

Nuklearni otpad - skladištenje i utjecaj na okoliš

Grdjanić, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:193658>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Mateo Grdjanić

Nuklearni otpad – skladištenje i utjecaj na okoliš

Prvostupnički rad

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nenad Buzjak

Ocjena: _____

Potpis: _____

Zagreb, 2018.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geografski odsjek

Prvostupnički rad

Nuklearni otpad – skladištenje i utjecaj na okoliš

Mateo Grdjanić

Izvadak: Skladištenje nuklearnog otpada smatra se tabu-temom u većini dijelova svijeta. Kompleksnost procesa i izbora lokacija izaziva polemike i sukobe između vlasti i lokalnog stanovništva. Radijacija iz otpada širi štetni utjecaj na okolnu floru i faunu, ali i na samo zdravlje ljudi. Republika Hrvatska i dalje se bori s problemom lokacije za skladištenje nuklearnog otpada, a potencijalni prijedlozi rješenja nailaze na blokade lokalnog stanovništva. Svijet se do sada suočio s nekoliko katastrofa uzrokovanih nepažnjom i silom prirode. Izuzev namjernog bombardiranja Hiroshime i Nagasakija, dvjema najvećima smatraju se one iz Černobila (1986.) i Fukušime (2011.).

25 stranica, 8 grafičkih priloga, 4 tablice, 20 bibliografskih referenci; izvornik na hrvatskom jeziku

Ključne riječi: nuklearni otpad, Černobil, zagađenje, radijacija, zdravlje

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Nenad Buzjak

Tema prihvaćena: 12. 4. 2018.

Datum obrane: 21. 9. 2018.

Rad je pohranjen u Središnjoj geografskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Marulićev trg 19, Zagreb, Hrvatska

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geography

Undergraduate Thesis

Nuclear waste – disposal and impact on environment

Mateo Grdjanić

Abstract: Nuclear waste storage is considered a taboo topic in many parts of the world. The complexity of the selection process of a suitable storage location is cause of controversy and disagreement between the government and the indigenous population. The nuclear waste radiation is harmful not only to the local flora and fauna but to people as well. Croatia continues to struggle with the nuclear waste storage problems as all potential solutions were quickly halted by its residents. Apart from international bombings of Hiroshima and Nagasaki the two largest nuclear threats were those which occurred in Chernobyl (1986.) and Fukushima (2011.).

25 pages, 8 figures, 4 tables, 20 references; original in Croatian

Keywords: Nuclear waste, Chernobyl, pollution, radiation, health

Supervisor: Nenad Buzjak, PhD, Associate Professor

Undergraduate Thesis title accepted: 12/04/2018

Undergraduate Thesis defense: 21/09/2018

Thesis deposited in Central Geographic Library, Faculty of Science, University of Zagreb,
Marulićev trg 19, Zagreb, Croatia

Sadržaj

2. Postupak i metode zbrinjavanja nuklearnog otpada u svijetu	1
3. Nuklearni otpad – utjecaj na ljude i okoliš	4
3. Skladištenje u RH – problemi i prijedlozi.....	7
4. Nuklearne katastrofe	10
4.1. Černobil, 1986.....	10
4.2. Fukušima Daichii	15
5. Zaključak.....	18
Literatura:.....	20
Izvori:.....	21

1. Uvod

Cilj je seminarskog rada prikazati načine i probleme prilikom zbrinjavanja nuklearnog otpada na području cijeloga svijeta, uz osvrt na stanje u Republici Hrvatskoj. Posebno će biti izdvojene dvije velike katastrofe uzrokovane kvarovima u nuklearnim elektranama, a to su Černobil i Fukušima. Prije samog zbrinjavanja potrebno je posebnim tehnikama i metodama otpad pripremiti za transport i skladištenje. Samo zbrinjavanje otpada problematično je jer je potrebno izabrati lokaciju koja nije u tolikoj blizini ljudi da zračenje ne počne dopirati do stanovništva. Osim što ima štetno djelovanje na ljude, štetno može djelovati i na floru i faunu u području koje se nalazi oko mjesta zbrinjavanja. Sama država također nailazi na problem jer je teško odabrati dovoljno izolirano područje, pa lokalno stanovništvo vrlo često prosvjeduje zbog toga.. Najveća katastrofa uzrokovana lošom kontrolom nuklearnih elektrana do sada dogodila se 1986. godine u Černobilu. Područje je nenaseljivo i dan-danas, a flora i fauna koja je ostala oblikovana je pod utjecajem radijacije. Druga, ali ne manje poznata katastrofa, dogodila se 2011. godine u Fukušimi a uzrokovana je potresom. Četiri od šest reaktora prestalo je raditi, a broj stradalih je neprocjenjiv, s obzirom na to da je tada područje bilo pogođeno i snažnim potresom i tsunamijem.

2. Postupak i metode zbrinjavanja nuklearnog otpada u svijetu

Odlaganje nuklearnog (radioaktivnog) otpada završna je faza gospodarenja otpadom, a sastoji se od tri koraka: predobrade, kondicioniranja i transporta otpada (Besednik, 2018). U prvoj fazi obavlja se sakupljanje, razvrstavanje i dekontaminacija. U drugoj fazi cilj je što više povećati sigurnost i ekonomičnost pohranjivanja otpada promjenom njegovih svojstava. Smanjuju se obujam (spaljivanje gorivog otpada, prešanje) i promjena sastava samog otpada (flokulacija). Spaljivanjem krutog niskog ili srednje aktivnog otpada obično se postiže najviši stupanj smanjenja obujma, a pri tome se dobije i na stabilnosti otpada. Sam postupak spaljivanja sa sobom nosi rizik, kao što je ispuštanje raznih štetnih tvari koje mogu biti jednako opasne za ljude i okoliš. U sljedećoj fazi vrši se kondicioniranje otpada, čime se otpad pretvara u oblik prikladniji za rukovanje, prijevoz, skladištenje i odlaganje. Posljednja je faza sam transport koji podrazumijeva namjerno

fizičko prevoženje otpada u specijalno dizajniranom pakiranju s jednog mjesta na drugo. Najčešći su načini transporta kamionom, tankerom ili željeznicom.

Svaki tip paketa s radioaktivnim otpadom prolazi kroz rigorozne propise koje je preporučila IAEA (Svjetska agencija za atomsku energiju) u suradnji s UN-om. Koliko je uspješna ta suradnja, govori i podatak da se u 45 godina otkako se provode propisi nije dogodila ni jedna transportna nesreća koja bi prouzročila značajne radiološke utjecaje na čovjeka i sam okoliš (Besednik, 2018).

