

M. Čizmešinkin Cugovčan, I. A. Nola*

UČINCI ČERNOBILSKE KATASTROFE NA POJAVNOST TUMORA ŠTITNJAČE U ZEMLJAMA U OKRUŽENJU

UDK 616.44-006:621.311.22](477černobil)

PRIMLJENO: 10.9.2023.

PRIHVAĆENO: 22.8.2024.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: Černobilska katastrofa iz 1986. godine i njezine posljedice povezane s incidencijom tumora štitnjače često su istraživane u proteklim desetljećima. Tumor štitnjače je najčešća zloćudna bolest endokrinog sustava. Rizični čimbenici za tumor štitnjače uključuju izlaganje ionizirajućem zračenju, obiteljsku anamnezu tumora štitnjače, niski sadržaj joda u prehrani, neke rijetke nasljedne sindrome, ženski spol i sniženu razinu D vitamina. Unatoč mogućoj izloženosti radionuklidima nakon nuklearne katastrofe u Černobilu, rezultati istraživanja provedenih u Hrvatskoj nisu pokazala neporecivu vezu između pojavnosti tumora štitnjače i izloženosti radionuklidima nakon katastrofe u Černobilu u pojedinaca koji su se nalazili u rizičnoj skupini (rođeni između 1966. i 1986.). Istraživanja provedena u Europi ukazuju na pojavnost tumora štitnjače kao posljedicu okolišnih i genetskih čimbenika, dok istraživanja rađena na području bivšeg SSSR-a ukazuju na pojavnost tumora štitnjače u djece kao izravnu posljedicu nuklearne katastrofe u Černobilu. Iako trendovi u svijetu ukazuju na značajan porast broja novooboljelih od tumora štitnjače, oko 5 % godišnje u posljednjih 20 godina, ipak se veliki dio porasta broja novooboljelih pripisuje boljoj dijagnostici i češćim ultrazvučnim pregledima štitnjače.

Ključne riječi: Černobil, Hrvatska, ionizirajuće zračenje, nuklearna katastrofa, tumor štitnjače

UVOD

Čovjek je oduvijek bio okružen prirodnim radioaktivnim tvarima i izložen kozmičkom zračenju. Oslobođanje radionuklida u okoliš popratna je pojava i mnogih tehnoloških procesa, npr. rad nuklearnih elektrana (Franić et al., 2000.).

Najčešći razlog i izvor straha su nuklearne katastrofe, i to nekoliko u povijesti čovječanstva: atomske bombe bačene na Hirošimu i Nagasaki te nuklearne katastrofe u Černobilu 1986. godine

i Fukushima 2011. godine. Nuklearna katastrofa u Černobilu dogodila se u elektrani "Lenjin" koja se nalazila u sjevernoj Ukrajini (tada dio SSSR-a). U noći 26. travnja 1986. u 1 sat i 23 minute dogodila se nesreća zbog provjere na reaktoru broj 4 (Bell, 2005., Beresford et al., 2016., Sturko, 2021., WNA, 2019.). Svrha provjere bila je ispitati sigurnost reaktora u slučaju nestanka opskrbe elektrane električnom energijom. Manje od minute nakon početka provjere eksplodirala je para koja je raznijela poklopac reaktora i rezultirala jednom od najvećih nuklearnih katastrofa u ljudskoj povijesti proizvodnje nuklearne energije. Izložena jezgra reaktora nastavila je gorjeti otprilike 10 dana uz neprekidno ispuštanje radioaktivnosti u atmosferu tijekom tog razdoblja (Beresford et al., 2016., Sturko, 2021., IAEA, 2006a., IAEA, 2006b., Marino i Nunziata, 2018.), čije je širenje zaustavljeno zračnim bombardiranjem jezgre s više od 2.000

*Marina Čizmešinkin Cugovčan, univ. mag. med. techn., (marina.cizmesinkin@gmail.com), KBC Zagreb, Klinika za bolesti srca i krvnih žila, Odjel za ehokardiografiju, srčanu hemodinamiku i neinvazivnu dijagnostiku, Kišpatićeva 12, 10000 Zagreb, Hrvatska, prof. dr. sc. Iskra Alexandra Nola, univ. mag. admin. sanit., (iskra.nola@snz.hr), (autor za dopisivanje), Sveučilište u Zagrebu, Medicinski fakultet, Škola narodnog zdravlja „Andrija Štampar“, Katedra za zdravstvenu ekologiju i medicinu rada i sporta, Rockefellerova 4, 10000 Zagreb, Hrvatska.

tona olova. Požar u grafitu zaustavljen je dodavanjem dušika s donje strane reaktora. U razdoblju od srpnja do studenog 1986. čitav reaktor zatvoren je u zaštitni sarkofag (*Sturko, 2021.*).

Između 27. travnja 1986., kada je evakuirano oko 44.000 stanovnika Pripjata otprilike 3 km od nuklearne elektrane, i 6. svibnja 1986., kada je evakuirano cijelo stanovništvo, stvorena je 'zona isključenja od 30 km' (*Beresford et al., 2016., IAEA, 2006a., IAEA, 2006b.*) oko nuklearne elektrane. U početku je ukupno evakuirano približno 116.000 ljudi s područja od oko 3500 km². Naknadno je broj evakuiranih porastao na 350.000 unutar ugroženih područja Ukrajine, Bjelorusije i Rusije. Mnoga od tih evakuiranih područja i danas su napuštena (*Beresford et al., 2016.*).

Nakon nuklearne katastrofe u Černobilu začinje niz znanstvenih istraživanja povezanih s bolestima koje su se pojavile kao posljedica izloženosti ionizacijskom zračenju, uključivo i tumor štitnjače. Svrha ovog rada je prikazati povezanost nuklearnog onečišćenja nastalog u regiji nakon nuklearne katastrofe u Černobilu s istraživanjima koja su pratila povećanje incidencije tumora štitnjače.

TUMOR ŠTITNJAČE

Tumor štitnjače najčešća je zloćudna bolest endokrinog sustava. Prema zadnjim procjenama u svijetu su od tumora štitnjače 2020. godine oboljele 586.202 osobe, a umrlo je 43.646 osoba (*HZJZ, 2022.*). Od tog broja žene čine preko 80 % svih novih slučajeva u Europi te 60 % smrti zbog tumora štitnjače. Tumor štitnjače može se pojaviti u bilo kojoj dobi; kod žena se češće javlja u četrdesetim i pedesetim godinama života, dok je u muškaraca češći u šezdesetim i sedamdesetim. U Hrvatskoj, prema posljednjim podacima Registra za rak Hrvatskog zavoda za javno zdravstvo (HZJZ), u 2019. godini od tumora štitnjače oboljela je 831 osoba, od čega 78 % žena (*HZJZ, 2022.*). Rizični čimbenici za tumor štitnjače uključuju izlaganje ionizirajućem zračenju, obiteljsku anamnezu tumora štitnjače, niski sadržaj joda u prehrani, neke rijetke nasljedne sindrome, ženski spol i sniženu razinu D vitamina. Trendovi u svijetu ukazuju na značajan porast broja novooboljelih od tumora štitnjače, oko 5 % godišnje

u posljednjih 20 godina. Velik dio porasta broja novooboljelih pripisuje se boljoj dijagnostici i češćim ultrazvučnim pregledima štitnjače.

Kasnih 1970-ih i ranih 1980-ih u SAD-u ultrazvuk štitnjače i biopsija iglom uvedeni su i prihvaćeni za procjenu čvorova štitnjače. Ultrazvuk je poboljšao vizualizaciju, a biopsija iglom postala je posebno vrijedna jer su pomoću nje liječnici mogli bolje razlikovati benigne od malignih lezija - bolje nego što je bilo koja radionuklidna ili druga tehnika snimanja tada ili poslije bila u stanju učiniti (*LeClair et al., 2021.*).

