

Dozimetrijska provjera planova zračenja dojke na prstenastom koplanarnom linearnom akceleratoru

Klara Dobrin*

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 21. siječnja 2025.)

Ovaj rad obuhvaća dozimetrijske provjere novouspostavljenih IMRT i VMAT radioterapijskih tehnika na prstenastom akceleratoru Halcyon za zračenje karcinoma dojke. Provedene su dvije metode dozimetrijske provjere izrađenih radioterapijskih planova, mjerenje predanog zračenja diodama smještenim na plaštu matričnog detektora ArcCHECK cilindričnog oblika te mjerenje predanog zračenja pomoću elektroničkog slikovnog portalnog uređaja (EPID) integriranog u Halcyon. Izmjerenе raspodjele doze uspoređene su gama analizom s odgovarajućim izračunatim raspodjelama doze izračunatim u računalnom sustavu za planiranje radioterapije (Eclipse). Dobiveni rezultati obje metode su analizirani, uz raspravu o njihovim prednostima i nedostacima.

I. UVOD

Postoji više metoda liječenja raka dojke, a o izboru terapijskog pristupa odlučuju specijalisti onkologije i radioterapije. Jedan od pristupa je i radioterapija koja se može provoditi kao invazivna metoda, poput brahiterapije ili kao neinvazivna metoda, koja uključuje liječenje vanjskim snopovima zračenja. U slučaju radioterapija vanjskim snopovima, snopovi fotona, elektrona, protona ili težih iona visokih energija usmjeravaju se na područje tumora. Cilj je točno predati terapijsku dozu zračenja na ciljni volumen (engl. clinical target volume, CTV), uz minimalnu izloženost rizičnih organa (engl. organs at risk, OAR). Napredne tehnike radioterapije vanjskim snopovima, kao što su trodimenzionalna konformalna radioterapija (engl. three-dimensional conformal radiation therapy, 3DCRT), terapija zračenjem moduliranog intenziteta (engl. intensity modulated radiation therapy, IMRT) i volumetrijska modulirana lučna terapija (engl. volumetric modulated arc therapy, VMAT), omogućuju personalizirani pristup liječenju. Ove metode koriste sofisticirane planove zračenja, prilagođene specifičnoj anatomiji pacijenta, kako bi se optimizirala predaja doze. U ovom radu prikazane su dozimetrijske provjere dvaju planova zračenja raka dojke, koji su temeljeni na različitim tehnikama zračenja. Dozimetrijska provjera ključni je korak u procesu osiguranja kvalitete (engl. quality assurance, QA) radioterapijskog liječenja, jer omogućuje usporedbu planirane i stvarno predane doze, čime se osigurava točnost i sigurnost zračenja.

A. Halcyon

Halcyon je naziv za novi tip linearnog akceleratora proizvođača Varian Medical System¹. On se koristi u radioterapiji vanjskim snopovima fotona, a njegova geometrija omogućava primjenu mnogih tehnika liječenja

uključujući IMRT i VMAT. Radi se o zatvorenom akceleratorskom sustavu s otvorom promjera 100 cm [sl. 1(a)] i jednoenergijskim snopom fotona nominalnog ubrzavajućeg potencijala 6 megavolta (MV), bez filtera za ravnjanje (engl. flattening filter free) i s maksimalnom veličinom polja zračenja od $28 \times 28 \text{ cm}^2$.

Plan zračenja izrađuje se u računalnom sustavu za planiranje radioterapije (engl. treatment planning system, TPS) na modelu pacijenta (ili dijela tijela pacijenta) koji se zasniva na slikama najčešće dobivenim računalnom tomografijom (engl. computed tomography, CT) [1]. Sustav za planiranje radioterapije u ovom je slučaju Eclipse, također proizvođača Varian Medical Systems.

