fukushima Daiichi otkriva niz ključnih čimbenika koji su znatno doprinijeli ozbiljnosti i složenosti situacije. Jedan od ključnih problema bio je nedostatak svijesti o stvarnoj opasnosti od tsunamija, što je rezultiralo nedovoljnom pripravnosću za takvu moguću prijetnju. Mjere zaštite od mogućeg tsunamija nisu bile dovoljno dobro regulirane iako je područje podložno prirodnim katastrofama. Također, lokacija generatora za korištenje u hitnim slučajevima (EDG)¹⁰ nije uzimala u obzir potencijal tsunamija i njegove posljedice, što je dodatno otežalo situaciju [26].

Poremećaji u sustavima instrumentacije i kontrole (I&C) također su igrali su ključnu ulogu jer su otkazali zbog gubitka električne energije, a netočni signali su doveli do pogrešnog tumačenja stanja oštećenih jezgri reaktora, što je rezultiralo donošenjem krivih odluka. Osim toga, nesreća se proširila na više jedinica, s eksplozijama vodika u jednoj jedinici koje su usporile obnovu električne energije u drugim jedinicama. Nedostatak resursa za upravljanje s višestrukim istodobnim incidentima dodatno je otežalo situaciju. Sprječavanje iznenadnih eksplozija prouzrokovanih vodikom (poput vrha i u susjednim blokovima) na neobičnim mjestima nije bilo učinkovito, uzrokujući fizičke udare i oslobađanje radioaktivnosti te ometajući upravljanje nastalom kriznom situacijom [26].

Problemi u ljudskim postupcima i komunikaciji dodatno su pogoršali novonastalu situaciju. Greške u tumačenju instrumenata i neprikladna komunikacija između timova izazvali su pogrešne korake i kašnjenja u odgovoru na nesreću. Također, loši radni uvjeti zbog radijacije i opasnosti dodatno su otežali saniranje nesreće. Neadekvatna priprema za hitne slučajeve, kao

¹⁰ Eng. Emergency Diesel Generators (EDG) - generatori za korištenje u hitnim slučajevima [24].

što su nedostajuće smjernice za evakuaciju i nedovoljna razmjena informacija između nadležnih tijela, dodatno su komplicirali upravljanje kriznom situacijom [26].

5.2. Posljedice nesreće

Eksplozija prouzrokovana vodikom u nuklearnoj elektrani rezultirala je oslobađanjem radionuklida, koji su se potom širili snagom vjetra. Eksplozija je oštetila bočni zid petog kata u bloku 1 elektrane, uzrokujući urušavanje stropa. Radioaktivne čestice brzo su se taložile u smjeru sjever-sjeverozapad, stvarajući visoko kontaminiranu linearnu zonu radionuklida. Glavni radioaktivni izotopi koji su emitirani u atmosferu i okolna područja kao posljedica ove nesreće bili su jod, ^{131}I , cezij, ^{134}Cs i ^{137}Cs i stroncij, ^{90}Sr . Nakon katastrofe, japanska vlada je izdala nalog za evakuaciju stanovništva kako bi se spriječila izloženost kontaminiranim materijalima. Radioaktivni izotopi pronađeni su u vodi za piće, hrani i raznim predmetima, što je dovelo do uspostavljanja ograničenja i mjera za sprječavanje konzumacije kontaminiranih proizvoda [27,28].