S obzirom na činjenicu da je u modernom dobu visoka opasnost od terorizma, poduzimaju se razne mjere zaštite: od početne faze sigurnosne kontrole materijala i spremnika u tvornici, preko sigurnosnih kontrola zaposlenika i osoblja, pa sve do, na koncu, motrenja pošiljke satelitom. Paketi moraju sadržavati standardizirane romboidne oznake (znak za radioaktivnost crnom bojom i ovisno o materijalu oznake u donjem dijelu paketa) (sl. 1.).



Sl. 1.: Transportne oznake radioaktivnog otpada

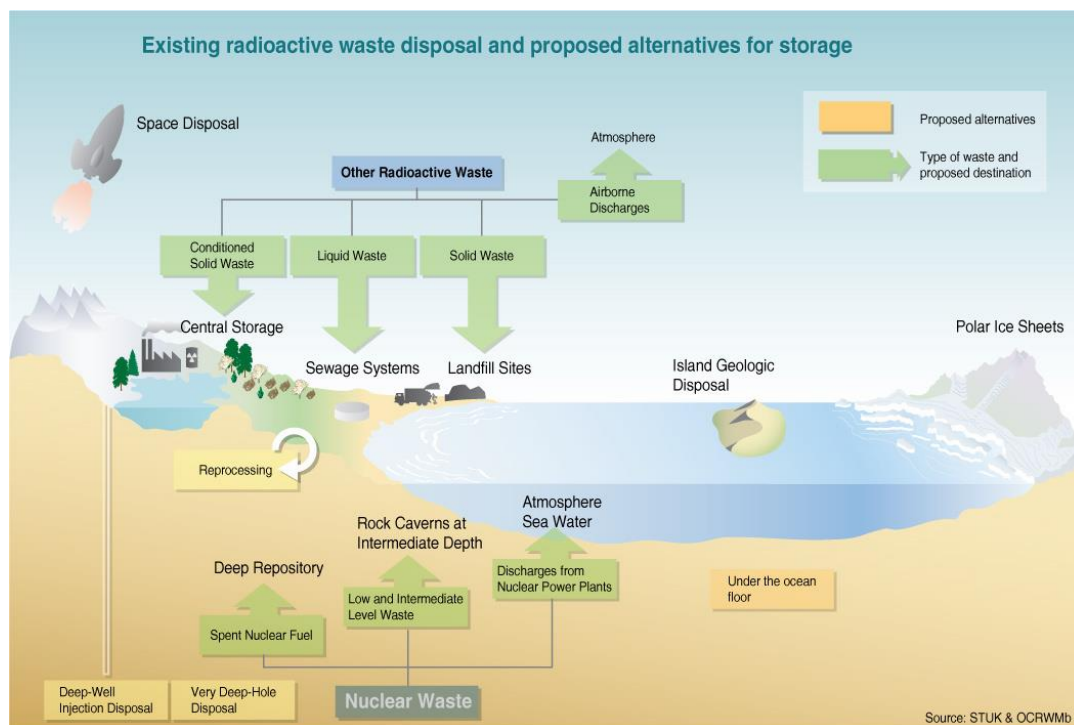
Izvor: Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, n. d.

Cilj je zbrinjavanja radioaktivnog otpada odlaganje otpada kojim bi se onemogućio kontakt radioaktivnih izotopa s biosferom i podzemnim vodama. U prošlosti, dok su količine radioaktivnog otpada bile neznatne, vrlo se malo pažnje pridavalo načinu i mjestu zbrinjavanja otpada. Otpad koji je bio opasniji bacao se u bačvama u duboko more, a ostatak se zakopavao, najčešće u plitke rovove koji su se prekrili tлом. U manjem broju slučajeva otpad se zbrinjavao u neki napušteni rudnik. Time su u teoriji bile otklonjene opasnosti da će otpad izravno utjecati na ljude (Wolman, 1957). Osnovna zadaća pri odlaganju radioaktivnog otpada sastoji se u osiguranju

dugotrajne stabilnosti radioaktivnih nuklida, tako da se spriječi migracija u okoliš. Da bi se spriječila migracija, koriste se barijere: prirodna (geološka) ili inženjerska (umjetna).

Sljedeći je problem odabir lokacije odlagališta. To je vrlo dugotrajan proces na koji utječu brojni čimbenici. Kada se planira odlaganje, najčešće se gleda na to da barijera potraje od nekoliko stotina do nekoliko desetaka tisuća godina (Slovic, 1991). Razmatraju se prirodni faktori i ljudske aktivnosti. Prirodni su faktori koji se gledaju: udar meteora, iznenadna vulkanska aktivnost, pojava ledenog doba, klimatski uvjeti, blizina rijeke, vodopropusno tlo i tako dalje. Ljudske aktivnosti su: nuklearni ratovi, sabotaze, nepredviđena geološka bušenja, podzemna građenja i ostalo.

Dugogodišnja praksa odlaganja otpada u svijetu urodila je međunarodnim dogovorom koji ističe najbolje opcije odlaganja radioaktivnog otpada: površinska i pripovršinska odlaganja za nisko i srednje radioaktivni otpad te odlaganja u dubokim geološkim formacijama za sve vrste radioaktivnog otpada, ali posebno za visoko radioaktivni otpad (sl. 2.).



Sl. 2.: Metode odlaganja nuklearnog otpada

Izvor: GRID arendal, 2005

Podzemna odlagališta mogu biti na različitim dubinama, od nekoliko desetaka do nekoliko stotina metara. Negdje, u prikladnim geološkim formacijama, adaptiraju se napušteni rudnici soli ili

željeza, a, primjeri takvih rudnika nalaze se u Konradu i Morslebenu u Njemačkoj (Besednik, 2018).

Najjednostavnija je varijanta površinskog odlagališta običan plitki rov u kojem se otpad prekriva tlom. Otpad se prije toga obrađuje i dodatno izolira. Druga je opcija zidana betonska građevina. U jednoj je varijanti sagrađena iznad površine zemlje, a u drugoj je ukopana. Jedno je od najpoznatijih površinskih odlagališta ono u El Cabrilu (Španjolska). Jedna je od opcija površinskih odlagališta i betonski monolit. Otpad je smješten u armirano-betonske kontejnere. Odlagalište se vizualno uklapa u okoliš ozelenjavanjem površinskog sloja. Takvo se odlagalište nalazi u Francuskoj, poznatije je pod nazivom „Centre de la Manche“ (Besednik, 2018).