Istraživanja (*Davies i Welch, 2006., Haymart et al., 2019., Udelsman i Zhang, 2014.*) su potvrdila da je široka dostupnost i uporaba ultrazvuka za pronalaženje čvorova i vođenje postupaka biopsije iglom u korelaciji s rastućim stopama otkrivanja tumora štitnjače.

Prvi odnos između izloženosti zračenju i tumora štitnjače zabilježen je 1950. godine nakon zračenja timusa ubrzo nakon rođenja (*Caudill et al., 2005., Duffy i Fitzgerald, 1950.*). Tumor štitnjače bio je prvi solidni zloćudni tumor s povećanom incidencijom među preživjelima japanske atomske bombe (*Furukawa et al., 2013.*). Kasnije je uočen povećani rizik od tumora štitnjače kao posljedica radioaktivnih padalina termonuklearne eksplozije na Maršalovim otocima (*Land et al., 2010.*). Rizik je najveći za izloženost zračenju tijekom prvih godina života i smanjuje se s dobi izloženosti, a nizak je kod izloženih odraslih osoba (*Iglesias et al., 2017.*).

Pretpostavlja se da razdoblje latencije od izlaganja radioaktivnom zračenju do razvoja tumora štitnjače u djece iznosi oko 8-10 godina (*Jukić et al., 2007.*), dok je kod odraslih nakon izlaganja zračenju, minimalno razdoblje latencije prije pojave tumora štitnjače je 5 do 10 godina (*Iglesias et al., 2017.*). Djeca su posebno osjetljiva skupina zbog razvojnih procesa koji su u trajanju te su time i osjetljivija na okolišne čimbenike. Zračenje je jedan od čimbenika za koji je dokazan veći učinak u djece (*Klapec, 2010., Jukić et al., 2007., Iglesias et al., 2017., Kitahara i Schneider, 2022.*). Štitnjača vrlo male djece (<5 godina) može biti osjetljivija na kancerogeni učinak zračenja u usporedbi sa starijom djecom (>5 godina) i odraslima (*Kikuchi et al., 2004.*).

Nedostatak joda

Značajan porast raka štitnjače među malom djecom koja su bila u blizini nuklearne elektrane u Černobilu u vrijeme nesreće 1986. godine ukazuje na moguću uzročnu vezu s velikim količinama izotopa radioaktivnog joda u nastalim padalinama (*Becker i Zanzonico, 2009.*). Rizik od tumora štitnjače ispitan je u odnosu na populacijske procjene doze zračenja štitnjače i razine izlučivanja joda urinom. Prekomjerni relativni rizik za tumor štitnjače bio je značajno povezan s povećanjem doze zračenja štitnjače te je bio obrnuto proporcionalno povezan s razinama izlučivanja joda urinom. Postojao je zajednički učinak izloženosti zračenju i nedostatka joda. Uz izloženost zračenju od 1 greya (Gy), prekomjerni relativni rizik na područjima s teškim nedostatkom joda bio je otprilike dva puta veći nego u područjima s normalnim unosom joda (*Shakhtarín et al., 2003.*). U područjima s dostatnim unosom joda zabilježena je veća stopa manje agresivnih papilarnih histoloških tipova od folikularnih i anaplastičnih tumora štitnjače (*Hojker, 2007.*). Učinak povećanja unosa joda na patohistološka obilježja tumora štitnjače naziva se "papilarizacija". S pojavom "papilarizacije" uočen je pomak ka manje uznapredovalim stadijima tumora te smanjenju veličine tumora, a time i boljoj prognozi kod bolesnika (*Jukić et al., 2007.*). Zabrinutost o mogućim nuspojavama velike, medicinski nenadzirane konzumacije tableta kalijevog jodida (KI) uglavnom je otklonjena u svjetlu povoljnog iskustva u Poljskoj nakon nesreće u Černobilu gdje je 16 milijuna osoba primilo jednokratnu dozu KI uz samo rijetku pojavu nuspojava i s 40 % smanjenjem predviđene doze zračenja štitnjače (*Becker i Zanzonico, 2009.*). Profilaksa stabilnim KI može značajno smanjiti dozu zračenja štitnjače zbog izloženosti jodu 131 (131I). Međutim, ključno je KI uzeti unutar nekoliko sati nakon izlaganja. Naime, nakon 3-4 sata učinkovitost KI smanjuje se za 50 % (*Braverman et al., 2014.*). Svjetska zdravstvena organizacija (SZO) prepoznaje dobrobiti stabilnog KI i potiče njegovu opću dostupnost (*Becker i Zanzonico, 2009.*).

Ova otkrića upućuju na to da je jodna nadoknada u područjima ugroženim Černobilskom nesrećom mogla biti važna za smanjenje učinaka izloženosti zračenju na štitnjaču. Ako to potvrde

studije koje se temelje na pojedincima, dobili bi se vrijedni podaci za korištenje stabilnog joda u slučaju izloženosti stanovništva radioaktivnom jodu (*Shakhtarín et al., 2003.*).

RADIONUKLIDI U OBORINAMA I OKOLIŠU NAKON NUKLEARNE KATASTROFE U ČERNOBILU

Radionuklidi stvoreni nuklearnim eksplozijama u atmosferi, osobito intenzivno provedenim 1960-ih godina te nakon nuklearnih katastrofa 1986. i 2011. godine, još su i danas prisutni u atmosferi i okolišu (*Franić et al., 1992., 2000., IAEA, 2011., Lokobauer et al., 1998., Salbu i Lind, 2005., USEPA, 2023., Hao et al., 2018.*).

S obzirom na to da je poluživot cezija 137 (137Cs) 30,17 godina, dio radioaktivnosti u ugroženim regijama prisutan je i danas, a obično se i dalje otkriva u hranidbenom lancu, iako u nižim razinama koncentracije (*Marino i Nunziata, 2018., Petríneć i Franić, 2005., Klapiec, 2010., Barišić et al., 2005.*).

Specifičnosti katastrofe (trajanje ispuštanja radioaktivnih produkata u atmosferu, promjena fizikalnih i kemijskih uvjeta) i promjene meteoroloških uvjeta uzrokovale su neujednačenu lokalnu kontaminaciju, kako sa stajališta gustoće radioaktivnih padalina tako i sa stajališta radionuklidnog sastava (*Lokobauer et al., 1998.*). Taj radioaktivni materijal taloži se na površinu Zemlje u obliku tzv. radioaktivnih oborina (engl. fallout) (*Franić et al., 2000., Petríneć i Franić, 2005., Klapiec, 2010.*). Može se taložiti i za vremena bez oborina te se naziva suhim radioaktivnim oborinama (*Franić et al., 1992., Barišić et al., 2005.*). Šuma je bila glavno područje kontaminacije nakon Černobilske katastrofe (*Yoschenko et al., 2017.*). Dekontaminacija šuma je teška jer modifikacija šume putem dekontaminacije (npr. uklanjanje gornjeg sloja tla) može poremetiti šumski ekosustav putem erozije, sedimentacije, poremećaja staništa i gubitka hranjivih tvari (*Hao et al., 2018.*). Također, 137Cs topiv je u vodi i biljke ga lako preuzimaju kao biološki analog kaliju (*Yoschenko et al., 2017.*). Dugo nakon što se primarni atmosferski 137Cs raspršio iz kontaminiranih područja, visoke razine 137Cs pronađene su u vegetaciji, stelji te kon-

centrirane u gornjih 5 cm tla (*Hejl et al., 2013., Yoschenko et al., 2006.*). Utvrđeno je da se ova sekundarna kontaminacija redistribuira u atmosferu šumskim požarima (*Yoschenko et al., 2006.*).

