

Radioterapija kod djece

Marta Pekvarić^{1,2}, Velimir Karadža¹

¹ Zdravstveno veleučilište Zagreb

² Klinički bolnički centar Sestre Milosrdnice, Klinika za tumore

Corresponding author: Marta Pekvarić, email: martapekvaric2@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.55378/rv.49.1.8>

Sažetak

Radioterapija u pedijatrijskoj onkologiji donosi specifične izazove i razlike u odnosu na terapiju zračenjem odraslih pacijenata. Djeca su najosjetljivija skupina pacijenata jer su njihovi organi i tkiva i dalje u razvoju, što znači da ionizirajuće zračenje ima puno veći utjecaj i štetnost na zdrava tkiva kod djece nego kod odraslih ljudi.

U pedijatrijskoj onkologiji vrlo često nailazimo na tumore velikih volumena na specifičnim lokalizacijama koji predstavljaju velik izazov u planiranju i provođenju radioterapije. Veliki je rizik zračenja i pojava sekundarnih karcinoma zbog oštećenja zdravog tkiva tijekom liječenja primarnog tumora, a novim metodama taj je rizik moguće smanjiti. Većini djece teško je ili nemoguće objasniti važnost mirovanja tijekom radioterapije, što znači da je većina djece podvrgnuta anesteziji.

Svako dijete i obitelj suočeno s dijagnozom tumora prolazi kroz najteže trenutke života, stoga bi s djecom i njihovim obiteljima trebali raditi stručnjaci specijalizirani u pedijatrijskoj onkologiji i radioterapiji. Djeca se najčešće, tako i u Hrvatskoj, liječe u bolnicama i ustanovama namijenjenima odraslim ljudima.

Kako bi im se olakšao proces liječenja, bitno je objasniti im cijeli proces kroz koji će prolaziti kroz oblik igre i razgovora prilagođenim dobi djeteta. Nakon dijagnoze slijedi priprema i planiranje zračenja, što obavlja liječnik onkolog u dogovoru s radiološkim tehnologom i medicinskim fizičarom. Na kraju slijedi liječenje, odnosno radioterapija, koju provode radiološki/radioterapijski tehnolozi.

Uloga radiološkog/radioterapijskog tehnologa je uputiti, pripremiti i namjestiti dijete u položaj prikladan za zračenje te upravljati uređajem za radioterapiju, linearnim akceleratorom. Današnjim napretkom tehnologije i dolaskom novih metoda liječenja omogućuje se puno bolja isporuka zračenja tumorskom tkivu te puno bolja zaštita okolnog zdravog tkiva.

Ključne riječi: radioterapija, djeca, tumori, zračenje

Uvod

Dječji karcinomi jedan su od vodećih uzroka smrti djece u svijetu. Teško ih je rano otkriti jer često dolaze bez simptoma. Dijagnoza se može postaviti u bilo kojoj dobi, no češća je kod starije djece. Razvojem medicine i radioterapije, sve veći postotak djece preživljava do odrasle dobi (1). Radioterapija može biti vanjska ili unutarnja (brahiterapija). Većina djece prima terapiju vanjskim snopovima 4 do 5 dana tjedno kroz nekoliko tjedana. Male dnevne doze zračenja smanjuju štetu zdravim stanicama, a vikendom se terapija pauzira radi oporavka. Radiološki tehnolog postavlja dijete u pravilan položaj pomoću oznaka i imobilizacije. Roditelji ne smiju biti prisutni u prostoriji tijekom terapije, ali nakon nje su itekako dobrodošli (2). Kasni učinci radioterapije uključuju sekundarne karcinome, probleme rasta, neurokognitivne promjene i hormonalne poremećaje (3). Najčešći dječji karcinomi su leukemija, tumori CNS-a i limfomi, a liječe se terapijom vanjskim snopovima pomoću linearnih akceleratora (4,5).