Visoko radioaktivni otpad rješava se metodom dubokog geološkog odlaganja u stijeni jer je ovaj način najprikladniji za dugotrajnu izolaciju takvog otpada od čovjekove okoline (Wolman, 1957). Razmatrano je i nekoliko drugih metoda: odlaganje u oceanima koje nema međunarodnu suglasnost, odlaganje u ledenjacima koje je trenutno zakonom zabranjeno i odlaganje u svemir, što je problem zbog prevelikih troškova i prevelik je rizik od neuspjeha pri lansiranju. .

3. Nuklearni otpad – utjecaj na ljude i okoliš

Radioaktivni otpad nastaje kad se potrošeno nuklearno gorivo vadi iz nuklearnog reaktora te se odlaže tako da se spontanim radioaktivnim raspadanjem smjese izotopa ne ugrozi okoliš. Problem nastaje jer smjesa istrošenog goriva i dalje zrači, dakako, sve manje i manje, ali zna dosegnuti period od nekoliko stoljeća, pa zbrinjavanje radioaktivnog otpada seže u daleku budućnost. Upravo se ova činjenica upotrebljava kao argument protiv izgradnje nuklearnih elektrana. Kao usporedba koriste se podaci o zagađivanju okoliša i atmosfere iz termoelektrane ložene ugljenom (Kolarec, 2015).

Prijedlozi za prijenos nuklearnog otpada izazivaju veliku zabrinutost, kao i potencijalne poteškoće za zdravlje i ekonomsko stanje osoba koji žive u blizini rute transporta. SAD je započeo prijenos nuklearnog otpada još 1999. godine. Godišnje se cijelom državom preveze više od milijun „paketa“ radioaktivnog otpada (Gawande, 2000). Prvi veći problem uzrokovan radioaktivnim otpadom jest zagađenje zraka, što dovodi i do zagađenja vode.

Da bi se lakše odredio utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš, a samim time i radioaktivnog otpada, uvedeno je kvantificiranje pomoću pojma „eksterni troškovi“ (Jakšić, 2015).

Čimbenici o kojima ovise eksterni troškovi elektrane jesu: prizemna koncentracija krutih čestica i aerosola (koji nastaju kao posljedica emisija SO₂ i NO_x), meteorološki uvjeti za raspršenje emisija, gustoća populacije i zahvaćeno područje. Također, ovisno o načinu analize, za kvantitativnu procjenu eksternog troška koristi se statistička vrijednost ljudskog života (*Value of Statistical Life – VSL*) ili vrijednost godine izgubljenog života (*Value of Year of Life Lost vyoll*). Računska vrijednost statističkog života za EU je reda veličine 3 milijuna eura te ovisi o ekonomskoj snazi pojedine zemlje (približno je proporcionalna s njezinim BDP-om) (Jakšić, 2015).

Utjecaj emisije CO₂ na okoliš i njegovo kvantificiranje u obliku eksternog troška elektrane koja ga proizvodi jako je nesiguran s obzirom na to da se radi o globalnoj šteti uzrokovanoj emisijom. Nemogućnost točnog određivanja posljedica emisije ugljičnog dioksida u atmosferu, njen utjecaj na globalno zatopljenje i, općenito, ocjena štete klimatskih promjena također unosi nesigurnost. Uzevši u obzir tako veliku mjernu nesigurnost, moguće je napraviti i studije utjecaja CO₂ na okoliš koje bi dokazale njegov neznatan utjecaj.

Omjer nepovoljnosti iznosi otprilike 10:5:1 (tab.1.). Takav odnos veličina prihvaćen je i od šire javnosti, osim za nuklearne elektrane. Kod nuklearnih elektrana na stav javnosti uglavnom utječe mogućnost katastrofalnih nezgoda, s kojima su ljudi u današnje vrijeme vrlo dobro upoznati, dok je stav oko drugih elektrana nastao pod utjecajem koristi pojedinih elektrana za ljude.

Tab.1.: Eksterni troškovi elektrana

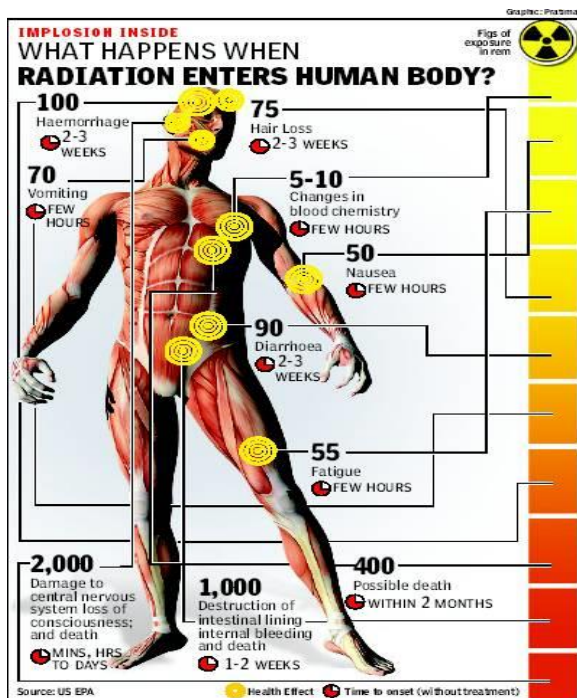
Vrsta elektrane	Elektrana na ugljen	Elektrana na plin u kombiniranom ciklusu	Hidroelektrana	Vjetrena elektrana	Nuklearna elektrana
Eksterni trošak zbog emisija CO ₂ [eurocenti/kWh]	1,60	0,73	0,03	0,04	0,03
Eksterni trošak zbog emisija krutih čestica i aerosola, radioaktivnih tvari i buke [eurocenti/kWh]	0,95	0,39	0,08	0,12	0,17
Ukupni eksterni trošak [eurocenti/kWh]	2,55	1,12	0,11	0,16	0,20

Izvor: Jakšić, 2015

U suvremeno doba poznata je metoda dubinskog skladištenja otpada kojom se može narušiti kvaliteta tla, a samim time postoji mogućnost i dugotrajne degradacije okoliša. Nakon što se otpad skladišti u dubokim geološkim formacijama njegovo zračenje može trajati i do desetak tisuća godina od odlaganja. Koliko je velika šteta i utjecaj tog otpada, znanstvenici su istražili pomoću rudnika urana Oklo u Gabonu. Rudnik Oklo sadrži rudu visoke koncentracije urana. Znanstvenici su istražujući taj rudnik zaključili kako je prije 2 milijarde godina prirodni uran s tog područja sadržavao 3,5% urana (Jakšić, 2015). Analiza okolnog tla pokazala je kako su fizijski produkti i sami proizvodi nastali raspadanjem imali vrlo nisku razinu prodiranja u tlo te se time dokazalo kako je mogućnost korištenja dubinskog skladištenja za odlaganje visoko-radioaktivnog otpada vrlo malo opasna za okoliš. Eksperimentom je pokazano kako se radioaktivni nuklidi zadržavaju u blizini mjesta te da nemaju veći utjecaj na širi okoliš.