U Republici Hrvatskoj intenzivna i sustavna mjerenja uzoraka iz okoliša i prehrambenih lanaca ljudi započela su 30. travnja 1986. godine kada je prvi put zabilježen porast radioaktivnosti uzrokovan nuklearnom nesrećom u černobilskom reaktoru (*Lokobauer et al., 1998.*). Primarni cilj ovih mjerenja bio je procijeniti jesu li koncentracije radionuklida detektirane u okolišu dosegle razine koje bi mogle biti štetne za stanovništvo. Sekundarni cilj bio je razlikovati razlike u razinama kontaminacije, posebno u ljudskom prehrambenom lancu, koje su rezultat velikih testiranja nuklearnog oružja u atmosferi i nuklearne katastrofe u Černobilu (*Klapec, 2010., Lokobauer et al., 1998.*). U 1986. godini bio je vidljiv nagli porast ^{137}Cs do čega je došlo zbog rasprostiranja zrakom radioaktivnih tvari oslobođenih pri nuklearnoj katastrofi u elektrani "Lenjin" u Černobilu (*Cesar i Senčar, 1996.*). Gama-spektrometrijske analize padalina provodile su se u Republici Hrvatskoj svake godine na mjesečnim uzorcima prikupljenim na području Zagreba (sjeverozapadna Hrvatska), Zadra (južna Hrvatska-jadranska regija) te Osijeka (istočna Hrvatska); (*Lokobauer et al., 1998.*). Dugoročna ispitivanja depozicije ^{137}Cs u Hrvatskoj pokazuju da je njegova ukupna depozicija poslije Černobilske nesreće nadmašila vrijednosti zabilježene sredinom 1960.-ih godina. Depozicija ^{137}Cs od 5,8 kBq/m² izmjerena 1986. godine bila je približno 4.000 puta veća negoli prethodne godine te približno 1.200 puta veća nego 1998. godine (*Franić et al., 2000., Lokobauer et al., 1998.*).

Od 1986. do 1995. godine specifične aktivnosti ^{137}Cs u sjeverozapadnoj Hrvatskoj i u Zagrebu smanjivale su se eksponencijalno što je pokazano izradom regresijskih analiza za dobivene podatke. Specifične aktivnosti berilija ^7Be nisu pokazale niti pad niti porast u promatranom razdoblju od 1983. do 1995. godine iako su u pojedinim godinama postojali skokovi i padovi njihovih vrijednosti što se odrazilo na njihove relativno velike standardne devijacije (*Cesar i Senčar, 1996.*). Razlike navedenih prosječnih vrijednosti nisu bile statistički značajne.

Da bi se utvrdio utjecaj ^{137}Cs i ^7Be na okoliš izračunati su postoci njihovih specifičnih aktivnosti u odnosu na propisom dopuštenu izvedenu koncentraciju u zraku. Vrijednosti za ^{137}Cs i ^7Be od 1983. do 1995. godine manje su od 0,001 %, uz iznimku za ^{137}Cs u 1986. godini s manje od 0,8 % u oba mjesta uzorkovanja i 1987. godine u Zagrebu s 0,002 %. Ovi podaci pokazuju da niti u sjeverozapadnoj Hrvatskoj niti u Zagrebu nisu specifične aktivnosti ^{137}Cs i ^7Be bile veće od dopuštenih, čak su uvijek bile manje od 1 % dopuštene vrijednosti. Zbog toga je provedeno testiranje značajnosti razlika između vrijednosti radioaktivnosti uzoraka zraka uzorkovanih u navedena dva mjesta za svaki radionuklid posebno i za svaku godinu (*Cesar i Senčar, 1996.*). Testiranje je pokazalo da ne postoje statistički značajne razlike. Posljedično, nakon nuklearne katastrofe u Černobilu (1311 koji ima vrijeme poluraspada od svega 8,06 dana bio je u okolišu prisutan oko dva mjeseca, dok se cezij 134 (^{134}Cs); (vrijeme poluraspada 2,06 godine) u uzorcima iz okoliša još mogao detektirati i sredinom 1990-ih godina (*Franić et al., 2000.*).

Izješće Regionalne agencije za prevenciju i zaštitu okoliša regije Veneto u Italiji (regije koja je tek blago ugrožena padalinama 1986.) otkrilo je do 0,12 Bq/l koncentracije ^{137}Cs u mlijeku, 0,36 Bq/kg u govedini, 0,14 Bq/kg u povrću, 12 Bq/kg u gljivama, 2,9 Bq/kg u jagodama i 1,8 Bq/kg u borovnicama. Bjelorusija, Rusija i Ukrajina bile su najteže ugrožene zemlje; one su primile 30 %, 23 %, odnosno 18 % procijenjenog taloženja ^{137}Cs iz nuklearne nesreće (*Marino i Nunziata, 2018.*). Međutim, u mnogim drugim europskim zemljama, uključujući Finsku, Švedsku, Rumunjsku, Njemačku i Austriju također su zabilježene visoke razine koncentracije ^{137}Cs (*Alinaghizadeh et al., 2016, Auvinen et al., 2014., Kurttio et al., 2013.*). Područje Bosne i Hercegovine bilo je kontaminirano radioaktivnim tvarima putem globalnih disperzijskih procesa u razdoblju od svibnja 1986. godine, kao izravna posljedica emisije iz nuklearne elektrane "Lenjin" u Černobilu. Određivana je specifična radioaktivnost uranijem-238 (^{238}U), radijem-226 (^{226}Ra), olovom-210 (^{210}Pb), torijem-232 (^{232}Th), kalijem-40 (^{40}K) i ^{137}Cs . Uzorci tla uzeti su s devet lokacija u gradu Sarajevu i njegovoj okolici. Meteorološke prilike u tom razdoblju su uzrokovale neravnomjernu radiokonta-

minaciju tla te su pojedine regije u znatnoj mjeri, a neke samo neznatno, kontaminirane radioaktivnim materijalom (*Huremović et al., 2009.*). Trideset i sedam uzoraka zemlje prikupljeno je s dvadeset dvije lokacije na području Federacije Bosne i Hercegovine u 2003. godini. Povišene vrijednosti ^{137}Cs u uzorcima s Jahorine i Bjelašnice su najvjerojatnije posljedica mikroklimatskih uvjeta koji su vladali u vrijeme Černobilske nesreće nad tim područjem (*Deljković et al., 2005.*).

Zbog mehanizma nastanka (dugotrajno ozračivanje nuklearnog goriva) ^{134}Cs nije bio prisutan u atmosferi nakon atmosferskih pokusa nuklearnog oružja budući da se nuklearne eksplozije zbivaju u djeliću milisekunde. Stoga je prisutnost ^{134}Cs u okolišu ujedno i indikator uzroka radioaktivne kontaminacije (havarija nuklearnog reaktora ili pokusi nuklearnog oružja); (*Franić et al., 2000., Prāvālie, 2014., Barišić et al., 2005., Ruff, 2022.*). Radioaktivna kontaminacija cisternskih voda stroncijem 90 (^{90}Sr), ^{134}Cs i ^{137}Cs mjeri se od 1968. godine duž hrvatske obale Jadranskog mora (*Franić et al., 1992.*). Poslije nuklearne nesreće u Černobilu došlo je do značajnog porasta radioaktivnosti cisternskih voda. Od 1963. do 1986. koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u površinskim vodama Jadranskog mora redovito se smanjivala, dok je nakon nuklearne katastrofe u Černobilu ponovno dosegla vrhunac i otada opada (*Franić i Petrinec, 2006.*). Osobito je opasan ^{90}Sr koji je kemijski sličan kalciju pa ga ljudski organizam lako resorbira (*Klapec, 2010., Franić et al., 1992.*).

Černobilska nesreća nije u Hrvatskoj prouzročila značajnije povećanje koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u većini uzoraka iz okoliša. Za razliku od atmosferskih pokusa nuklearnog oružja, radionuklidi podrijetlom iz nuklearne katastrofe u Černobilu nisu se izravno oslobodili u atmosferu. Zbog samog mehanizma ispuštanja (produženo ispuštanje pod utjecajem požara) i prevladavajućih meteoroloških prilika, manje hlapljivi radioaktivni materijali (primjerice ^{90}Sr) nataložili su se bliže samom mjestu nesreće od hlapljivijih komponenta. Stoga je ^{90}Sr samo u manjim količinama bio podvrgnut globalnim disperzijskim procesima te se nataložio na površinu Zemlje u vremenu od nekoliko dana do nekoliko tjedana nakon nesreće (*Franić et al., 2000.*).