Tumori dječje dobi

Odrasli obolijevaju od karcinoma često zbog okolišnih faktora, dok je kod djece uzrok često nepoznat. Genetske promjene glavni su uzrok dječjih karcinoma, poput retinoblastoma, a mogu nastati i zbog kromosomskih abnormalnosti (npr. leukemija, limfomi) (6). Najčešći dječji tumori su leukemije, tumori središnjeg živčanog sustava, limfomi, neuroblastomi, Wilmsov tumor te sarkomi kostiju i mekih tkiva (6). Leukemije su najčešće maligne bolesti u djece, a akutna limfoblastična leukemija (ALL) čini 80% svih leukemija. Dijagnoza uključuje biopsiju koštane srži, krvne pretrage, CT, MR i ultrazvuk, a liječenje kemoterapiju, biološku terapiju i transplantaciju koštane srži, dok se radioterapija koristi rijetko. Limfomi se dijele na Hodgkinove i ne-Hodgkinove te se liječe kombinacijom radioterapije, operacije i kemoterapije. Wilmsov tumor liječi se kirurški, kemoterapijom i zračenjem. Osteosarkom se dijagnosticira CT-om, MR-om i biopsijom, a liječi kemoterapijom i operacijom (7). Liječenje dječjih tumora uključuje operaciju,



Slika 1. Protonska terapija

Izvor: IBA (slika je vlasništvo tvrtke Ion Beam Applications S.A.)

kemoterapiju i radioterapiju, pri čemu se najčešće koristi terapija vanjskim snopovima zbog preciznosti i smanjenja nuspojava (8). Radioterapija se najčešće koristi za solidne tumore, dok se za leukemije primjenjuje rjeđe. Napredak tehnologije omogućava smanjenje doze prema zdravom tkivu i nuspojava, čineći radioterapiju sve sigurnijom (9).

Radioterapija vanjskim snopovima i uređaji u radioterapiji

Radioterapija koristi energetske valove ili čestice za liječenje tumora. Može biti vanjska ili unutarnja, a kod djece se najčešće koristi terapija vanjskim snopovima. Cilj je uništiti stanice raka ili spriječiti njihov rast, smanjujući simptome bolesti. Terapija se provodi linearnim akceleratorom, a provodi je radiološki/radioterapijski tehnolog (7). Kod vanjske radioterapije koriste se fotoni ili čestice, najčešće protoni. Fotoni nastaju u linearnom akceleratoru pri udaru elektrona u metalnu metu, pri čemu se emitira ionizirajuće zračenje (10). Elektromagnetski valovi visoke frekvencije, poput rendgenskih i gama zraka, omogućuju prodiranje u tkivo. Rendgenske zrake nastaju ubrzavanjem elektrona u vakuumskim cijevima, dok gama zrake nastaju radioaktivnim raspadom jezgara nestabilnih izotopa (11). Ionizirajuće zračenje prekida dvostruke lance DNA, uzrokujući staničnu smrt tumorskih stanica. Iako utječe i na zdrave stanice, one se lakše obnavljaju. Međutim, loše planiranje može uzrokovati trajna oštećenja i sekundarne karcinome (10). Radiobiološki zahtjevi nalažu precizno doziranje kako bi se maksimiziralo uništenje tumora uz očuvanje zdravog tkiva. Hiperfrakcioniranje omogućuje primjenu višestrukih manjih doza dnevno, čime se smanjuju kasni učinci zračenja i povećava učinkovitost liječenja (10). Vanjska radioterapija koristi se samostalno ili uz operaciju i kemoterapiju. Kada se primjenjuje uz drugu terapiju, naziva se istodobna radioterapija. Ako slijedi

kirurško uklanjanje tumora, to je adjuvantna radioterapija, dok se prije operacije ili kemoterapije naziva neoadjuvantna. Može biti kurativna ili palijativna, za ublažavanje simptoma (12). Napredak u radioterapiji omogućio je bolje ciljanje tumora uz smanjenje oštećenja zdravog tkiva, čime se smanjuje rizik od kasnih učinaka i sekundarnih karcinoma (10). Radioterapija se sastoji od pripreme, planiranja i provođenja terapije. Za planiranje se koriste CT, MR i PET uređaji koji omogućuju preciznu lokalizaciju tumora. Klasični dijagnostički uređaji nisu prilagođeni radioterapiji, pa se koriste CT simulatori s prilagođenim stolom, laserima za pozicioniranje i širim otvorom gantrija. PET-CT kombinira anatomske i funkcionalne informacije o tumoru (13). Za provođenje terapije koristi se linearni akcelerator, složen uređaj koji ubrzava elektrone do visokih energija i stvara fotonski snop za zračenje. Glavne komponente uključuju akceleratorsku cijev, elektronski top, terapijski stol i sustav za praćenje pacijenta. Terapijski stol omogućuje precizno pozicioniranje pacijenta, dok audiovizualni sustav osigurava nadzor tijekom terapije (5). Najpoznatiji proizvođači linearnih akceleratora su Varian, Elekta i Accuray. Njihovi sustavi omogućuju napredne tehnike poput IMRT – radioterapija promjenjivog intenziteta (eng. *Intensity-Modulated Radiation Therapy*), VMAT – lučna terapija promjenjivog intenziteta (eng. *Volumetric Modulated Arc Therapy*), IGRT – slikovno vođena radioterapija (eng. *Image-guided Radiation Therapy*) i SBRT (stereotaksijska radioterapija). Gama nož koristi se za stereotaksijsku radioterapiju, dok spiralna tomoterapija omogućuje kontinuirano zračenje tijekom pomicanja pacijenta (10,14). Protonska terapija veliki je iskorak u liječenju tumora (slika 1.). Njezina najveća prednost je preciznija isporuka doze uz manju štetu okolnom tkivu, odnosno zbog karakteristike Braggova vrha gdje protoni oslobađaju najveću energiju na precizno određenoj dubini unutar tumorskog tkiva. Zbog toga su smanjene nuspojave zračenja i mogućnost pojave sekundarnih karcinoma.