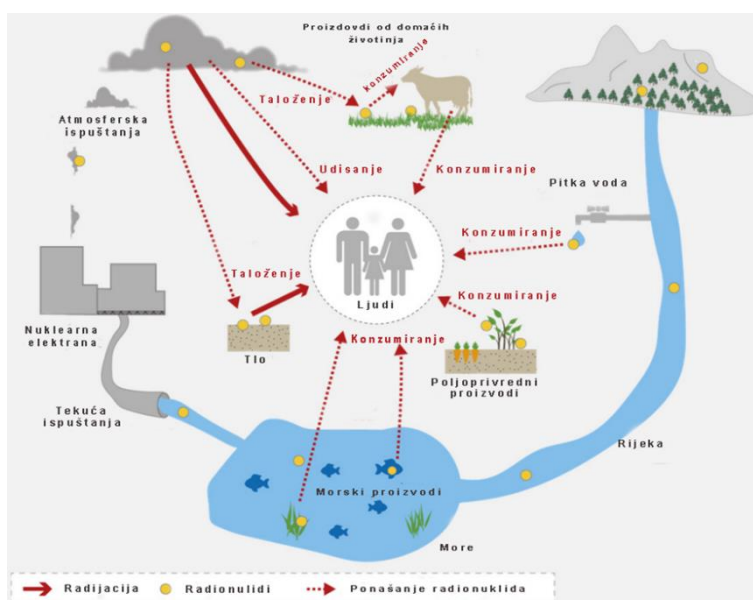
U području djelovanja nuklearne elektrane Fukushima, identificirano je 12 općina koja su označena kao zone evakuacije. Unutar radijusa od 20 km od same elektrane označeno je kao "Zabranjeno područje", dok je područje izvan 20 km (s godišnjom razinom radijacije većom od 20 mSv) označeno kao "Područja namjerne evakuacije". Iako analiza nesreće nije potvrdila izravan utjecaj razine zračenja na zdravlje ljudi, evakuacija više od 150 000 ljudi iz okolnih područja rezultirala je ranim smrtnim slučajevima. Smrtni slučajevi bili su povezani s problemima koji su proizašli iz evakuacije, uključujući stres, nedostatak pristupa medicinskoj skrbi i lijekovima te druge čimbenike. Niz događaja koji su se odvijali nakon potresa - tsunami, nuklearna katastrofa, evakuacija i različite mjere oporavka - znatno su utjecali na zdravlje ljudi i dobrobit zajednice [27].

Nakon devet mjeseci, neposredni rizici povezani s oštećenim reaktorima su stavljeni pod kontrolu hlađenjem postrojenja. Tijekom narednih godina, japanske vlasti su poduzele zahtjevan posao rješavanja posljedica kako na samoj lokaciji, tako i izvan nje. Nastavili su s razgradnjom elektrane, proveli sanaciju pogođenih područja oko Fukushime i šire regije, te obnovili društvenu i gospodarsku strukturu područja pogođenih potresom, tsunamijem i nuklearnom katastrofom. Međunarodna agencija za nuklearnu energiju (NEA) i sve njene članice, zajedno s japanskom vladom, provodile su detaljna istraživanja kako bi bolje razumjele nesreću, identificirale propuste te poboljšale sigurnosne mjere u nuklearnim postrojenjima s ciljem smanjivanja vjerojatnost sličnih nesreća u budućnosti na minimum. Iako je nesreća u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi bila velika, niz događaja koji su uslijedili i njihov utjecaj različito su oblikovali strategije nuklearne energije u različitim zemljama i regijama. Nesreća je naglasila važnost ljudske reakcije u takvim nesretnim situacijama, kao i nužnost dobre organizacije nadležnih službi [24].

5.2.1. Kontaminacija kopnenog ekosustava

Dok su većina radioaktivnih ispuštanja bila raspršena prema oceanu, ona koja su se dogodila neposredno nakon nesreće bila su raspršena prema kopnu, a radioaktivni materijali, posebno ^{131}I , ^{134}Cs i ^{137}Cs , taložili su se na tlu. Različite vremenske prilike, kao što su kiša i snježne oborine, znatno su utjecale na varijacije u taloženju radioaktivnih tvari, što je dodatno otežavalo proces sanacije zahvaćenih područja. Najveće koncentracije ^{137}Cs pronađene su sjeverozapadno od nuklearne elektrane Fukushima Daiichi, gdje je ukupno taloženje ovog izotopa na kopnenim površinama Japana procijenjeno na oko 2-3 PBq¹¹. Cezij se relativno lako može zadržati u okolišu zbog topljivosti njegovih spojeva. Različiti vremenski faktori, poput vjetrova i kiše, kao i drugi okolišni utjecaji, mogu smanjiti prisutnost cezija u okolišu tijekom vremena, brže nego što bi to bilo poluživotom tog izotopa. U mnogim zahvaćenim područjima, prisutnost ^{137}Cs smanjena je čišćenjem i drugim naporima sanacije kontaminiranog područja [28].