Za razliku od Zagreba, u kojem je u svibnju 1986. godine izmjerena deponirana aktivnost od 191 Bq/m^2 , u Zadru nije zabilježen porast aktivnosti ^{90}Sr . To je u skladu s činjenicom da središnja Hrvatska, pa tako ni dalmatinska obala, nije bila zahvaćena radioaktivnim materijalom iz Černobilskog reaktora. U kolovozu 1986. ta se vrijednost u Zagrebu smanjila na $1,8 \text{ Bq/m}^2$, a u studenome na samo $0,1 \text{ Bq/m}^2$, tako da je ukupna godišnja depozicija ^{90}Sr godine 1986. u Zagrebu iznosila tek oko 193 Bq/m^2 (*Franić et al., 2000.*). Prisutnost ^{90}Sr u oborinama grada Zagreba u razdoblju 1962.-1967. godine bila je osam puta manja uspoređujući s razdobljem 1968.-1993. godine (*Franić, 1994.*). Koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku i oborinama grada Zagreba u razdoblju 1994.-2003. godine pokazala je tendenciju opadanja (*Maračić et al., 2005.*). Osim ^{137}Cs i ^{90}Sr , u svibnju 1986. značajni radionuklidi bili su još ^{134}Cs i ^{131}I . Na zagrebačkom području za depoziciju ^{134}Cs izmjerena je vrijednost od 31 kBq/m^2 te također ista vrijednost za ^{131}I (*Franić et al., 2000., Lokobauer et al., 1998.*).

Na područjima ugroženim černobilskom katastrofom, gdje je neizbježna konzumacija kontaminiranih lokalnih poljoprivrednih proizvoda (prvenstveno ^{137}Cs), još i danas provodi se tzv. dekontaminacija toga radioizotopa suplementacijom prehrane pektinima jabuke, ribiza, morske trave, grožđa te se provode i mjere koje reduciraju razine radionuklida u mesu, dodatkom aditiva krmivima (ferocijanidi, zeoliti, mineralne soli); (*Klapec, 2010.*).

POJAVNOST TUMORA ŠTITNJACE - ZEMLJE U OKRUŽENJU

Nesreća u Černobilu rezultirala je ispuštanjem velike količine radionuklida iz oštećenog reaktora u atmosferu, uključujući radiološki značajne kratkoživuće ^{131}I , telur-132 (^{132}Te), ^{133}I i dugoživuće ^{134}Cs i ^{137}Cs . Radioaktivne padaline najviše su bile zastupljene u zemljama u okruženju Ukrajine kao što su Rusija i Bjelorusija.

Radioaktivnim padalinama bile su izložene dvije glavne skupine ljudi: stanovništvo kontaminiranih područja u Bjelorusiji, Ukrajini i Rusiji i radnici za čišćenje koji su prvi reagirali i sudje-

lovali u aktivnostima čišćenja na lokaciji černobilske nuklearne elektrane i u zoni od 30 km oko nuklearne elektrane. Mala su djeca bila među populacijskim skupinama koje su najviše bile ugrožene posljedicama zračenja jer su konzumirali kravlje mlijeko kontaminirano ¹³¹I, dok je unos ¹³¹I s lisnatim povrćem i udahnutim kontaminiranim zrakom imao manju ulogu (Klapec, 2010., Drozdovitch, 2021., Minenko et al., 2020.). Doza zračenja zbog unosa ¹³¹I najveća je za štitnu žlijezdu jer se jod nakuplja u tom organu. Budući da je poluživot ¹³¹I 8,02 dana, izloženost zračenju štitnjače dogodila se tijekom prva dva mjeseca nakon nesreće kada je aktivnost ¹³¹I u okolišu postala zanemariva (Drozdovitch, 2021., Nagayama, 2018.). Oblak je stigao do Italije 30. travnja. Povećana radioaktivnost u okolišu otkrivena je u cijeloj zemlji, pri čemu su najviše razine uočene u sjevernoj Italiji.

U Grčkoj je tijekom razdoblja zabrinutosti nakon nesreće u Černobilu, to jest, tijekom većeg dijela svibnja 1986. godine, umjetno prekinuto 23 % ranih trudnoća te su se takvi postupci nastavili i tijekom cijele 1986. godine tijekom koje je oko 2.500 inače željenih trudnoća prekinuto zbog percepcije visokog rizika od zračenja (Trichopoulos et al., 1987.).

U Švedskoj, kod žena koje su bile trudne u vrijeme nesreće, nije došlo do promjena u stopi spontanih pobačaja ili kongenitalnih malformacija. Jedino je primijećen privremeni porast novorođenčadi niske porođajne težine. Među dojenčadi začetoj nakon nesreće pronađen je blagi porast novorođenčadi s Downovim sindromom u najizloženijim područjima, no ovo se opažanje temelji na malom broju ispitanika. In utero, u vrijeme nesreće, troje dojenčadi razvilo je leukemiju (Ericson i Kallen, 1994.).

Porast tumora štitnjače među osobama koje su tijekom djetinjstva i adolescencije bile izložene černobilskim padalinama zabilježen je nekoliko godina nakon nesreće, prvo u Bjelorusiji i Ukrajini, a kasnije i u Rusiji. Niz epidemioloških studija (Drozdovitch, 2021., Brenner et al., 2011., Cahoon et al., 2017., Cardis et al., 2005., Kazakov et al., 1992., Tronko et al., 2006., Zablotska et al., 2015.) pokazalo je povećan rizik od tumora štitnjače i drugih bolesti štitnjače povezanih s izloženosti štitnjače radioaktivnom jodu. Rezul-

tati studija provedenih na zahvaćenoj populaciji sugeriraju da je povećanje incidencije tumora štitnjače kod pojedinaca izloženih u djetinjstvu i adolescenciji glavni zdravstveni učinak černobilske katastrofe (Drozdovitch, 2021., Likhtarov et al., 2014., Ostroumova et al., 2013., Skryabin et al., 2010., Zablotska et al., 2011.).

Visoki postotak RET mutacije (koja se povezuje s patogeneom papilarnog karcinoma štitnjače) uočen je u mlađe populacije nakon nuklearne katastrofe u Černobilu u Ukrajini, kao i kod mlađe populacije izložene terapijskom zračenju u djetinjstvu. Veća učestalost ove mutacije povezana je i s povećanom stopom metastaza u limfnim čvorovima (Collins et al., 2002., Punda et al., 2018., Rabes et al., 2000.). Černobil je pokazao da ¹³¹I oslobođen u nuklearnoj nesreći može uzrokovati razvoj malignih čvorova na štitnjači kod djece u radijusu od 483 kilometara od incidenta (Braverman et al., 2014.).

Studija (Nikiforov i Gnepp, 1994.) koja je rađena kod djece iz Bjelorusije od 5 do 14 godina života oboljele od tumora štitnjače nakon Černobilske katastrofe pokazala je kratku latenciju tumora. Mikroskopski, ti tumori obično su bili agresivni s invazijom u susjedna meka tkiva (89 %) i metastaze u cervikalne limfne čvorove (88 %). Papilarni tumor dijagnosticiran je u 99 % slučajeva.

Jedna od studija (Drozd et al., 2018.) u Bjelorusiji nakon Černobila pokazala je da su djeca u područjima s visokim koncentracijama nitrata u vodi za piće imala značajno veću incidenciju raka štitnjače nakon zračenja nego njihovi kolege u područjima s nižim koncentracijama nitrata. Kada je unos nitrata povećan, zračenje žlijezda slinovnica može potencijalno rezultirati kancerogenim povećanjem koncentracije dušikovog oksida u plazmi.