Osim utjecaja na okoliš, snažan je utjecaj radijacije na ljude i na ljudsko zdravlje. Utjecaj na genomsku strukturu izrazito je važan jer ne mora odmah uzrokovati štetne posljedice na ljudski organizam, već se može očitovati godinama nakon prvotnog kontakta u obliku razno raznih zloćudnih bolesti ili se može očitovati na samom početku života ako zračenje započinje svoj utjecaj još u početnoj fazi razvoja djeteta (Mrak, 2014).

Postoje dvije vrste bolesti uzrokovane radijacijom iz nuklearnih postrojenja i otpada. Prva su vrsta akutne radijacijske bolesti. Akutna radijacijska bolest nastaje ako je tijelo ozračeno velikim dozama zračenja u malom roku. Bolest može gradirati od lagane mučnine pa sve do smrti ako se utjecaj zračenja proširi na više vitalnih organa (sl. 3.). Druga je vrsta kronična radijacijska bolest koja može nastati kao posljedica trajnog ozračivanja malim dozama.



Sl. 3.: Utjecaj radijacije na ljudsko tijelo

Izvor: Liberty for life, 2011

3. Skladištenje u RH – problemi i prijedlozi

Ideja „dobre prakse“ u gospodarenju radioaktivnim otpadom (RAO) i istrošenim nuklearnim gorivom (ING) mijenja se s napretkom inženjerskih znanja i tehnologija, ali već niz desetljeća uključuje nekoliko postupaka: predobradu RAO-a i ING-a (kompaktiranje, spaljivanje, solidifikaciju i sl.), pakiranje u spremnike, privremeno ili dugotrajno skladištenje te odlaganje koje podrazumijeva odvajanje otpada od okoliša nizom slabo propusnih barijera i/ili ukapanje u tlo. Specifičnost hrvatskog programa gospodarenja RAO-om svakako je u tome što, iako na neki način traje još od 1979. godine, nikada nije uključivao sustavni program informiranja/educiranja/

uključivanja javnosti. Premda je objavljen niz publikacija na tu temu, donedavno se nije ozbiljno prišlo tom problemu. Tako je u posljednjih nekoliko godina poduzet niz inicijativa s ciljem informiranja javnosti, od kojih treba izdvojiti „Info kutak o radioaktivnom otpadu”, novi dio stalnog postava u Tehničkom muzeju Nikola Tesla (Veinović, 2016).

U Republici Hrvatskoj privremeno je uskladišteno oko 50 m³ istrošenih izvora ionizirajućeg zračenja i drugih iskorištenih radioaktivnih tvari (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, n.d.). Manje količine takvog otpada koje se proizvode u Hrvatskoj zasad se skladište u institucijama u kojima su nastale, primjerice u bolnicama. Iako nemaju svoja skladišta, otpad su dužne čuvati po propisanim standardima, što prati Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Nisko i srednje radioaktivni otpad čuvaju oni koji ga proizvode jer Hrvatska nema skladište. Uz domaći otpad morat ćemo zbrinuti i onaj iz nuklearke Krško, a Slovenci predlažu zajedničku lokaciju uz Savu. Hrvatska će morati imati i odlagalište za trajno zbrinjavanje otpada koje bi koštalo nekoliko milijuna eura. Trajno je rješenje predviđeno zakonom iz 2013., na temelju kojega je lani provedena javna rasprava o Nacionalnom programu za provedbu strategije nuklearne sigurnosti, s predviđenom gradnjom skladišta na Trgovskoj gori (sl. 4.). Lokacija je izazvala snažan otpor među stanovnicima Dvora na Uni i lokalnim političarima, ali i u susjednoj BiH.



Sl. 4.: Prosvjednici protiv skladištenja otpada na Trgovinskoj gori

Izvor: Večernji list, 2016

Proces izbora lokacije odlagališta za nisko i srednje radioaktivni otpad u RH započeo je 1988. i trajao do 1997. godine (Novak, 2017). Ukupno su izdvojene 34 potencijalne lokacije odlagališta RAO-a. Primjenom tzv. izlučnih kriterija vrednovana su sljedeća svojstva lokacija: sigurnost od poplave, ugroženost od potresa, udaljenost od aktivnih rasjeda, litološka i geomorfološka svojstva, hidrogeologija, zaštita prirodne i kulturne baštine, rudarska eksploatacija, zahtjevi nacionalne obrane i gustoća naseljenosti.

Godine 1997. izdvojene su 4 potencijalne lokacije s približno ujednačenim karakteristikama: Trgovska gora, Moslavačka gora, Papuk, Psunj (Novak, 2017).

U Republici Hrvatskoj postoji relativno mala količina RAO-a ($7,5 \text{ m}^3$) (tab.2.), koji je većinom smješten u dvama skladištima institucionalnog RAO-a: skladištu u sklopu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) i skladištu Instituta Ruđer Bošković (IRB). Oba spomenuta skladišta nalaze se u Zagrebu i oba su zatvorena, a otpad je u njima kondicioniran i pohranjen u spremnicima predviđenim za skladištenje, odnosno odlaganje. Prve količine otpada iz NEK-a planiraju se zaprimiti 2023. godine, a razgradnja NEK-a u 2043. godini (Novak, 2017).