Dodatnu sigurnost i napredak u isporuci zračenja protonima danas pruža slikovno vođena protonska terapija (15,16).

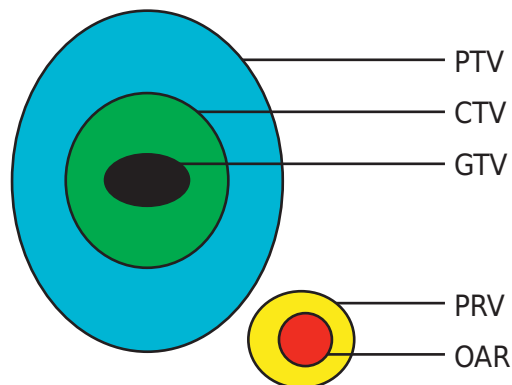
Planiranje i provođenje radioterapije kod djece

Planiranje radioterapije je proces koji uključuje određivanje ključnih parametara terapije za optimalno liječenje pacijenata. Glavni parametri koji se određuju uključuju GTV (volumen makroskopski vidljivog tumora), CTV (klinički volumen koji uključuje subklinički tumor) i PTV (planirani volumen koji uzima u obzir geometrijske varijacije, poput pomaka pacijenta). Osim toga, označavaju se organi u riziku (OAR), koji su posebno osjetljivi na zračenje i smješteni blizu ciljnih volumena. Ako su organi u riziku mali i pomiču se, koristi se PRV (slika 2.) (10). Planiranje obuhvaća oblikovanje tretmana zračenjem, određivanje doze, frakcioniranje i pozicioniranje pacijenta, a radiološki tehnolog prati cijeli proces u suradnji s onkologom i medicinskim fizičarom (13). Računalno potpomognuto planiranje, uključujući virtualnu 3D rekonstrukciju pomoću CT ili MR uređaja, postalo je standard u radioterapiji. Ova tehnologija omogućuje precizno oblikovanje polja zračenja kako bi se zaštitilo zdravo tkivo, dok se ciljano zrači tumor. Planiranje u dječjoj onkologiji mnogo je zahtjevnije nego kod odraslih jer dječja tkiva puno su osjetljivija na zračenje. Osim toga, u djece su česti veći tumori koji zahtijevaju značajne doze zračenja, dok istovremeno treba poštediti rastuće kosti, gonade, mozak i srce (13). Planiranje mora uzeti u obzir i anesteziju za djecu mlađu od 7 godina, budući da je ona često potrebna za precizno postavljanje pacijenta. Također, pri planiranju radioterapije u djece, bitno je razmotriti rizik od nastanka sekundarnih karcinoma uzrokovanih zračenjem. Radioterapija se provodi uz pomoć različitih uređaja, najčešće linearnih akceleratora koji proizvode fotone za zračenje tumora (18). Za svaki dolazak na terapiju, dijete se smješta u isti položaj pomoću malih oznaka ili tetovaža. Za provjeru položaja koristi se uređaj za portalno oslikavanje (EPID) ili uređaj za provjeru kompjutoriziranom tomografijom konusnog snopa (CBCT) koji osigurava da je pacijent u točno istom položaju kao prilikom snimanja CT-a (17). Djeca obično dolaze na terapiju 4 do 5 puta tjedno, a terapija