U Rumunjskoj je proučavano više čimbenika koji su imali važnu ulogu u sve većem broju slučajeva tumora štitnjače, kao što su: bolja dijagnostika, incidencija, mikrotumori i izloženost zračenju. Kao posljedica toga, bilo je teško izmjeriti utjecaj nuklearnih padalina iz Černobila na pojavnost tumora štitnjače (Gabora et al., 2018.). Zaključili su da je učestalost tumora štitnjače u porastu zbog boljih dijagnostičkih tehnika i izloženosti okolišnim i genetskim čimbenicima. Ovaj

zaključak osobito se odnosi na pedijatrijske pacijente, gdje se čini da postoje uvjerljivi dokazi o tumoru štitnjače povezanim sa zračenjem, dok kod odraslih pacijenata rastuća učestalost isključivo zbog nuklearnih padalina nije tako jasna. Gabora et al. (2018.) navode da se moraju provesti daljnja istraživanja o ovom pitanju kako bi se jasno vidio utjecaj zračenja na učestalost tumora štitnjače.

Studija Ozdemir et al. (2012.) koja je rađena u Turskoj gdje su uspoređivali pacijente koji su oboljeli od tumora štitnjače između 1990. i 2007. godine s onima koji su oboljeli od tumora štitnjače između 1970. i 1990. godine pokazala je da se učestalost papilarnog tumora štitnjače povećala, a učestalost folikularnog i anaplastičnog tumora štitnjače smanjila u razdoblju koje bi moglo biti pod utjecajem černobilskih padalina u području s umjerenim nedostatkom joda.

U Bjelorusiji, Italiji i Francuskoj pokazalo se da su papilarni tumori štitnjače činili većinu tumora štitnjače pronađenih u obje skupine djece, ali je udio ovog histotipa bio jasno veći u Bjelorusiji nego u Italiji i Francuskoj, dok je obrnuto vrijedilo za folikularne tumore. Visoka prevalencija papilarnih tumora u djece u Bjelorusiji posljedica je vanjskog zračenja regija glave i vrata. U usporedbi sa zapadnoeuropskom skupinom djece, u Bjelorusiji se pokazalo češće ekstrapireoidno širenje tumora na okolna tkiva (Pacini et al., 1997.).

Studija Živaljević et al. (2007.) koju su radili u Beogradu u razdoblju od 1993. do 2002. godine pokazala je da je smrtnost od raka štitnjače činila 0,09 % svih smrti (0,12 % u žena i 0,06 % u muškaraca) te 0,42 % smrti od raka (0,59 % u žena i 0,28 % u muškaraca). Rezultati ukazuju da je stopa smrtnosti od raka štitnjače u Beogradu bila niska te da je viša u žena nego u muškaraca.

Također, to je u skladu s rezultatima studije (Bandurska-Stankiewicz et al., 2010.) o stopama incidencije tumora štitnjače koja je provedena u pokrajini Olsztyn u Poljskoj od 1. siječnja 1994. do 31. prosinca 2003. Navedena studija ukazuje da černobilska katastrofa nije imala utjecaj na stopu incidencije tumora štitnjače u pokrajini Olsztyn te da je profilaksa jodom pomoću Lugolove otopine mogla utjecati na izostanak značajnog porasta incidencije tumora štitnjače u dobnoj skupini od 1 do 18 godine života.

HRVATSKA - POJAVNOST TUMORA ŠTITNJAČE

Geografska distribucija depozicije radio-joda, histološki nalazi parenhima u okolišu tumora štitne žlijezde učinjeni prije i poslije katastrofe u Černobilu te značajan porast broja tumora štitne žlijezde u rizičnim skupinama upućivali su na černobilsku katastrofu kao mogući razlog porasta incidencije tumora štitne žlijezde u Republici Hrvatskoj (Radetić et al., 2007.). Međutim, razina ionizirajućeg zračenja u Hrvatskoj kao posljedica černobilske katastrofe bila je niska, a jedna profilaksa koja je uvedena u Hrvatskoj 1953. godine dodatno je smanjila dozu radioaktivnog zračenja na štitnjaču (Jukić et al., 2007.). Studija koja je rađena u Hrvatskoj u razdoblju od 1988. do 2010. godine pokazala je porast incidencije karcinoma štitnjače zbog statistički značajnog porasta broja papilarnih karcinoma uz stalan i umjeren pad smrtnosti kod žena te uz statistički neznačajan pad smrtnosti kod muškaraca (Vučemilo et al., 2015.).

Djeca koja su tijekom razdoblja nuklearne katastrofe u Černobilu mogla biti izložena povećanim dozama, često su bila predmetom znanstvenih istraživanja u razdoblju od 1986. pa sve do današnjih dana, posebno zbog moguće pojave tumora štitnjače.

U razdoblju 1976.-1985. zabilježeno je sedmero novooboljele djece u Hrvatskoj, a nakon Černobila njih 9 u razdoblju 1986.-1995. te 12 u razdoblju 1996.-2004. Prosječna incidencija tumora štitnjače porasla je s 2,5 % na 6,9 % na 100.000 djece. Prema navedenim podacima smatra se da u Hrvatskoj nije došlo do porasta tumora štitnjače u djece nakon nuklearne nesreće u Černobilu, odnosno da je broj novooboljele djece ostao izrazito nizak i nakon nesreće u Černobilu. Naime, smatra se kako je ovaj porast ukupne incidencije karcinoma štitnjače u Hrvatskoj povezan s poboljšanom dijagnostikom (Jukić et al., 2007.). Međutim, studija Radetića et al. (2007.) koja je provedena u Republici Hrvatskoj pokazala je nalaz autoimunog tireoiditisa, benignih nodula i adenoma u okolini tumora što je karakteristično za "černobilski" tumor štitne žlijezde te je učestalost tumora štitne žlijezde nakon vremena latencije u onih rođenih između 1966. i 1986. godine

značajno narasla spram ostalih dobnih skupina, što upućuje na černobilsku katastrofu kao mogući razlog porasta incidencije tumora štitne žlijezde u Republici Hrvatskoj.

Međutim, studija Demirovića et al. (2007.) koja je obavljena u KB "Sestre Milosrdnice" u Zagrebu u razdoblju od 1980. do 2006. godine ukazala je na porast papilarnog tumora, dok se učestalost folikularnog i anaplastičnog tumora smanjila.

Prema studiji Mulića et al. (2007.) koja je provedena u Splitsko-dalmatinskoj županiji u razdoblju od 1997.-2006. pokazala je da je stopa učestalosti tumora štitnjače porasla za 11,5 % te da je češća u žena nego u muškaraca.

Studija Punde et al. (2018.) koja je provedena u KBC-u Split uključivala je 180 pacijenata operiranih zbog papilarnog tumora štitnjače u razdoblju od siječnja 1999. do prosinca 2001. godine pokazala je da izloženost zračenju nakon Černobilske katastrofe nije pridonijela povećanoj učestalosti papilarnog tumora u populaciji. Doprinos povećanoj incidenciji papilarnog tumora u našoj populaciji vjerojatno je zbog različitih čimbenika kao što su bolji dijagnostički postupci i sofisticiranija medicinska tehnologija.

Prema studiji Lacića et al. (2007.) koja je provedena u KB "Sestre Milosrdnice" u Zagrebu u bolesnika s različitim bolestima štitnjače ukazala je da ultrazvuk štitnjače s kolor Dopplerom i ciljane citološka punkcija znatno unapređuju ranu dijagnostiku kako tumora tako i drugih bolesti štitnjače.

Međutim, studija Jukića et al. (2007.) koja je obavljena u KB "Sestre Milosrdnice" u Zagrebu u razdoblju 1968.-2004. godine ukazala je na značajno smanjenje veličine novootkrivenog diferenciranog tumora štitnjače uz porast incidencije papilarnih mikrotumora štitnjače što upućuje na poboljšanu dijagnostiku i citološku punkciju malih nepalpabilnih čvorova.