Ova kontaminacija tla posebno je zabrinjavajuća zbog negativnih učinaka na stočarstvo, poljoprivredu i potencijalni utjecaj na ljudsko zdravlje (slika 8.). Ukupna količina taloženja ^{137}Cs i njegova distribucija u okolišu procijenjeni su na temelju svakodnevnih mjerenja njegovog taloženja. Mjerenja su pokazala da su tla na velikim područjima istočnog i sjeveroistočnog Japana bila snažno kontaminirana, dok su zapadne regije bile manje pogođene zbog zaštite planinskih lanaca. Voće, povrće, usjevi i stočna hrana bili su kontaminirani radionuklidima na svojoj površini kao rezultat atmosferskog taloženja i oborina. Zabilježene su deformacije insekata i visoka stopa kromosomskih aberacija u umjereno i snažno kontaminiranim područjima, a nažalost je primijećena i korelacija između adolescenata koji boluju od bolesti štitnjače [29].



Slika 8. Putevi izlaganja zračenju [29]

¹¹ Becquerel (Bq) je osnovna jedinica za radioaktivnu aktivnost u Međunarodnom sustavu jedinica (SI). Jedan Becquerel predstavlja jedan raspad jezgre atomske tvari u sekundi. PBq je kratica za peta-Becquerel (peta-Becquerel). Ova mjerna jedinica koristi se za izražavanje količine radioaktivnosti ili brzine raspadanja atomskih jezgri u uzorku [23].

5.2.2. Kontaminacija vodenog ekosustava

Unatoč tome što nuklearne elektrane redovito ispuštaju nuklearnu otpadnu vodu u ocean u skladu s posebnim regulativama temeljenim na sigurnosnim procjenama i utjecajima na okoliš, ispuštanje iznimno velike količine nuklearne otpadne vode tijekom nuklearne katastrofe u Fukushimi razlikovalo se od uobičajenog postupka rada nuklearnih elektrana. Otpadna voda iz nuklearne elektrane Fukushime dolazila je iz vode za hlađenje koja je strujala u oštećenim jezgrama reaktora noseći otopljeno radioaktivno gorivo i strujanja podzemnih voda i kišnice koje su prodirale u reaktor. Čuvenje sustava za hlađenje reaktora i podzemnih voda u podrumu oštećenih zgrada reaktora i turbina unijelo je radioaktivni materijal u Tihom ocean. Većina radioaktivnih ispuštanja koja su se proširila prema sjevernom Tihom oceanu pala je na površinski sloj oceana. Izravna i atmosferska ispuštanja ^{131}I procijenjena su na 10-20 PBq, dok su procjene za ^{137}Cs varirale od 1 do 6 PBq s nekim procjenama čak do 26,9 PBq. Prema proračunima, ^{137}Cs ispušten nakon nesreće stigao je do obalnih voda Sjeverne Amerike putem prirodnog protoka i oceanskim strujama godinu dana nakon nesreće. Katastrofa u Fukushimi smatra se najvećim ispuštanjem radioaktivnih materijala u ocean koje je uzrokovao čovjek [30].