traje nekoliko tjedana. Uz napredne tehnike poput IMRT-a (Intenzitetom Modulirana Radioterapija), omogućuje se precizno prilagođavanje doze zračenja tumoru, smanjujući oštećenje okolnih zdravih tkiva i nuspojave (19). Stereotaktička radiokirurgija (SRS) i stereotaktička radioterapija tijela (SBRT) omogućuju precizno zračenje u velikim dozama, obično u nekoliko tretmana, dok su IMRT i VMAT namijenjeni za veće tumore s ciljem poštediti zdravog tkiva (20). Slikovno vođena radioterapija (IGRT), koja koristi slike iz rendgenskih ili ultrazvučnih presjeka, omogućuje visoku preciznost postavljanja pacijenta (5). Ove moderne tehnike zahtijevaju stalno nadograđivanje znanja zdravstvenih djelatnika kako bi mogli sigurno provoditi terapiju (21).

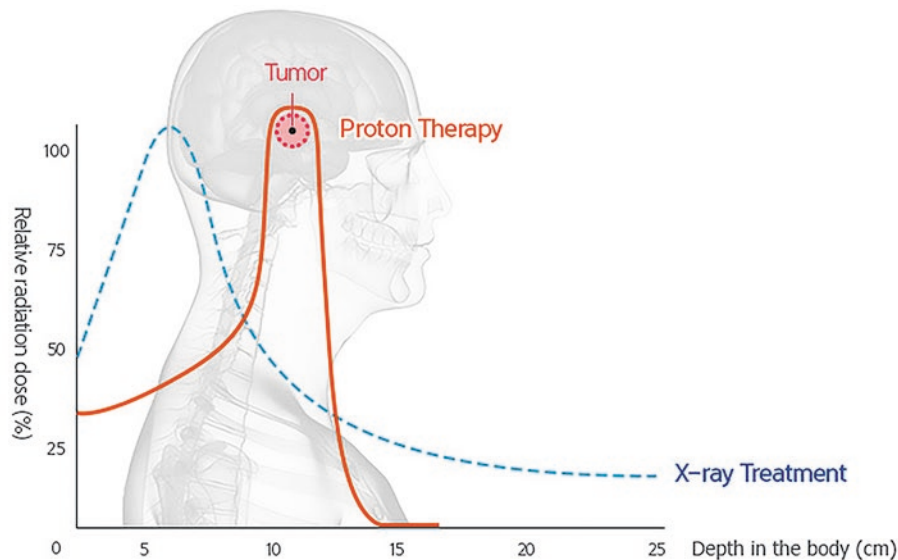
Terapija zračenjem vanjskim snopovima kod djece

Radioterapija kod djece zahtijeva specifična znanja i suradnju cijelog tima, uključujući onkologe, medicinske fizičare, medicinske sestre, radiološke tehnologe, anesteziologe, a poželjno i psihologa. Ovaj tim mora biti dobro usklađen jer je dječja radioterapija izazovna zbog specifičnih potreba dječjih organizama. Kod djece treba biti izuzetno pažljiv u pogledu njihove dobi, a također treba voditi računa o učincima radioterapije koji će se manifestirati u dugoročnom razdoblju. Na primjer, dječja tkiva imaju manju toleranciju na zračenje od odraslih, a mnogi tumori u dječjoj dobi često zahtijevaju visoke doze terapije. Iz tog razloga, svaki postupak mora biti precizno planiran kako bi se izbjeglo oštećenje zdravih tkiva, što može rezultirati dugoročnim posljedicama, uključujući usporavanje rasta, neplodnost ili smanjenje funkcije vitalnih organa (22). Radioterapija vanjskim snopovima kod djece izazovnija je nego kod odraslih zbog specifičnih karakteristika dječjih tumora. Tumori u djece često su rijetki, veliki i zahtijevaju velike ciljne volumene, a to može uključivati visoke doze zračenja koje mogu imati ozbiljne posljedice. Dječje tkivo, poput jajnika, testisa, hipofize, srca i mozga, zahtijeva posebnu zaštitu jer su ova tkiva osjetljivija na zračenje od onih u odraslih osoba. Na primjer, zračenje veće od 18 Gy može zaustaviti rast kostiju, a ozračivanje jajnika ili testisa iznad 5-10 Gy može prouzročiti neplodnost (23). Očuvanje normalnog moždanog tkiva je također ključno kako bi se izbjegle kognitivne promjene koje mogu nastati zbog zračenja mozga. Za uspješno liječenje, od esencijalne je važnosti odabrati najbolju tehniku liječenja. Najpreporučljivije su IMRT i IGRT tehnike, koje omogućuju maksimalnu dozu zračenja tumoru uz minimalnu štetu zdravim tkivima. Multidisciplinarni tim u dječjoj radioterapiji mora biti kontinuirano obučavan kako bi bio u stanju pratiti napredak u tehnologiji i osigurati najbolju moguću njegu pacijentima. Ovaj tim obuhvaća liječnike, radiološke tehnologe, medicinske fizičare, anesteziologe, medicinske sestre i psihologe (14). Uloga psihologa ili drugih stručnjaka također je ključna u olakšavanju procesa liječenja za djecu i njihove obitelji. Priprema djece za terapiju putem igre, brošura ili video zapisa može značajno smanjiti strahove i tjeskobe te olakšati razumijevanje postupaka liječenja (10). Planiranje radioterapije obično započinje CT simulacijom, pri čemu dijete mirno leži u maski dok se uzimaju rendgenske slike. Nakon toga, specijalisti stvaraju plan radioterapije koji će provesti radiološki tehnologi. Svaka