ZAKLJUČAK

Radionuklidi u okolišu mogu ozbiljno naštetiti ljudskom zdravlju u trenutku kada se katastrofa događa, ali i u vremenu koje slijedi pa i imati

utjecaj na buduće generacije zbog kumulativnih učinaka.

Posljedice nuklearne katastrofe u Černobilu i povezanih povećanja u incidenciji tumora štitnjače istraživane su u nizu zemalja. U Hrvatskoj podaci nisu pokazali nedvojbeno povezanost tumora štitnjače u rizične populacije (generacije rođene 1966. do 1986.) nakon nuklearne katastrofe u Černobilu. Istraživanja koja su provedena u Europi ukazuju na pojavnost tumora štitnjače kao posljedicu okolišnih i genetskih čimbenika, nedovoljnog unosa joda, ali i bolje dijagnostike. Istraživanja provedena na području bivšeg SSSR-a ukazuju na pojavnost tumora štitnjače, posebno papilarnog tipa, u djece kao izravnu posljedicu nuklearne katastrofe u Černobilu, ali i nedovoljnog unosa joda.

Iako trendovi u svijetu ukazuju na značajan porast broja novooboljelih od tumora štitnjače, oko 5 % godišnje u posljednjih 20 godina, ipak se veliki dio porasta broja novooboljelih pripisuje boljoj dijagnostici i češćim ultrazvučnim pregledima štitnjače.

LITERATURA

Alinaghizadeh, H., Wålander, R., Vingård, E., Tondel M.: Total cancer incidence in relation to ¹³⁷Cs fallout in the most contaminated counties in Sweden after the Chernobyl nuclear power plant accident: a register-based study, *BMJ Open*, 6, 2016., 12.

Auvinen, A., Seppä, K., Pasanen, K., Kurttio, P., Patama, T., Pukkala, E. et al.: Chernobyl fallout and cancer incidence in Finland, *Int J Cancer*, 134, 2014., 9, 2253-2263.

Bandurska-Stankiewicz, E., Aksamit-Białoszewska, E., Stankiewicz, A., Shafie, D.: Did the Chernobyl atomic plant accident have an influence on the incidence of thyroid carcinoma in the province of Olsztyn?, *Endokrynol Pol*, 61, 2010., 5, 437-442.

Barišić, D., Lovrenčić, I., Oreščanin, V., Kezić, N., Bubalo, D., Popijač, M. et al.: Med kao bioindikator kontaminacije okoliša cezijem, *VI. simpozij Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja*, 2005., 395-398.

Becker, D. V., Zanzonico, P.: Potassium Iodide for Thyroid Blockade in a Reactor Accident: Administrative Policies That Govern Its Use, *Thyroid*, 7, 2009., 2, 193-197.

Bell, J. N., Shaw, G.: Ecological lessons from the Chernobyl accident, *Environ Int*, 2005., 6, 771-777.

Beresford, N. A., Fesenko, S., Konoplev, A., Skuterud, L., Smith, J. T., Voigt, G.: Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt?, *J Environ Radioact*, 157, 2016., 77-89.

Braverman, ER., Blum, K., Loeffke, B., Baker, R., Kreuk, F., Yang, SP., Hurley, J. R.: Managing terrorism or accidental nuclear errors, preparing for iodine-131 emergencies: a comprehensive review, *Int J Environ Res Public Health*, 11, 2014., 4, 4158-4200.

Brenner, A. V., Tronko, M. D., Hatch, M., Bogdanova, T. I., Oliynik, V. A., Lubin, J. H. et al.: I-131 dose response for incident thyroid cancers in Ukraine related to the Chornobyl accident, *Environ Health Perspect*, 119, 2011., 7, 933-939.

Cahoon, E. K., Nadyrov, E. A., Polyanskaya, O. N., Yauseyenko, V. V., Veyalkin I. V., Yeudachkova, T. I. et al.: Risk of Thyroid Nodules in Residents of Belarus Exposed to Chernobyl Fallout as Children and Adolescents, *J Clin Endocrinol Metab*, 102, 2017., 7, 2207-2217.

Cardis, E., Kesminiene, A., Ivanov, V., Malakhova, I., Shibata, Y., Khrouch, V.: Risk of thyroid cancer after exposure to 131I in childhood, *J Natl Cancer Inst*, 97, 2005., 10, 724-732.

Caudill, C. M., Zhu, Z., Ciampi, R., Stringer, J. R., Nikiforov, Y. E.: Dose-dependent generation of RET/PTC in human thyroid cells after in vitro exposure to gamma-radiation: a model of carcinogenic chromosomal rearrangement induced by ionizing radiation, *J Clin Endocrinol Metab*, 90, 2005., 4, 2364-2369.

Cesar, D., Senčar, J.: *Prisutnost Cezija-137 i Berilija-7 u zraku sjeverozapadne hrvatske i u Zagrebu od 1983. do 1995. godine*. 3. simpozij Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 1996. Dostupno na: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/615062>. Pristupljeno 14.4.2023.

Collins, B. J., Chiappetta, G., Schneider, A. B., Santoro, M., Pentimalli, F., Fogelfeld, L. et al.: RET expression in papillary thyroid cancer from patients irradiated in childhood for benign conditions, *J Clin Endocrinol Metab*, 87, 2002., 8, 3941-3946.

Davies, L., Welch, H. G.: Increasing Incidence of Thyroid Cancer in the United States, 1973-2002, *JAMA*, 295, 2006., 18, 2164-2167.

Deljković, D., Vidic, A., Marić, S., Ilić, Z., Sirko, D.: Radioaktivnost u uzorcima zemlje na području FBiH. VI. simpozij Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 2005., 358-62. Dostupno na: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/052/36052838.pdf. Pristupljeno 6.6.2023.

Demirović, A., Radulović, P., Vučić, M., Čučić, H., Kusić, Z., Belicza, M.: Učestalost i epidemiološke značajke različitih histoloških tipova karcinoma štitnjače u razdoblju 1980.-2006, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., Suppl. 2, 109-110.

Drozd, V. M., Branovan, I., Shiglik, N., Biko, J., Reiners, C.: Thyroid Cancer Induction: Nitrates as Independent Risk Factors or Risk Modulators after Radiation Exposure, with a Focus on the Chernobyl Accident, *Eur Thyroid J*, 7, 2018., 2, 67-74.

Drozdovitch, V.: Radiation Exposure to the Thyroid After the Chernobyl Accident, *Front Endocrinol (Lausanne)*, 11, 2021., 569041.

Duffy Jr, B. J., Fitzgerald, P. J.: Thyroid cancer in childhood and adolescence, A report on twenty-eight cases, *Cancer*, 3, 1950., 6, 1018-1032.

Ericson, A., Kallen, B.: (1994) Pregnancy Outcome in Sweden After the Chernobyl, *Accident. Environ. Res.* 67, 1994., 2, 149-159.

Franić, Z., Maračić, M., Bauman, A.: Radioaktivna kontaminacija cisternskih voda duž hrvatske obale Jadranskog mora, *Arh Hig Rada Toksikol*, 43, 1992., 4, 329.

Franić, Z.: 137Cs u radioaktivnim oborinama u Zagrebu, *Hrv meteor časopis*, 27, 1992., 27, 63-68.

Franić, Z., Marović, G., Lokobauer, N., Prlić, I.: Radioaktivnost u biosferi i u profesionalnoj izloženosti u nas, *Arh Hig Rada Toksikol*, 51, 2000., Suppl., 103-114.

Franić, Z.: Analiza distribucije i srednje vrijeme boravka ^{90}Sr u mokrom radioaktivnom taloženju u Zagrebu, *Hrv Meteor Časopis*, 29, 1994., 25-30.