Ispitivanja su otkrila prisutnost ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{131}I u zooplanktonu i pelagičkoj ribi. Velike morske životinje koje često migriraju, poput pacifičke plavoperajne tune, mogu prenositi radionuklide iz Japana prema udaljenim područjima u južnom i sjevernom Pacifiku. Također, živi organizmi u slatkim vodama bili su ozbiljno kontaminirani radioaktivnim tvarima. Razina kontaminacije bila je veća kod većih riba i onih koje se nalaze više u hranidbenom lancu slatkovodnog ekosustava. Ova kontaminacija povezana je s činjenicom da su radionuklidi ulazili u slatkovodni ekosustav i postupno se nakupljali kako su prenošeni kroz hranidbeni lanac, od manjih organizama do većih. Kako bi se uklonili radionuklidi, osim tricija, iz kontaminirane vode, koristi se sustav ALPS¹² [31].

5.2.3. Posljedice na stanovništvo

Izloženost radijaciji utjecala je na ljude kroz izlaganje radionuklidima u okolišu i njihovim unosom putem udisanja i konzumacije kontaminirane hrane. 174 radnika od ukupnih 23 000 koji su sudjelovali u hitnim operacijama primilo je dozu zračenja veću od 100 mSv. Unutar ove skupine radnika, postoji povećani rizik od razvoja raka u budućnosti, no zbog statističkih fluktuacija u incidenciji raka, očekuje se da će bilo kakvo povećanje biti teško uočljivo. Svjetska zdravstvena organizacija (SZO) procijenila je hipotetske dodatne rizike za stanovništvo u najviše kontaminiranim područjima u odnosu na osnovne stope za razvoj leukemije, raka dojke, raka štitnjače i svih zloćudnih bolesti [30].

U kontaminiranim područjima radionuklidi, kao što su ^{131}I , ^{134}Cs i ^{137}Cs , otkriveni su u nekim potrošačkim proizvodima i svakodnevnim namirnicama koje se koriste u kućanstvima, uključujući hranu, vodu za piće i druge proizvode. Japanska vlada je stoga uvela ograničenja kako bi spriječila uporabu kontaminirane hrane i vode za piće, te uskladila smjernice SZO-a za dopuštene razine radionuklida u pitkoj vodi s novonastalim okolnostima. Gotovo sva pitka voda u Japanu nakon nesreće bila je ispod preporučenih razina SZO-a. Većina hrane koja se

¹² Advanced Liquid Processing System (ALPS) je sustav pumpanja i filtriranja koji koristi niz kemijskih reakcija za uklanjanje 62 radionuklida iz kontaminirane vode [30].

prodavala na tržištu također je imala razine radionuklida ispod normi utvrđenih u Codexu Alimentariusu¹³, koji regulira međunarodnu trgovinu hranom. Iako su povremeno otkrivane povišene razine radionuklida u divljoj hrani, kao što su divljač, divlje gljive i divlje biljke, konzumacija takve hrane nije uobičajena u Japanu [30].

U sljedećim stotinama ili možda tisućama godina, postojat će ozbiljna zabrinutost ukoliko se nastavi ispuštanje radioaktivne otpadne vode u Tihom oceanu. Morski ekosustav sastoji se od složenih lanaca prehrane, a nakon nuklearne nesreće, zapaženo je povećanje razine radionuklida u morskom životu. Kako se radionuklidi šire u vodama, one zagađuju morske vrste koje se nalaze niže u hranidbenom lancu. Što je hranidbeni lanac dulji, to će kontaminacija biti izraženija, što na kraju ima posljedice na zdravlje ljudi. Istraživanje provedeno nakon Černobilske nesreće ukazalo je na potencijalne dugoročne rizike za ljudsko zdravlje koji mogu trajati desetljećima [31].