Slika 2. Shematski ciljni volumeni

Izvor: Balenović I. Ocrtavanje organa od rizika u radioterapiji (stručni rad). Radiološki vjesnik 2022/1. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/400332>, pristupljeno: 2. ožujka 2025.



Slika 3. Shematski prikaz Braggovog vrha

Izvor: Samsung Medical Center. Principles of Proton Therapy. Dostupno na: <http://www.samsunghospital.com/home/proton/en/whatIsProtonTherapy/principle.do>, pristupljeno: 2. ožujka 2025.

dijagnoza zahtijeva individualizirani pristup, jer različite vrste tumora imaju različite specifičnosti. U liječenju leukemije, radioterapija se koristi kada je likvor ili testisi zahvaćeni malignim stanicama, a često i prije transplantacije koštane srži, u obliku Total Body Irradiation (TBI) (23). Kod meduloblastoma, najčešćeg tumora mozga u djece, doza radioterapije ovisi o riziku. Za visoki rizik predviđa se veća doza, a planiranje se prilagođava specifičnostima svakog pacijenta. Neuroblastom, još jedan čest tumor kod djece, također zahtijeva precizno planiranje. U nekim slučajevima, kirurgija ne može u potpunosti ukloniti tumor, što zahtijeva povećanje doze radioterapije. Novije tehnologije kao što su 3D konformna radioterapija i IMRT omogućuju preciznije planiranje i minimaliziranje rizika za okolne organe poput bubrega, jetre i kralježnice (23). Protonska terapija, koja koristi visoku preciznost protona za liječenje tumora, smatra se važnim dijelom pedijatrijske onkologije. Zbog svoje sposobnosti da zrači samo tumor, smanjuje se rizik od oštećenja okolnih zdravih tkiva, što je osobito važno u dječjoj dobi. (slika 3.) Protonska terapija, iako skuplja, može se pokazati isplativijom dugoročno jer smanjuje nuspojave koje bi zahtijevale dodatno liječenje (29, 13).

Imobilizacija i anestezija

Imobilizacijska sredstva osiguravaju preciznost liječenja i određivanje sigurnosnih granica za planiranje volumena zračenja. Pozicioniranje ovisi o imobilizaciji pomoću maski ili drugih sustava za fiksiranje. Stalan položaj tijekom ozračivanja smanjuje nuspojave zračenja (10). Imobilizacija može biti izazov za djecu, koja često imaju strah od radioterapije i teško razumiju važnost mirovanja. Većina imobilizacijskih sredstava proizvedena je za odrasle pacijente, a prilagođena za djecu, što im može biti neudobno. Za tumore mozga najčešće se koristi termoplastična maska, dok za trupu ili ekstremitete postavljanje tetovaža može biti potrebno (13). Pacijenti se postavljaju na stol

pomoću lokalizacijskih lasera i identifikacijskih oznaka, poput tetovaža ili koštanih orijentira. Takav položaj mora biti konstantan kroz cijelo liječenje. Identifikacijske oznake ponekad se iscrtavaju na kalupu, no to nije optimalno zbog pomicanja. Koštani orijentiri su pouzdani, ali preciznost palpacije nije dovoljna za milimetarsku točnost. Pribor za pozicioniranje i imobilizaciju ključan je za preciznost (13). Prilagođavanje imobilizacijskih sredstava djeci zahtijeva strpljenje, osobito pri izradi maski. Maske se oblikuju prema djetetovim crtama lica, a postupak može izazvati stres i strah (24). Istraživanje Children's Oncology Group pokazalo je da modifikacija maske (81%) i njezino ukrašavanje (71%) pomažu djeci da lakše podnesu postupak (25). Uvođenjem 3D konformalne radioterapije, IMRT-a i IGRT-a, tehnologije poput SGRT-a omogućuju precizno praćenje