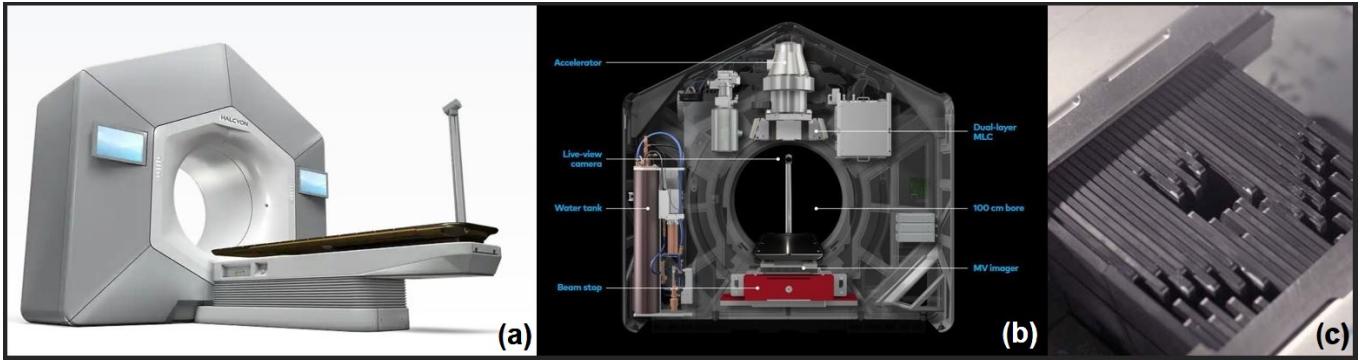
Za pravilno pozicioniranje pacijenta uoči radioterapije koristi se kilovoltno (kV) oslikavanje CT-om u sklopu Halcyona, a kako bi se osigurala klinički zadovoljavajuća pokrivenost CTV-a i poštediti OAR-a, snop se oblikuje pomoću dvoslojnog kolimatora (engl. multileaf collimator, MLC). Radi se o dva sloja visokoapsorbirajućeg materijala, 95% materijala je volfram, a 5% je zaštićeno autorskim pravima [2]. Donji se sloj sastoji od dvije grupe s 28 listića u svakoj, a gornji sloj čine dvije grupe s 29 listića u svakoj. Svaki listić ima širinu od 1 cm projiciranu na izocentar², a jedan je sloj u odnosu na drugi pomaknut za 0.5 cm u smjeru okomitom na smjer kretanja listića. Time se osigurava minimalno propuštanje zračenja između listića. Uz to, minimalno se propuštanje osigurava i nepravilnim oblikom svakog listića. Oni nisu pravocrtni u smjeru snopa, već svaki listić ima udubljenje (engl. groove) i izbočenje (engl. tongue) kako bi se osigurala apsorpcija zračenja i u području između susjednih listića. Oni svojim razmicanjem i skupljanjem propuštaju, odnosno zaustavljaju snop fotona te omogućuju prije spomenuto moduliranje intenziteta [sl. 1(c)]. Svaki se listić može pomaknuti maksimalno 14 cm, čime pokrivaju ukupno polje ($28 \times 28 \text{ cm}^2$). Listići se u slučaju IMRT³ i VMAT tehnika kontinuirano pomiču tijekom zračenja.

* kdobrin.phy@pmf.hr

¹ Varian Medical Systems, Palo Alto, Kalifornija, SAD

² To je točka koju sijeku osi rotacije glave uređaja, ležaja za pacijenta i kolimatora.

³ Kod IMRT tehnike se listići mogu i ne moraju pomicati. Slučaj



Slika 1: Linearni akcelerator Halcyon (a) izgled uređaja izvana. Ima otvor promjera 100 cm, pomični ležaj za pacijenta, tipke za upravljanje ležajem, ekrane s pacijentovim podacima, kameru i mikrofona za komunikaciju s pacijentom za vrijeme provođenja terapije (b) poprečni presjek uređaja. Na slici su označeni glava uređaja (accelerator), MLC te EPID (MV imager). (c) MLC listići. Slika je preuzeta sa službene internetske stranice Varian Medical Systems, <https://www.varian.com/>

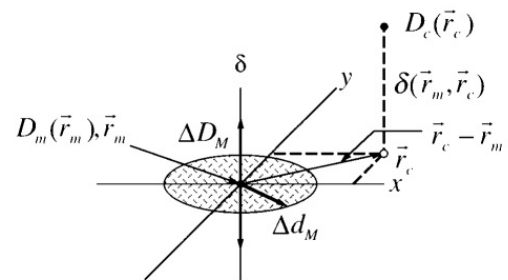
U IMRT tehnici zračenja glava uređaja prvo zauzme određeni položaj (određeni kut), zatim iz mirovanja ozračuje pacijenta. Ukoliko plan zračenja uključuje ozračivanje pacijenta iz više kuteva, glava uređaja u IMRT tehnici predaje zračenje iz mirovanja te ne zrači pri promjeni položaja. U VMAT tehnici glava uređaja istovremeno kruži oko pacijenta i zrači.

B. Gama analiza

Za provjeru kvalitete plana zračenja provodi se gama analiza. Prvo se izrađuje plan provjere, tj. TPS izračuna raspodjelu doze plana zračenja za pacijenta na fantomu ili elektroničkom portalnom slikovnom uređaju (engl. electronic portal imaging device, EPID). To je izračunata raspodjela doze, ona koju ocjenjujemo (engl. evaluated). Ona se u gama analizi uspoređuje s raspodjelom doze koja je izmjerena pri ozračivanju fantoma (EPID-a) s istim planom. To je tzv. referentna raspodjela doze (engl. reference).