Prema izvješću UNSCEAR-a (2013.), najznačajniji zdravstveni učinci nesreće bili su na mentalnom i socijalnom blagostanju ljudi, povezani s teškim iskustvom potresa, tsunamija i nuklearne katastrofe, kao i s osjećajem straha i stigme vezane uz izloženost ionizirajućem zračenju [30]. Izvješća nakon nesreće ukazuju na negativne psihološke učinke, uključujući depresiju i simptome posttraumatskog stresa. Provedena su brojna istraživanja o psihološkom stanju ljudi nakon nuklearne katastrofe koja su obuhvaćala evakuirano stanovništvo, osoblje za spašavanje i čišćenje, trudnice i majke dojenčadi te su uočeni su određeni psihološki učinci na pogođenu populaciju. Zaključeno je da je pravovremeno informiranje i pružanje točnih informacija javnosti tijekom rane faze i razvoja nesreće doprinijelo smanjenju neželjenih psiholoških reakcija. Rezultati Mental Health and Lifestyle Survey, najvećeg istraživanja provedenog u okviru Fukushima Health Management Survey, potvrdili su visoku razinu anksioznosti među pogođenim stanovništvom, zajedno s manifestacijama posttraumatskog stresa. Anketni podaci također su ukazali da su mnoge obitelji bile prisiljene na evakuaciju nakon katastrofe i često su se selile, što je dodatno utjecalo na pogoršanje psihološkog stanja pogođenog stanovništva [31].

5.3. Naučene lekcije

Ključne lekcije naučene iz nesreće u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi uključuju važnost kontinuiranog i inovativnog napretka kao temelja za osiguranje sigurnosti nuklearnih elektrana. Ova lekcija se može sažeti u nekoliko ključnih činjenica:

- Nositelji licenci za nuklearne elektrane i njihovi operateri moraju kontinuirano tražiti nove znanstvene informacije o mogućim opasnostima nuklearnih elektrana kao i metode za procjenu veličine opasnosti, učestalosti i potencijalnih utjecaja,
- Procjena rizika nuklearnih elektrana mora uključivati nove znanstvene informacije i nove metodologije,
- Operateri nuklearnih elektrana i njihovi regulatori moraju planirati i jasno procijeniti koji su točno utjecaji na nacionalnoj razini na nuklearnu sigurnost i iznaći jasne mjere i pristupe za održavanje i poboljšanje nuklearne sigurnosti sigurnost,

¹³ Codex Alimentarius (CA) je zbirka međunarodnih standarda za hranu, smjernica i kodova dobre prakse kojima je glavna namjena zaštita potrošača i promicanje pravedne prakse u trgovini sigurne i kvalitetne hrane [30].

- Nuklearna industrija i regulatori trebaju posebno pažljivo razmotriti poboljšanje sustava nuklearnih elektrana kako bi omogućili učinkovite reakcije na nepredviđene događaje koji prelaze dizajnerske okvire. Ovo uključuje razvoj i primjenu posebnih mjera za rješavanje izvanrednih situacija [32].

Kako bi se unaprijedila pristupačnost resursa i osigurala adekvatna obuka operatera za efikasno reagiranje na nepredviđene događaje, potrebno je posebno obratiti pažnju na sljedeće aspekte:

- Potrebno je posvetiti posebnu pažnju u adekvatnoj obuci i pripremi za situacije izvanrednih uvjeta koje mogu obuhvaćati više reaktora na istom mjestu, produženo trajanje nesreće ili izazovne uvjete u elektrani,
- Potrebno je ojačati i bolje integrirati planirane postupke za situacije izvanrednih uvjeta, osigurati jasne smjernice za ublažavanje potencijalnih ozbiljnih šteta koje mogu proizaći iz nesreće i definirati jasne smjernice za upravljanje ozbiljnim nesrećama,
- Potrebno je jačanje znanja i sustavno nadograđivanje znanja operatera i organizacije kako bi se pripremili za suočavanje s izvanrednim situacijama. Ovo uključuje naglasak na specifičnoj obuci za primjenu „ad hoc“ mjera sigurnog zaustavljanja reaktora tijekom izvanrednih događaja koji nadilaze projektirane okvire postrojenja, te jačanje razumijevanja dizajna i operacija nuklearnih elektrana kako bi se poboljšale sposobnosti operatera u upravljanju izvanrednim situacijama [32].