Slika 4. Priprema za provođenje radioterapije djece sa anestezijom

Izvor: autor

pacijenta, smanjujući potrebu za anestezijom i neudobnim imobilizacijama (26). Priprema djece za postavljanje imobilizacije kroz igru i objašnjenje postupaka smanjuje stres i ubrzava proces (24). Anestezija je često potrebna za djecu mlađu od 7 godina, a anesteziološki tim mora biti dostupan tijekom cijelog liječenja (slika 4.) (10). Sigurnost tijekom anestezije ključno je pitanje, s ciljem minimiziranja rizika i osiguravanja udobnosti djece (27).

Palijativna radioterapija

Palijativna radioterapija koristi se u liječenju djece s malignim bolestima, s ciljem ublažavanja simptoma poput bola ili sprječavanja njihovog nastanka. Obično se primjenjuje kada drugi oblici liječenja, poput kemoterapije, operacije ili radioterapije, nisu dali željene rezultate, ili kod metastatskih bolesti kao što su metastaze u kostima, jetri, mozgu, plućima, glavi i vratu. Cilj ove terapije je poboljšati kvalitetu života djeteta, olakšati simptome bolesti i smanjiti teret liječenja (28). Važno je da pacijenti i njihove obitelji budu dobro informirani o mogućnostima palijativne radioterapije. Istraživanje provedeno na Institutu Dana-Farber otkrilo je da čak 76% roditelja očekuje produljenje života njihove djece uz palijativnu radioterapiju, dok 40% smatra da će terapija izliječiti dijete, što ukazuje na potrebu za boljim objašnjenjem ciljeva palijativne terapije (28). Grupa za dječju onkologiju (Children's Oncology Group) razvila je smjernice za palijativnu radioterapiju djece i adolescenata s neizlječivim zloćudnim tumorima. Smjernice uključuju crtež s indikacijama za liječenje i popis mogućih nuspojava, kao što su alopecija, dermatitis i edemi pri zračenju mozga. Takve smjernice pomažu liječnicima u praćenju i upravljanju nuspojavama te optimizaciji terapije (28).

Nuspojave radioterapije vanjskim snopovima kod djece

Djeca koja su prošla radioterapiju mogu iskusiti razne nuspojave, budući da su njihova tkiva i organi osjetljiviji na zračenje zbog razvoja. Doza zračenja također igra ključnu ulogu u ozbiljnosti nuspojava, a doza od 2-3 Gy prema testisima može uzrokovati azoospermiju, dok doza od 2,5-3 Gy prema srcu može izazvati srčane bolesti. Najčešće nuspojave uključuju probleme u rastu, neurokognitivne promjene, neplodnost, hormonalne promjene i sekundarne karcinome (3). Nuspojave se mogu pojaviti odmah, nekoliko dana nakon tretmana ili čak godinama kasnije. Osim spomenutih, mogu se javiti problemi s apetitom, dehidracija, proljev, umor, alopecija, trombocitopenija, anemija, infekcije i rane na koži (7). Mučnina i povraćanje su česti nakon zračenja glave, dok djeca često doživljavaju probleme s prehranom, zbog kojih je važno pratiti njihovu težinu i opseg tijela, te pružiti dodatke prehrani po potrebi (7). Alopecija, gubitak kose, vrlo je česta nuspojava, osobito kod tumora glave, te može biti vrlo traumatična za djecu, osobito djevojčice (7). Kombinacija radioterapije i kemoterapije povećava rizik od sekundarnih karcinoma, poput akutne mijeloidne leukemije (AML), koja se može javiti čak 20 godina nakon početnog liječenja (7). Kasni učinci zračenja mogu se razviti nakon završetka tretmana, a kod većine preživjelih pacijenata pojavljuju se tijekom godina. Pravovremeno prepoznavanje i liječenje tih

učinaka ključno je za poboljšanje kvalitete života i prevenciju ozbiljnih zdravstvenih problema (30).