Tab. 2.: Vrsta radioaktivnog otpada u RH

Vrsta RAO	Karakteristike	2023.	2043.
Pogonski	Masa (t)	3.953	4.903
	Aktivnost Bq	$2,53 \cdot 10^3$	$2,92 \cdot 10^{13}$
Dekomisijski	Masa (t)	4.998	5.307
	Aktivnost Bq	$1,0 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{13}$
UKUPNO	Masa (t)	8.915	10.210
	Aktivnost Bq	$4,25 \cdot 10^{13}$	$5,42 \cdot 10^{13}$

Izvor: Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, istrošenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva, 2014

Tipovi otpada koji se nalazi u tim skladištima jesu: radioaktivni gromobrani, radioaktivni javljači požara, medicinski izvori i drugi RAO iz medicine, industrijski izvori, izvori iz istraživačkih ustanova, svjetleća boja i dijelovi optičkih uređaja. Potreba za novim skladištem RAO-a u Hrvatskoj ne proizlazi samo iz činjenice da su postojeća skladišta zatvorena i da novi otpad svakodnevno nastaje, već i iz činjenice da je Republika Hrvatska, uz Republiku Sloveniju, suvlasnica nuklearne elektrane Krško (NEK), svaka s udjelom od 50%, što ne uključuje samo kupovinu električne energije već i zbrinjavanje 50% otpada (Veinović, 2016).

4. Nuklearne katastrofe

Iako nuklearna energija ima veliku i važnu pozitivnu ulogu u radu i razvitku čovječanstva, nažalost, tijekom povijesti pokazala je i svoju crnu stranu. Ta je crna strana za sobom ostavila veliki broj umrlih, još veći broj ozlijeđenih i oštećenih infrastruktura te prostore koji su ostali bez mogućnosti za naseljavanjem, a takvi će ostati još neko vrijeme. Četiri najveća nuklearna događaja koja su obilježila povijest čovječanstva jesu: eksplozije atomskih bombi u Hiroshimi i Nagasakiju u drugom svjetskom ratu, eksplozija nuklearne elektrane u Černobilu 1986. godine te, iz najnovije povijesti, eksplozija nuklearne elektrane Fukušima Daiči 2011. godine.

4.1. Černobil, 1986.

Nuklearna katastrofa u Černobilu dogodila se 26. travnja 1986. godine (sl. 5.). Černobilska elektrana nalazila se 13 km od Kijeva te 20-ak km od Bjeloruske granice. To je bilo slabo naseljeno područje s najbližim gradom na udaljenosti od 3 km, gdje se nalazilo 49 000 stanovnika. Sam grad Černobil nalazio se 15 km od kompleksa i brojao je 12 500 stanovnika. Čitavo područje u radijusu od 30 km brojalo je do 135 000 stanovnika. Gradnja reaktora započela je 1970. godine te je u potpunosti završena 1983. godine. Sam reaktor sastojao se od 4 jedinice (Steinhouser, 2014).

Neposredno prije rutinskog gašenja elektrane, 26. travnja 1986., u reaktoru 4 su pripremali test kojim su htjeli vidjeti koliko dugo će se turbine vrtjeti i isporučivati energiju pumpama za hlađenje ako dođe do prekida glavnog izvora energije. Sve nuklearne elektrane imale su generatore koji bi stvorili struju u slučaju takvog događaja. No bilo je važno znati koliko će

vremena proći između zaustavljanja turbine i pokretanja generatora. Svi u Sovjetskom Savezu smatrali su kako je ovakav test neophodan te da ga je važno izvršiti i prije puštanja reaktora u rad (Mrak, 2014).

Test se trebao održati u posljednjem tjednu travnja 1986. godine, za vrijeme dok je Bryukhanov (ruski političar) bio u Kijevu (Bošnjaković, 2016). Iako je većina radnika u Černobilu radila već godinama, nisu bili upoznati s postupcima koje bi trebali napraviti ako dođe do hitnih slučajeva. Upravo cijeli taj niz nedostatka informacija igrao je ključnu ulogu u černobilskoj katastrofi.

Oko pola 2 u noći pumpe s rashladnom vodom postale su preopterećene, što je dovelo do pada protoka hladne vode te njezinog grijanja i do problema u reaktoru. Time je započeo smrtonosni ciklus. Zagrijavala se proizvedena para, a para je pak još više poticala fisiju, a fisijom je nastajalo sve više topline, što je dovodilo do ponavljanja takvog ciklusa. Kako su parne cijevi koje su vodile do turbogeneratora bile zatvorene, para nije imala kamo odlaziti, što je dovelo do nervoze kod radnika (Bošnjaković, 2016).

Eksplוזija reaktora bila je toliko snažna da je podignula betonski poklopac koji je imao masu veću od 1000 tona. Poklopac je unatoč svojoj velikoj masi ostao nekoliko sekundi u zraku i izazvao početak katastrofe koja je svoje razmjere tek trebala dohvatiti. Nakon prve eksplozije sav je zrak ušao i počeo se miješati fisijom, što je dovelo do još nekoliko slabijih eksplozija. Poslije eksplozije koja je otpuhala krov reaktora dogodio se presudni trenutak. Opasan materijal koji se prije zadržavao u reaktoru raspršio se u obliku plamena u okoliš. Velike količine nuklearnog goriva, milijarde radioaktivnih čestica te velika količina krutog materijala u obliku plamena padala je po zemlji, a jedan je dio padao i na krov susjedne zgrade gdje se nalazio turbogenerator. Krov je bio obložen katranom koji se ubrzo zapalio. Oko 50 tona nuklearnog goriva otišlo je u atmosferu, a drugih 70 tona padalo je oko elektrane (Steinhouser, 2014).