Franić, Z., Petrinec, B.: Marine radioecology and waste management in the Adriatic, *Arh Hig Rada Toksikol*, 57, 2006., 347-52.

Furukawa, K., Preston, D., Funamoto, S., Yonehara, S., Ito, M., Tokuoka, S. et al.: Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure, *Int J Cancer*, 132, 2013, 5, 1222-1226.

Gábora, K., Bărbuş, E., Peştean, C., Larg, M. I., Bonci, E. A., Bădulescu, C. I. et al.: Radiation induced thyroid carcinoma in Romania - effects of the Chernobyl fallout, a systematic review of observational studies, *Clujul Med*, 91, 2018., 4, 372-375.

Hao, W. M., Baker, S., Lincoln, E., Hudson, S., Lee, S. D., Lemieux, P.: (2018) Cesium emissions from laboratory fires, *J Air Waste Manag Assoc*, 68, 2018., 11, 1211-1223.

Haymart, M. R., Banerjee, M., Reyes-Gastelum, D., Caoili, E., Norton, E. C.: (2019) Thyroid Ultrasound and the Increase in Diagnosis of Low-Risk Thyroid Cancer, *J Clin Endocrinol Metab*, 104, 2019., 3, 785-792.

Hejl, A. M., Ottmar, R. D., Timothy Jannik, G., Eddy, T. P., Rathbun, S. L., Commodore, A. A. et al.: Radionuclide activity concentrations in forest surface fuels at the Savannah River Site, *J Environ Manage*, 115, 2013., 217-226.

Hojker, S.: Epidemiologija raka štitnjače, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., 3-Suppl. 2, 12.

HZJZ - Hrvatski zavod za javno zdravstvo (2022) Svjetski dan štitnjače - 25. svibnja 2022. Dostupno na: <https://www.hzjz.hr/sluzba-epidemiologija-prevenција-nezaraznih-bolesti/svjetski-dan-stitnjace-25-svibnja-2022/> Pristupljeno 25.05.2023.

Huremović, J., Horvat, M., Ruždić, E., Jaćimović, R.: Istraživanje radiokontaminacije grada Sarajeva i njegove okolice s obzirom na radionuklide, *Kem Ind*, 58, 2009., 4, 165-169.

Iglesias, M. L., Schmidt, A., Ghuzlan, A. A., Lacroix, L., Vathaire, F., Chevillard, S. et al.: Radiation exposure and thyroid cancer: a review, *Arch Endocrinol Metab*, 61, 2017., 2, 180-187.

IAEA - International Atomic Energy Agency (2011) Fukushima Nuclear Accident Update-Log. Updates of 12 April 2011. Dostupno na: <https://www.iaea.org/newscenter/news/fukushima-nuclear-accident-update-log-15>. Pristupljeno 13.5.2023.

IAEA - International Atomic Energy Agency (2006a) Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum: 2003-2005. 2:1-57. Dostupno na: <https://www.iaea.org/sites/default/files/chernobyl.pdf>. Pristupljeno 25.05.2023.

IAEA - International Atomic Energy Agency (2006b) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Radiological Assessment Reports Series. Report of the Chernobyl Forum Expert Group "Environment". Vienna. Dostupno na: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf. Pristupljeno 13.05.2023.

Jukić, T., Dabelić, N., Kusić, Z.: Unos joda i rak štitnjače, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., 3-Suppl. 2, 20.

Jukić, T., Dabelić, N., Prpić, M., Znaor, A., Sonicki, Z., Kusić, Z.: Incidencija i smrtnost od karcinoma štitnjače u Hrvatskoj 1968.-2004, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., 3-Suppl. 2, 116-117.

Jukić, T., Dabelić, N., Prpić, M., Salopek, D., Znaor, A., Kusić, Z.: Černobil nije uzrokovao porast karcinoma štitnjače u djece u Hrvatskoj, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., 3-Suppl. 2, 118-119.

Kazakov, V. S., Demidchik, E. P., Astakhova, L. N.: Thyroid cancer after Chernobyl, *Nature*, 359, 1992., 6390, 21.

Kikuchi, S., Perrier, N. D., Ituarte, P., Siperstein, A. E., Duh, Q. Y., Clark, O. H.: Latency period of thyroid neoplasia after radiation exposure, *Ann Surg*, 239, 2004., 4, 536-543.

Kitahara, C. M., Schneider, A. B.: Epidemiology of Thyroid Cancer, *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, 31, 2022., 7, 1284-1297.

Klapec, T.: *Kemijske i fizikalne opasnosti u hrani*, Hrvatska Agencija za hranu, Osijek, 2010.

Kurttio, P., Seppä, K., Pasanen, K., Patama, T., Auvinen, A., Pukkala, E. et al.: Fallout from the Chernobyl accident and overall cancer incidence in Finland, *Cancer Epidemiol*, 37, 2013., 5, 585-592.

Lacić, M., Gregurić-Mateša, S., Barišić-Šmalcelj, M., Ivkić, M.: Kolor Doppler, ultrazvučno vođena citološka punkcija i laboratorijski testovi u procjeni bolesti štitnjače, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., Suppl. 2, 123-124.

Land, C. E., Bouville, A., Apostoaei, I., Simon, S. L.: Projected lifetime cancer risks from exposure to regional radioactive fallout in the Marshall Islands, *Health Phys*, 99, 2010., 2, 201-215.

LeClair, K., Bell, K. J. L., Furuya-Kanamori, L., Doi, S. A., Francis, D. O., Davies, L.: Evaluation of Gender Inequity in Thyroid Cancer Diagnosis: Differences by Sex in US Thyroid Cancer Incidence Compared With a Meta-analysis of Subclinical Thyroid Cancer Rates at Autopsy, *JAMA Intern Med*, 181, 2021., 10, 1351-1358.

Likhtarov, I., Kovgan, L., Masiuk, S., Talerko, M., Chepurny, M., Ivanova, O. et al.: Thyroid cancer study among Ukrainian children exposed to radiation after the Chornobyl accident: improved estimates of the thyroid doses to the cohort members, *Health Phys*, 106, 2014., 3, 370-396.

Lokobauer, N., Franić, Z., Bauman, A., Maračić, M., Cesar, D., Senčar, J.: Radiation contamination after the Chernobyl nuclear accident and the effective dose received by the population of Croatia, *J Environ Radioact*, 41, 1998., 2, 137-146.

Maračić, M., Lokobauer, N., Franić, Z.: *Koncentracije aktivnosti 90Sr u mlijeku i oborinama grada Zagreba*. VI simpozij HDZZ, 2005., 271-5. Dostupno na: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20606836>. Pristupljeno 04.06.2023.

Marino, F., Nunziata, L.: Long-Term Consequences of the Chernobyl Radioactive Fallout: An Exploration of the Aggregate Data, *Milbank Q*, 96, 2018., 4, 814-857.

Minenko, V., Viarenich, K., Zhukova, O., Kulkhta, T., Podgaiskaya, M., Khrutchinsky, A. et al.: Activity concentrations of 131I and other radionuclides in cow's milk in Belarus during the first

month following the Chernobyl accident, *J Environ Radioact*, 220-221, 2020., 106264.

Mulić, R., Poljak, K., Radović, D., Sunara, D., Čolović, Z.: Povećana učestalost karcinoma štitnjače u Splitsko-dalmatinskoj županiji: Epidemiološke značajke, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., Suppl. 2, 129.

Nagayama, Y.: Radiation-related thyroid autoimmunity and dysfunction, *J Radiat Res*, 59, 2018., suppl_2, ii98-ii107.

Nikiforov, Y., Gnepp, D. R.: Pediatric thyroid cancer after the Chernobyl disaster. Pathomorphologic study of 84 cases (1991-1992) from the Republic of Belarus, *Cancer*, 74, 1994., 2, 748-766.