Zaključak

Terapija zračenjem vanjskim snopovima kod djece složen je proces koji se bitno razlikuje od radioterapije odraslih. Zbog toga što dječji organi i tkiva još uvijek rastu, ionizirajuće zračenje ima snažniji utjecaj. Proces uključuje nekoliko faza: postavljanje dijagnoze, planiranje radioterapije i izvođenje samog tretmana. Liječnik određuje plan, medicinski fizičar ga implementira u računalni sustav, a radiološki tehnolog provodi terapiju putem linearnih akceleratora. Djeca često ne razumiju važnost mirovanja, pa se ponekad koristi anestezija. Napredak tehnologije omogućuje primjenu novih tehnika poput IMRT-a, VMAT-a, IGRT-a i protonske terapije. U Hrvatskoj se primjenjuju sve ove tehnike osim protonske terapije, koja je vrlo precizna, ali još nije dostupna. Tehnologije omogućuju bolji fokus na tumore, minimalno oštećenje zdravih tkiva i smanjenje nuspojava, uključujući sekundarne karcinome. Dugoročni cilj je očuvanje kvalitete života djece nakon liječenja. Dječja radioterapija zahtijeva interdisciplinarni pristup, stalno usavršavanje i edukaciju, a novim tehnikama i tehnologijama postižu se izvrsni rezultati u liječenju dječjih tumora. Svi podaci u ovom radu dio su završnog rada „Terapija zračenjem vanjskim snopovima kod djece“ izrađenog na Zdravstveno veleučilište u Zagrebu (31).

Literatura

1. International Atomic Energy Agency. Radiotherapy in cancer care: facing the global challenge. Vienna: IAEA; 2017. 325-338.
2. Sandler ES. Radiation Therapy. Nemours KidsHealth. 2022. Dostupno na: <https://kidshealth.org/en/parents/radiation.html> Pristupljeno: 25.2.2025.
3. Hariyanto AD, Wijaya HM, Anton J, Yanuarta SE, Octavianus S, Nuryadi E, et al. The Role of Radiotherapy towards Pediatric Cancer. Radioterapi & Onkologi Indonesia. 2020;11(2):57-65.
4. PDQ® Pediatric Treatment Editorial Board. PDQ Retinoblastoma Treatment. Bethesda, MD: National Cancer Institute. 2021. Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK65754/> Pristupljeno: 25.2.2025.
5. Podgorsak EB. Treatment machines for external beam radiotherapy. U: Podgorsak EB. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. Vienna: IAEA; 2005. 136-160.
6. Constine LS, Tarbell NJ, Halperin EC. Pediatric Radiation Oncology. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2016.
7. Estlin E, Gilbertson RJ, Wynn RF. Pediatric Hematology and Oncology. Oxford: Blackwell Publishing Ltd; 2010.
8. Mayo Clinic Staff. Diagnosis and treatment. Pediatric Brain Tumors. 2024. Dostupno na: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/pediatric-brain-tumor/diagnosis-treatment/drc-20361706>, pristupljeno: 24.2.2025.
9. Heike T, Timmermann B. Paediatric proton therapy. The British Journal of Radiology. 2020; 93(1107).
10. Walker D, Perilongo G, Taylor R, Punt J. Brain and spinal tumors of childhood. London: Arnold; 2004.
11. Zdenko Krajina: Radioterapija – radiobiološke i fizikalne osnove, primjena u liječenju raka dojke. Medicinski Vjesnik: 1999; 31(1-4): 97-105.
12. InformedHealth.org. In brief: External radiotherapy. Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK279300/> Pristupljeno: 25.2.2025.