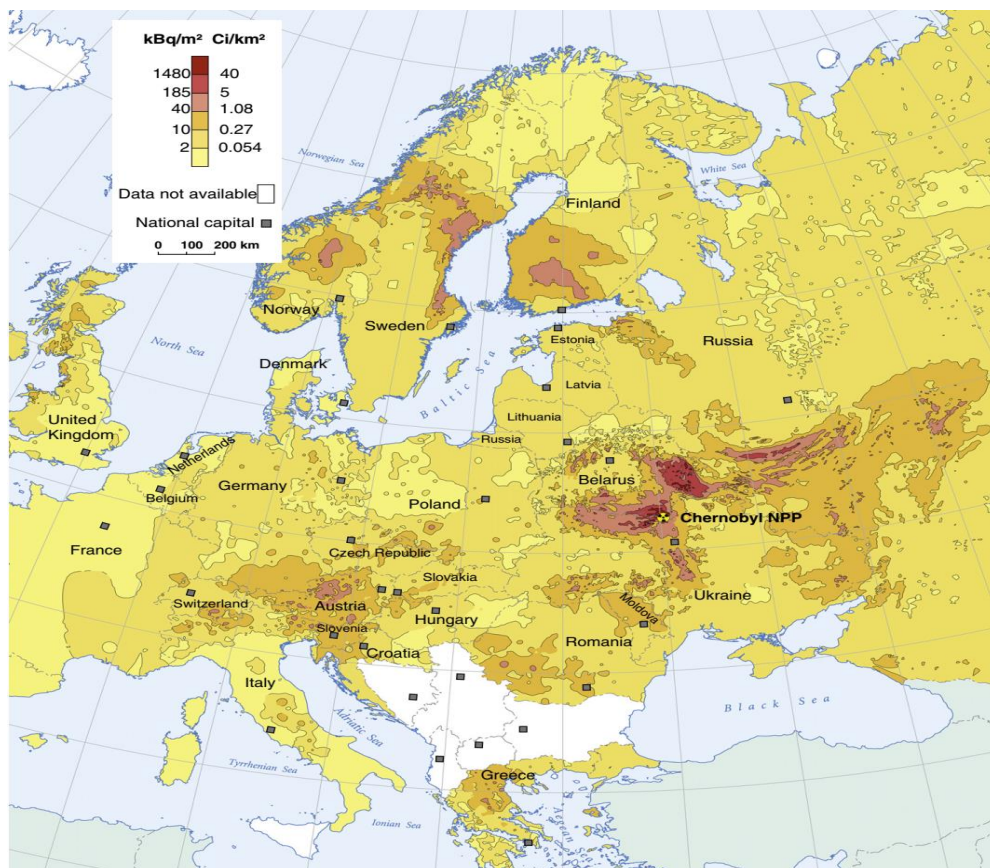


Sl. 5.: Nuklearna elektrana prije katastrofe i nakon nje

Izvor: Pinterest, n.d.

Dva su radnika poginula u samom trenutku eksplozije. Šest vatrogasaca poginulo je u gašenju požara na krovu zgrade tijekom nekoliko sati. Radioaktivni oblak došao je čak do Skandinavije. Organizirana je posebna ljudska jedinica, „likvidatori“, koji su imali zadaću oporavka i čišćenja područja zahvaćenog eksplozijom. Gotovo 600 000 ljudi angažirano je, od čega ih je 200 000 primilo visoke doze zračenja (Mrak, 2014).

World Health Organisation (WHO) je 1989. godine izrazila zabrinutost zbog nedovoljnih informacija koje su izdavali sovjetski znanstvenici, vezanih uz katastrofu u Černobilu, čime se htjelo ublažiti prikaz posljedica katastrofe. Nedugo nakon toga vlada USSR-a i International Atomic Energy Agency (IAEA) oformili su radnu skupinu koja je imala zadatak opisati utjecaj zračenja. Terenske su studije provedene 1990. i 1991. i nisu prikazale neku preveliku ulogu zračenja. Ipak, prema novijim informacijama, smatra se da je 1 000 000 ljudi bilo izloženo zračenju (sl. 6.). Smatra se da je karcinom štitnjače kod 4000 djece nastao kao posljedica izlaganja zračenju (Steinhouser, 2014).



Sl. 6.: Širenje radijacije nakon Černobilske katastrofe

Izvor: Steinhouser, 2014.

U neposrednoj blizini četvrtog reaktora bile su najveće koncentracije radioaktivnih čestica. Također, zbog utjecaja vjetrova i raznošenja radioaktivnih čestica, velika količina bila je i na području istočne Bjelorusije i jugozapadne Rusije. Kako su radioaktivne čestice padale na razne površine, zračenja je bilo svugdje. Krave su bile zaražene jedući travu koja je bila ozračena. Tako su milijuni litara mlijeka u Poljskoj, Mađarskoj, Austriji i Švedskoj postali neupotrebljivi (Mrak, 2014). Neposredno područje oko nuklearne elektrane Černobil (oko 30 km) bilo je zona isključenja (sl. 6.).

Tjednima i mjesecima nakon nesreće bolnice cijele regije bile su pretrpane pacijentima koji su bili otrovani zračenjem. Budući da je ta situacija bila sasvim drugačija od dotad viđenih, mnogi zdravstveni radnici nisu znali što učiniti. Osobe koje su se nalazile oko 1,6 km od mjesta gdje se dogodila nesreća primile su smrtonosne doze gama-zračenja (Steinhouser, 2016).

Od travnja 1986. godine zabilježen je porast bolesnika s raznim oblicima karcinoma, uključujući leukemiju, rak dojke kod žena, rak pluća i želuca kod muškaraca te rak štitnjače kod djece. Međutim, nije samo karcinom bio problem. Velik broj slučajeva imao je probleme s dišnim putovima, kao što su astma i upala pluća. Također, porastao je i broj ljudi s kardiovaskularnim problemima, uključujući srčani udar koji se pojavljivao i kod relativno mladih pacijenata. Također, jedan od zdravstvenih problema bio je razrjeđivanje krvi koji je mogao dovesti do raznih oblika krvarenja (Bošnjaković, 2016).

Unatoč tome što su Sovjeti obećali stanovnicima u Pripjatu da će se moći vratiti u svoje domove nakon tri dana, to nitko nije mogao učiniti. Naime, grad je ubrzo nakon nesreće bio okružen ogradom. Zemljište oko nuklearne elektrane Černobil postalo je beskorisno. Biljke, tlo i voda postali su previše zagađeni. U početku su znanstvenici smatrali da će zemljište unatoč svemu biti pogodno za sijanje različitih kultura. No ono se više nikad nije vratilo u nekadašnje stanje.

Šteta se proširila i izvan Ukrajine, Bjelorusije i Rusije. U nekoliko europskih zemalja usjevi su postali neiskoristivi. Mliječni proizvodi, kao što su mlijeko, maslac, čokolada i sladoled, zabranjeni su jer su došli od krava koje su jele onečišćenu travu. Neke životinje nisu bile u stanju imati potomstvo zbog količine zračenja koju su primile. Mnoge su odrasle životinje usmrćene, a njihova tijela uništena jer više nisu bila prikladna za prehranu. Više nitko nije uzimao proizvode koji su dolazili iz tog dijela svijeta. Gubitak je iznosio više od 300 milijuna dolara (Bošnjaković, 2016).