6. ZAKLJUČAK

Analiza posljedica nuklearnih nesreća na Otoku Tri Milje, Černobilu i Fukushimi jasno ističe ozbiljnost i složenost problema koje takvi incidenti mogu izazvati. Svaka od ovih nesreća donosi sa sobom specifične aspekte štete, kako u pogledu ljudskih života i zdravlja, tako i u vezi s utjecajem na okoliš i ekonomske implikacije.

Nesreća na Otoku Tri Milje (Three Mile Island) naglašava važnost komunikacije i suradnje između operatera postrojenja i regulatornih tijela. Iako je imala manji utjecaj na širu zajednicu u usporedbi s Černobilom i Fukushimom, ova nesreća podsjeća nas na važnost odgovornog upravljanja i neprestanog praćenja i nadogradnje nuklearnih postrojenja.

Černobil nuklearna katastrofa ostavila je dugotrajne posljedice na lokalnu populaciju, s visokim brojem žrtava i dugotrajnim zdravstvenim problemima kod onih koji su bili izloženi radioaktivnom zračenju. Nadalje, velika kontaminacija okoliša rezultirala je gubicima u poljoprivredi i povećanim rizikom od karcinoma štitnjače među stanovništvom. Naučene lekcije iz Černobilske katastrofe naglašavaju važnost temeljitog planiranja, transparentne komunikacije informacija i međunarodne suradnje kako bi se adekvatno reagiralo na nuklearne nesreće.

Fukushima nuklearna nesreća dodatno je istaknula opasnosti koje prirodne katastrofe mogu izazvati u nuklearnim postrojenjima i potrebu za izgradnjom nuklearnih elektrana otpornih na ekstremne uvjete. Posljedice ove nesreće uključivale su masovne evakuacije i ekonomske gubitke, stvarajući kompleksnu mrežu problema koja je utjecala na sve aspekte društva. Naučene lekcije ukazuju na potrebu stalnog poboljšanja sigurnosnih mjera, tehnološkog napretka i fleksibilnosti u suočavanju s nepredviđenim događajima.

Nuklearne nesreće na Otoku Tri Milje, Černobilu i Fukushimi ostavile su dubok i neizbrisiv trag na čovječanstvu. Naučene lekcije iz ovih nesreća naglašavaju potrebu za neprestanim unaprjeđenjem sigurnosnih standarda, kontinuiranom edukacijom i razvojem tehnologija kako bi se minimizirali rizici i posljedice nuklearnih nesreća.

7. LITERATURA

- [1] Hofert, M., Wüthrich, M. V. (2012.). Statistical Review of Nuclear Power Accidents. *Asia-Pacific Journal of Risk and Insurance*, 7(1)
- [2] Lulić S., (1998.). Monitoring sustav za rano otkrivanje nuklearnih nesreća. IV. simpozij HDZZ, Zagreb, 165-170
- [3] Giraldo J. S., Gotham D. J., Nderitu D. G., Preckel P. V., Mize D. J., (2012.). *Fundamentals of Nuclear Power*. Report, State Utility Forecasting Group
- [4] CEA, (2016.). *Nuclear reactors*. CEA, Paris
- [5] Murray, R. L., Holbert, K. E., (2020.). *Reactor Safety and Security*, Nuclear Energy, Elsevier, 387–417
- [6] Canadian Nuclear Safety Commission (2012.). *Introduction to Radiation*. Canadian Nuclear Safety Commission, Canada
- [7] <https://byjus.com/learning/> (pristupljeno: 09.08.2023.)
- [8] Breeze, P. *Power Generation Technologies*, Nuclear Power, Academic Press, 399–429.
- [9] Engler, J.-O. (2020.). Global and regional probabilities of major nuclear reactor accidents. *Journal of Environmental Management*, 269, 110780.
- [10] Petrangeli G. (2020.) Appendix 17 - The Three Mile Island Accident, *Nuclear Safety*. Butterworth-Heinemann, 503–518
- [11] <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>(pristupljeno: 3.08.2023)
- [12] <https://www.energy.gov/ne/articles/5-facts-know-about-three-mile-island> (pristupljeno: 4.08.2023)
- [13] <https://www.osti.gov/servlets/purl/5603680> (pristupljeno: 09.08.2023)
- [14] Perham, C. (1980.). *EPA's role at Three Mile Island*. United States
- [15] Datesman, A. M. (2020.). Radiobiological shot noise explains Three Mile Island biosimetry indicating nearly 1,000 mSv exposures. *Scientific Reports*, 10(1), 10933.
- [16] <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx> (pristupljeno: 3.09.2023.)
- [17] Labib, A. (2014.). *Chernobyl Disaster*, in: *Learning from Failures*, Elsevier, 97-106
- [18] Smith J. T, Beresford, N. A. (2005.). *Chernobyl — Catastrophe and Consequences*. (2005). Springer Praxis Books
- [19] UNSCEAR (2008). *Sources and effects of ionizing radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report, United Nations Publication,
- [20] <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html> (pristupljeno: 15.6.2023)