13. Khan FM, Gibbons JP, Sperduto PW. Khan's Treatment Planning in Radiation Oncology. Fourth edition. Philadelphia: Wolters Kluwer; 2016.
14. Mascarin M, Giugliano FM, Coassin E, Drigo A, Chiovati P, Dassiè A, et al. Helical tomotherapy in children and adolescents: dosimetric comparisons, opportunities and issues. *Basel*:2011;3(4):3972-90.
15. Salem, P.P., Chami, P., Daou, R.; Hajj, J., Lin, H.; Chhabra, A.M., Simone, C.B., II; Lee, N.Y.; Hajj, C. Proton Radiation Therapy: A Systematic Review of Treatment-Related Side Effects and Toxicities. *Int. J. Mol. Sci.* 2024, 25, 10969. <https://doi.org/10.3390/ijms252010969>.
16. Lane, S.A., Slater, J.M., Yang, G.Y. Image-Guided Proton Therapy: A Comprehensive Review. *Cancers* 2023, 15, 2555. <https://doi.org/10.3390/cancers15092555>
17. KBC Ri. Radioterapija (informativni letak). Dostupno na: <https://kbc-rijeka.hr/>
18. The European Society for Pediatric Oncology. Dostupno na: <https://siop.eu/>
19. Taylor A, Powell ME. Intensity-modulated radiotherapy--what is it? *Cancer Imaging.* 2004 Mar 26;4(2):68-73.
20. Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT). Volumetric Intensity Modulated Arc Therapy (VMAT). Radiation Treatments. Dostupno na: <https://www.cancercareinstitute.com/>, pristupljeno: 26.2.2025.
21. Sibtain A, Morgan A, MacDougall N. Radiotherapy in Practice. Physics for Clinical Oncology. New York: Oxford University Press; 2012.
22. Grah J. Specifičnosti radioterapije u liječenju malignih bolesti, Uloga radioterapije u liječenju tumora dječje dobi. *Paediatr Croat.* 2013; 57 (Supl 1): 203-209
23. Olch AJ. Pediatric Radiotherapy, Planning and Treatment. New York: Taylor & Francis Group; 2013.
24. Alex-lemodane.org. Dostupno na: www.alexlemonade.org
25. Holt DE, Hiniker SM, Kalapurakal JA, Breneman JC, Shiao JC, Boik N, et al. Improving the Pediatric Patient Experience During Radiation Therapy – A Children's Oncology Group Study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2021 ;109(2):505-514.
26. Mast M, Perryck S. Introduction to: Surface Guided Radiotherapy (SGRT). *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol.* 2022;22:37-38.
27. Villablanca N, Valls N, González R. Techniques and Complications of Anesthesia in Pediatric Radiotherapy: A Retrospective Cohort Study. *J Pediatr Hematol Oncol.* 2023;45(7):377-382.
28. Tsang DS, Vargo JA, Goddard K, Breneman JC, Kalapurakal JA, Marcus KJ. Palliative radiation therapy for children with cancer. *Pediatr Blood Cancer.* 2021:68.
29. MIBS Dr. Berezin Medical Institute. Proton Centers Around the World. Dostupno na: <https://protherapy.ru/worldprotoncentres>
30. Children's Oncology Group. Late Effects of Treatment for Children's Cancer. Dostupno na: <https://childrensoncologygroup.org/lateeffectsoftreatment>
31. Pekvarić M. Terapija zračenjem vanjskim snopovima kod djece [Završni rad]. Zagreb: Zdravstveno veleučilište; 2024 (pristupljeno 05.03.2025.) Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:139:191624>

Radiation Therapy for children

Abstract

Radiotherapy in paediatric oncology brings specific challenges and differences compared to radiation therapy for adult patients. Children are the most sensitive group of patients because their organs and tissues are still developing, which means that ionizing radiation has a much greater impact and harm to healthy tissues in children than in adults. In paediatric oncology, we very often encounter large-volume tumours in specific locations, which pose a great challenge in planning and implementing radiotherapy. The risk of radiation and the occurrence of secondary cancers due to damage to healthy tissue during the treatment of the primary tumour is high, and new methods can reduce this risk. It is difficult or impossible to explain to most children the importance of stillness during radiotherapy, which means that most children are subjected to anaesthesia. Every child and family faced with a tumour diagnosis goes through the most difficult moments of their lives, therefore, children and their families should be treated by professionals specialized in paediatric oncology and radiotherapy. Children are most often, and in Croatia as well, treated in hospitals and institutions intended for adults. To facilitate the treatment process, it is important to explain the entire process that they will go through as a form of play and conversation adapted to the child's age. After the diagnosis follows preparation and planning of radiation therapy, which is carried out by the oncologist in consultation with radiation therapists and medical physicists. Finally, there is treatment, radiation therapy delivery, carried out by radiation therapist (RTT). The role of RTTs is to instruct, prepare and position the child in a way suitable for the treatment and to operate the radiotherapy machine. Today's technological advances and the advent of new treatment methods enable much better delivery of radiation to tumour tissue and much better protection of surrounding healthy tissue.

Keywords: radiotherapy, children, tumours, radiation