Danas, nakon više od 20 godina od katastrofe, Černobil se i dalje suočava s posljedicama. Najbolji je primjer velik broj mutacija koje su se prenosile s generacije na generaciju. Velika većina ljudi i dan-danas boluje od tumora i ostalih bolesti uzrokovanih mutacijama. Područje je i dalje pod utjecajem radijacije u manjim količinama, ali dovoljnim da područje bude i dalje ne naseljivo.

Velika količina flore i faune izumrla je, a onaj dio koji je preživio katastrofu, danas se bori s teškim mutacijama. Prema istraživanju iz 2013. godine (tab.3.), sisavci se ne pojavljuju unutar 3,5 km² od mjesta katastrofe. Kao, što je bilo i za očekivati, najbliže mjestu nekadašnje nuklearne elektrane možemo naći guštere, vodozemce i skakavce (Møller, 2014). Najveći problem i dalje imaju ptice koje su najviše stradale za vrijeme širenja radijacije jer je najveća količina radijacije otišla u zrak.

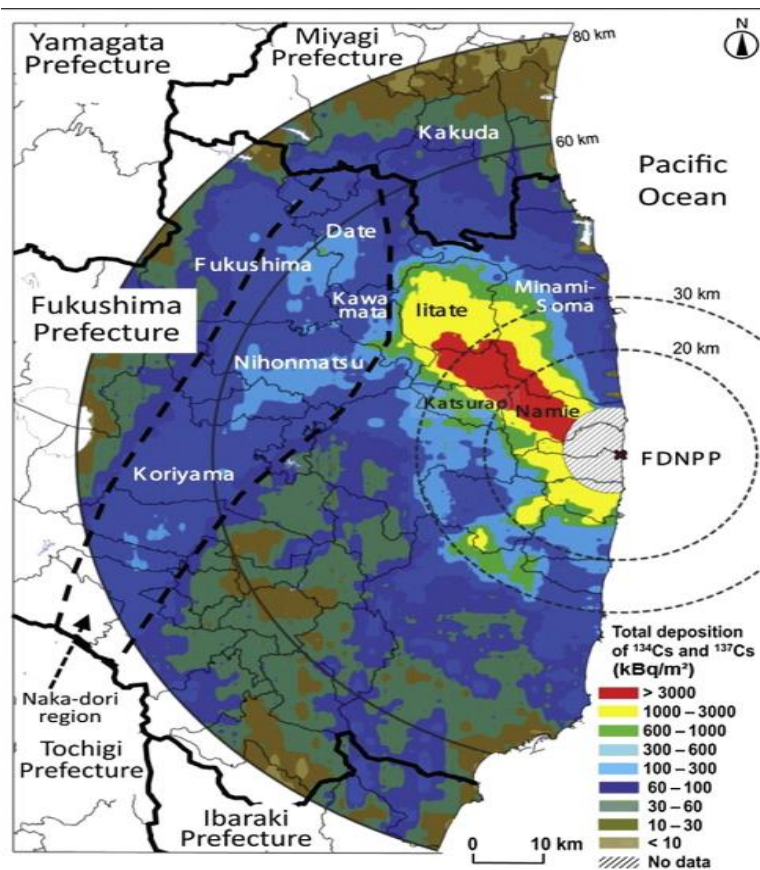
Tab. 3.: Zona unutar koje se javljaju životinje u Černobilu nakon katastrofe (km²)

Černobil	Kilometraža unutar koje se vrste nalaze (km²)
Sisavci	3,669
Jedinke ptica	6,973
Grupa ptica	4,124
Gmazovi	0,093
Vodozemci	0,196
Bumbari	1,595
Leptiri	2,153
Vretenca	1,195
Skakavci	0,891
Pauci	5,738

Izvor: Møller, 2014

4.2. Fukušima Daichii

Jak potres, od 9,3 stupnja po Richteru, 11. ožujka 2011. izazvao je razoran tsunami koji je uništio sjeveroistočnu obalu Japana (sl. 7.). Uslijedila je najveća poslijeratna nuklearna katastrofa u toj zemlji koja je, prema Međunarodnoj ljestvici nuklearnih i radioloških događaja (INES), klasificirana kao teška nesreća najviše, sedme razine (Mihalinčić, 2012). Deseci tisuća stanovnika evakuirani su iz svojih kuća, dok su se radnici nuklearke danima borili da stave reaktore pod kontrolu. Katastrofu su izazvali prirodni uzroci, ali se čini da je za njezine posljedice uvelike bio odgovoran i „ljudski faktor“, što je istaknuto i u izvješću Neovisnoga istražnog povjerenstva za Fukušimu koje je osnovao japanski parlament.



Sl. 7.: Radijus katastrofe

Izvor: Steinhouser, 2014

Najviše je stradao grad Okuma s 11,5 tisuća stanovnika. Potres nije bio glavni uzrok nuklearne katastrofe, nego je to bio tsunami koji je potopio spremnike goriva i dizelske agregate jer je njegova visina sezala čak do 13 metara, dok su zaštitni zidovi elektrane bili visoki do 5,7 metara. Voda je doprla do generatora koji su hladili sistem te su se generatori ugasil. Pričuvni baterijski sistemi su se upalili, ali je njihovo djelovanje kratkotrajno upravo zbog toga što rade na baterije. Idućeg dana, 12. ožujka, sistemi za hlađenje prestali su s radom, što je dovelo do zagrijavanja reaktora te su se počele stvarati velike količine vodikovih plinova koji su uzrokovali eksploziju reaktora (sl. 8.).

Before



After



Sl. 8.: Fukušima prije i nakon katastrofe

Izvor: Pinterest, n.d.

U kriznim stanjima javnost očekuje brzu i točnu informaciju o događaju. Javnost ima pravo biti pravodobno informirana, kao i pravo uvida u pravo stanje stvari. Osim komunikacijskih problema u zapovjednom lancu u slučaju Fukušima, bili su očiti i problemi u informiranju javnosti o nesreći. Samo je 20% stanovnika blizu nuklearne elektrane znalo za nesreću kada je 11. ožujka u 21 sat i 23 minute naređena evakuacija unutar tri kilometra (Mihalinčić, 2012). Informacije o nesreći prenosile su se sporo, a njihova je dostupnost varirala ovisno o udaljenosti od nuklearne elektrane. Informacije nisu bile pravodobne, što potvrđuje i spora reakcija vlade u proglašenju izvanrednog stanja. Nalozi o evakuaciji u samo su jednom danu uzastopce revidirani, evakuacijske zone širile su se s tri preko deset do dvadeset kilometara. Stanovnici su evakuirani bez informacija o nesreći i samoj evakuaciji pa su mnogi napustili domove s minimalnim osnovnim potrepštinama. Mnogi od njih bili su evakuirani u zone s visokom dozom radijacije.