Ostroumova, E., Rozhko, A., Hatch, M., Furukawa, K., Polyanskaya, O., McConnell, R. J.: Measures of thyroid function among Belarusian children and adolescents exposed to iodine-131 from the accident at the Chernobyl nuclear plant, *Environ Health Perspect*, 121, 2013., 7, 865-871.

Ozdemir, D., Dagdelen, S., Kiratli, P., Tuncel, M., Erbas, B., Erbas, T.: Changing clinical characteristics of thyroid carcinoma at a single center from Turkey: before and after the Chernobyl disaster, *Minerva Endocrinol*, 37, 2012., 3, 267-274.

Pacini, F., Vorontsova, T., Demidchik, E. P., Molinaro, E., Agate, L., Romei, C. et al.: Post-Chernobyl thyroid carcinoma in Belarus children and adolescents: comparison with naturally occurring thyroid carcinoma in Italy and France, *J Clin Endocrinol Metab*, 82, 1997., 11, 3563-3569.

Petrinec, B., Franić, Z.: *Radiocezij u neobrađenom tlu na nekim lokacijama u Republici Hrvatskoj*. VI simpozij Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 2005., 345-9. Dostupno na: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20606848>. Pristupljeno 06.06.2023.

Právělie, R.: Nuclear weapons tests and environmental consequences: a global perspective, *Ambio*, 43, 2014., 6, 729-744.

Punda, A., Bedeković, V., Barić, A., Kontić, M., Čolović, Z., Vanjaka Rogošić, L. et al.: Ret expression and its correlation with clinicopathologic data in papillary thyroid carcinoma, *Acta Clin Croat*, 57, 2018., 4, 646-652.

Rabes, H. M., Demidchik, E. P., Sidorow, J. D., Lengfelder, E., Beimfohr, C., Hoelzel, D. et al.: Pattern of Radiation-induced RET and NTRK1 Rearrangements in 191 Post-Chernobyl Papillary Thyroid Carcinomas: Biological, Phenotypic, and Clinical Implications, *Clin Cancer Res*, 6, 2000., 3, 1093-1103.

Radetić, M., Kovačić, M., Parazajder, D., Radetić, M., Raguž, I.: Porast incidencije karcinoma štitnjače u Republici Hrvatskoj - Černobil da ili ne?, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., 3-Suppl. 2, 136-137.

Ruff, T. A.: Ending nuclear weapons before they end us: current challenges and paths to avoiding a public health catastrophe, *J Public Health Policy*, 43, 2022., 1, 5-17.

Salbu, B., Lind, O. C.: Radioactive particles released from various nuclear sources, *Radiopro*, 40, 2005., Suppl. 1, 27-32.

Shakhtarin, V. V., Tsyb, A. F., Stepanenko, V. F., Orlov, M. Y., Kopecky, K. J., Davis, S.: Iodine deficiency, radiation dose, and the risk of thyroid cancer among children and adolescents in the Bryansk region of Russia following the Chernobyl power station accident, *Int J Epidemiol*, 32, 2003., 4, 584-591.

Skryabin, A. M., Drozdovitch, V., Belsky, Y., Le-shcheva, S. V., Mirkhaidarov, A. K., Voillequé, P. et al.: Thyroid mass in children and adolescents living in the most exposed areas to Chernobyl fallout in Belarus, *Radiat Prot Dosimetry*, 142, 2010, 2-4, 292-299.

Sturko, Lj.: (2021) Etičnost ljudskog djelovanja u zaštiti okoliša, *Spectrum*, 54, 2021., 1, 5-56.

Trichopoulos, D., Zavitsanos, X., Koutis, C. et al.: The victims of Chernobyl in Greece: induced abortions after the accident, *Br Med J*, 295, 1987., 6606, 1100.

Tronko, M. D., Howe, G. R., Bogdanova, T. I., Bouville, A. C., Epstein, O. V., Brill, A. B.: A cohort study of thyroid cancer and other thyroid diseases after the chornobyl accident: thyroid cancer in Ukraine detected during first screening, *J Natl Cancer Inst*, 98, 2006., 13, 897-903.

Udelsman, R., Zhang, Y.: The epidemic of thyroid cancer in the United States: the role of endocrinologists and ultrasounds, *Thyroid*, 24, 2014., 3, 472-479.

United States Environmental protection Agency (2023) Radioactive Fallout From Nuclear Weapons Testing. Dostupno na: <https://www.epa.gov/radtown/radioactive-fallout-nuclear-weapons-testing>. Pristupljeno 10.06.2023.

Vučemilo, L., Znaor, T., Kuliš, T., Škerija, M., Znaor, A.: Trendovi u incidenciji i smrtnosti karcinoma štitnjače u Hrvatskoj u razdoblju od 1988. do 2010. godine, *Acta Clin Croat*, 54, 2015., 1, 30-37.

WNA - World Nuclear Association (2019) Sequence of Events-Chernobyl Accident Appendix 1. Dostupno na: <https://world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/appendices/chernobyl-accident-appendix-1-sequence-of-events.aspx>. Pristupljeno 25.05.2023.

Yoschenko, V., Takase, T., Konoplev, A., Namba, K., Onda, Y., Kivva, S. et al.: Radiocesium distribution and fluxes in the typical Cryptomeria japonica forest at the late stage after the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *J Environ Radioact*, 166, 2017., 1, 45-55.

Yoschenko, V. I., Kashparov, V. A., Levchuk, S. E., Glukhovskiy, A. S., Khomutinin, Y. V., Protsak, V. P. et al.: Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process, *J Environ Radioact*, 87, 2006., 3, 260-278.

Zablotska, L. B., Ron, E., Rozhko, A. V., Hatch, M., Polyanskaya, O. N., Brenner, A. V. et al.: Thyroid cancer risk in Belarus among children and adolescents exposed to radioiodine after the Chernobyl accident, *Br J Cancer*, 104, 2011., 1, 181-187.

Zablotska, L. B., Nadyrov, E. A., Polyanskaya, O. N., McConnell, R. J., O'Kane, P., Lubin, J. et al.: Risk of thyroid follicular adenoma among children and adolescents in Belarus exposed to iodine-131 after the Chornobyl accident, *Am J Epidemiol*, 182, 2015., 9, 781-790.

Živaljević, V., Sipetić, S., Grujičić, T., Diklić, A., Paunović, I., Krgović, K. et al.: (2007) Stopa smrtnosti raka štitnjače u Beogradu, Srbija 1993.-2002, *Acta Clin Croat*, 46, 2007., Suppl. 2, 150-151.

THE EFFECTS OF THE CHERNOBYL DISASTER ON THE THYROID TUMORS INCIDENCE IN THE SURROUNDING COUNTRIES

SUMMARY: The 1986 Chernobyl disaster and its consequences related to the incidence of thyroid tumors have been frequently investigated in the past decades. Thyroid tumor is the most common malignant disease of the endocrine system. Risk factors for thyroid tumor include exposure to ionizing radiation, a family history of thyroid tumors, low iodine in the diet, some rare hereditary syndromes, female sex, and low vitamin D levels. Despite the possible exposure to radionuclides after the Chernobyl nuclear disaster, the results of research conducted in Croatia did not show an undeniable link between the incidence of thyroid tumors and exposure to radionuclides after the Chernobyl disaster in individuals who were in the risk group (born between 1966 and 1986). Research conducted in Europe indicate the incidence of thyroid tumors due to environmental and genetic factors, while research conducted in the territory of the former USSR indicates the incidence of thyroid tumors in children as a direct consequence of the nuclear disaster in Chernobyl. Although trends in the world indicate a significant increase in the number of new cases of thyroid tumors, about 5% per year in the last 20 years, a large part of the increase in the number of new cases is attributed to better diagnostics and more frequent thyroid ultrasound examinations..

Key words: Chernobyl, Croatia, ionizing radiation, nuclear disaster, thyroid cancer

*Subject review
Received: 2023-09-10
Accepted: 2024-08-22*