- [21] https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf (pristupljeno: 29.07.2023)
- [22] Fushiki, S. (2013.). Radiation hazards in children – Lessons from Chernobyl, Three Mile Island and Fukushima. *Brain and Development*, 35(3), 220–227
- [23] Kinly, D. (2005.). Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts and recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine The Chernobyl, International Atomic Energy Agency (IAEA)
- [24] NEA (2021.). Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Ten Years On, OECD Publishing, Paris
- [25] <https://u.osu.edu/engr2367nuclearpower/fukushima/> (pristupljeno: 28.07.2023)
- [26] ang, J.-E. (2014.). Fukushima Dai-ichi accident: lessons learned and future actions from the risk perspectives. *Nuclear Engineering and Technology*, 46(1), 27–38.
- [27] Morooka K., Kurihara E., Takehara M., Takami R., Fueda K., Horie K., Takehara M., Yamasaki S., Ohnuki T., Grambow B., Law G. T.W., Ang J. W.L., Bower W., Parker J., Ewing R.C., Utsunomiya S., (2021.). New highly radioactive particles derived from Fukushima Daiichi Reactor Unit 1: Properties and environmental impacts, *Science of The Total Environment*, 773, 145639
- [28] Tsuboi M., Sawano T. , Nonaka S., Hori A., Ozaki A., Nishikawa Y., Tianchen Z., Michio M., Tsubokura M. (2022.). Disaster-related deaths after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident - Definition of the term and lessons learned, *Environmental Advances*. 8, 100248
- [29] Yasunari, T. J., Stohl, A., Hayano, R. S., Burkhart, J. F., Eckhardt, S., & Yasunari, T. (2011.). Cesium-137 deposition and contamination of Japanese soils due to the Fukushima nuclear accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49)
- [30] Lu, Y., Yuan, J., Du, D., Sun, B., Yi, X. (2021.). Monitoring long-term ecological impacts from release of Fukushima radiation water into ocean. *Geography and Sustainability*, 2(2), 95–98
- [31] <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1710-reportbythedg-web.pdf> (pristupljeno: 28.07.2023.)
- [32] Luangdilok, W., Xu, P. (2020.). Nuclear plant severe accidents: challenges and prevention. *Advanced Security and Safeguarding in the Nuclear Power Industry*, 99–134

ŽIVOTOPIS

Osobni podaci:

Ime i prezime: Kristina Plevančić

Datum rođenja: 25.06.2000.

Mjesto rođenja: Sisak

Adresa: Rimska ulica 27, Sisak

E-mail: kristinaplevancic@gmail.com

Obrazovanje:

Srednja škola: Gimnazija Sisak

Sveučilište: Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij
Sigurnost, zdravlje na radu i radni okoliš

Vještine:

Strani jezici: Engleski

Rad na računalu