Smatra se da ni jedna smrt nije tada bila uzrokovana zračenjem, a 15 388 žrtava poginulo je kao posljedica potresa i posljedičnog tsunamija (Steinhouser, 2014). U izvješću iznesenom u veljači

2013. 40% djece koja su živjela u okolici elektrane imaju neki oblik abnormalnosti štitnjače, a 10 od 186 boluje od karcinoma štitnjače (Mrak, 2014).

Katastrofa u Fukušimi rezultirala je manjom ekološkom katastrofom nego što je bila ona u Černobil. Biljne i životinjske vrste nisu bile toliko potisnute van prostora katastrofe, a jedan je od razloga i manja količina radioaktivnog zračenja (tab.4.). Tako će se, na primjer, najteže vidjeti leptir na tome području, dok se ostale životinje nalaze unutar 1 km² (Møller., 2014).

Tab. 4.: Zone unutar kojih se javljaju životinje u Fukušimi nakon katastrofe (km²)

Fukušima	Kilometraža unutar koje se vrste nalaze (km²)
Jedinke ptica	0,775
Skupine ptica	0,181
Bumbari	0,001
Leptiri	4,553
Cvrčci	0,208
Vretenca	0,127
Skakavci	0,004
Pauci	0,636

Izvor: Møller, 2014

5. Zaključak

Postupci i metode pri skladištenju radioaktivnog otpada vrlo su kompleksni i dugotrajni. Zahtijevaju brojne predfaze i restriksijske mjere prije samog transporta. Radioaktivni otpad sam po sebi može biti vrlo opasan za ljude i okoliš u koji se stavlja. Iako je znanstvenim istraživanjem zaključeno da nema dugotrajnije posljedice niti se širi, njegov utjecaj na okolnu floru i faunu vrlo je velik. Najveće djelovanje, i to štetno, ima na ljude. Osobe izložene radijaciji postaju sklonije brojnim tumorima i bolestima. Stanje u Republici Hrvatskoj i dalje je zabrinjavajuće jer i dalje ne

postoji adekvatno rješenje lokacije za pohranu nuklearnog otpada. U prošlosti su se spominjale 4 lokacije, a danas je to suženo na samo jednu. Iako Hrvatska u teoriji ima prijedlog za lokaciju, ponovo se javlja problem, ali ovaj put u vidu lokalnog stanovništva koje svojim prosvjedima zadržava Hrvatsku od konačnog cilja. Hrvatska bi mogla naučiti iz grešaka svojih prethodnika iz Europe (Černobil) i svijeta (Fukušima). Ta dva grada spadaju u dvije najveće nuklearne katastrofe izazvane prirodom, ali uz velik doprinos nemara ljudi. Tako danas ta dva područja i dalje ostaju opasna za nastavak života, a flora i fauna na njima su ugrožene. Iz svega bi se dalo zaključiti da je svijet i dalje neoprezan te da i dalje ne zna kolike su opasnosti nuklearne energije i njenog otpada. Nove suvremene metode otišle su predaleko za malenu Hrvatsku, ali kako se kaže, „strpljen, spašen“ – možda jednog dana slome otpor lokalnog stanovništva i zaživi plan Trgovske gore.

Literatura:

- Besednik, M., 2018: Nastanak i zbrinjavanje radioaktivnog otpada, Veleučilište u Karlovcu, diplomski rad
- Bošnjaković, M., 2016: Černobil prije i nakon katastrofe, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, diplomski rad
- Gawande, K., Jenkins-Smith, H., 2000: Nuclear Waste Transport and Residential Property Values: Estimating the Effects of Perceived Risks, *Journal of Environmental Economics and Management* 42, 207 - 233
- Jakšić, F., 2015: Nuklearne elektrane danas, Sveučilište u Zagrebu, diplomski rad
- Kolarec, J., 2015: Nuklearna elektrana Krško, Veleučilište u Karlovcu, diplomski rad
- Mihalinić, M., 2012: Slučaj Fukushima, *Krizno Komuniciranje*, 12, 32-37
- Mrak, M., 2014: Javnozdravstvene posljedice zagrebačkom području u slučaju nuklearne katastrofe, Sveučilište u Zagrebu, diplomski rad
- Møller, A. P., 2013: Differences in effects of radiation on abundance of animals in Fukushima and Chernobyl, *Ecological Indicators* 24, 75-81
- Novak, M., 2017: Radioaktivni otpad na odlagalištima otpada i njegovo zbrinjavanje, Međimursko Veleučilište u Čakovcu, diplomski rad
- Slovic, P., 1991: Risk, Perception, Trust, and Nuclear Waste, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 33(3), 6-30
- Steinhauser, G., 2014: Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts, *Science of the Total Environment* 470, 800-817
- Veinović, Ž., 2016: Zbrinjavanje radioaktivnog otpada – svjetska praksa i hrvatski izazovi, *Zaštita okoliša, Kem. Ind.* 65 (7-8), 420-423
- Wolman, A., 1957: Disposal of Radioactive Wastes, *American Water Works Association* 49(5), 505-511

Izvori:

GRID arendal, 2005: <https://www.grida.no/resources/5657> (14.8.2018.)

Hrvatski sabor, 2014: Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva: https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_125_2382.html, (17.8.2018.)

Liberty for life, 2011: <http://www.libertyforlife.com/military-war/radiation-exposure-impact.html> (14.8.2018.)

Večernji list, 2016: Od srijede građanima dostupni dokumenti o gradnji odlagališta nuklearnog otpada na Trgovskoj gori, <https://www.vecernji.hr/vijesti/od-srijede-gradanima-dostupni-dokumenti-o-gradnji-odlagalista-nuklearnog-otpada-na-trgovskoj-gori-1060605> (16.8.2018.)

Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, n.d.: <http://radioaktivniotpad.org/transport-nsrao-a/> (12.8.2018.)

Pinterest – internetska stranica za objavljivanje slika, n.d.: <https://www.pinterest.com/pin/341569952970165017/> (17.8.2018.)

Pinterest – internetska stranica za objavljivanje slika, n.d.: <https://www.pinterest.com/pin/427630927111789953/> (18.8.2018.)