U gama analizi računaju se razlika u dozama u svakoj točki i udaljenost do slaganja (engl. distance to agreement, DTA). To je najmanja udaljenost između izmjerene i izračunate doze istog iznosa. Što se raspodjele doze tiče, uobičajeno je da je na području tumora doza jednoliko velika, dok pri rubu njezin iznos opada. Znači u ciljnom volumenu nema gradijenta doze ili je on mali, dok prema rubu raste. Posljedično, na rubu razlika u dozama nije korisna informacija jer razlika u položaju dvije raspodjele može biti prihvatljiva, ali razlika u dozi neprihvatljiva. Zato je na rubu korisnije gledati DTA. S obzirom na to da su razlika u dozi i DTA komplementarne, gama analiza uključuje oba uvijeta.

Ove dvije mjere su u gama analizi združene u jedan indeks koji se određuje u hiperprostoru prostornih koordinata i apsorbirane doze, kao što je prikazano na sl. 2 [3]. U xy ravnini mjeri se DTA. Točka u ishodištu je položaj izmjerene vrijednosti doze $\vec{r}_m$, dok je položaj izračunate vrijednosti istog iznosa označen s $\vec{r}_c$. On je definiran pomoću osi x i y. Kružnica radijusa Δd_M označava prag DTA, tj. ako vrijedi $|\vec{r}_m - \vec{r}_c| \leq \Delta d_M$ DTA je prihvatljiva. Vrijednost na trećoj osi, δ , daje iznos razlike u dozama. Tu je izražena vertikalna linija duljine $2\Delta D_M$ koja označava prag razlike u dozama, tj. ukoliko vrijedi $|D_c(\vec{r}_m) - D_m(\vec{r}_m)| \leq \Delta D_M$ razlika u dozama je prihvatljiva.



Slika 2: Geometrijski prikaz kriterija gama analize. $\vec{r}_m$ je položaj izmjerene doze, a $\vec{r}_c$ je položaj izračunate doze istog iznosa. Kružnica radijusa Δd_M označava prag DTA. Na osi δ mjeri se razlika u dozama $\delta(\vec{r}_m, \vec{r}_c)$, a linija duljine $2\Delta D_M$ označava prag razlike u dozama. Iznosi izmjerene i izračunate doze označeni su s $D_m(\vec{r}_m)$ i $D_c(\vec{r}_c)$. Slika je preuzeta iz članka D. A. Low, W. B. Harms, S. Mutic, and J. A. Purdy: *A technique for the quantitative evaluation of dose distributions*. Medical physics, 1998, 25.5: 656-661.

kad se kontinuirano pomiču je tzv. dinamički IMRT. Ta je tehnika zračenja primjenjena u planu zračenja navedenom u ovom radu.

Gama analiza simultano uzima u obzir oba kriterija

preko površine definirane na slijedeći način:

$$1 = \sqrt{\frac{r^2(\vec{r}_m, \vec{r})}{\Delta d_M^2} + \frac{\delta^2(\vec{r}_m, \vec{r})}{\Delta D_M^2}} \quad (1)$$

gdje su

$$r(\vec{r}_m, \vec{r}) = |\vec{r} - \vec{r}_m| \quad (2)$$

$$\delta(\vec{r}_m, \vec{r}) = D_c(\vec{r}) - D_m(\vec{r}_m) \quad (3)$$

Veličina s desne strane jedn. (1) može se koristiti za definiranje indeksa kvalitete u svakoj točki $\vec{r}_m$,

$$\gamma(\vec{r}_m) = \min\{\Gamma(\vec{r}_m, \vec{r}_c)\} \forall \{\vec{r}_c\} \quad (4)$$

gdje je

$$\Gamma(\vec{r}_m, \vec{r}_c) = \sqrt{\frac{r^2(\vec{r}_m, \vec{r}_c)}{\Delta d_M^2} + \frac{\delta^2(\vec{r}_m, \vec{r}_c)}{\Delta D_M^2}} \quad (5)$$

Vrijednost $\gamma(\vec{r}_m)$ računa se za svaku točku raspodjele. Razlika u raspodjelama je prihvatljiva za točke u kojima $\gamma(\vec{r}_m) \leq 1$, a neprihvatljiva za točke u kojima $\gamma(\vec{r}_m) > 1$.

Uobičajeni su klinički kriteriji 3%/3 mm i 3%/2 mm koji istovremeno uzimaju u obzir kriterij razlike u dozi od 3% i kriterij udaljenosti do slaganja raspodjela od 3 odnosno 2 mm. Da bi plan zračenja bio prihvatljiv, moraju biti zadovoljena oba uvjeta u određenom udjelu točaka. Udio točaka koji zadovoljava oba uvjeta naziva se prolaznost.

1. Globalna gama analiza

U slučaju globalne gama analize, tolerancija za odstupanje temelji se na maksimalnoj dozi u cijeloj raspodjeli. Ona je posljedično manje osjetljiva na male varijacije doze.

2. Lokalna gama analiza

Odstupanja se u slučaju lokalne gama analize procjenjuju u odnosu na lokalni maksimum. Lokalna gama analiza je stoga osjetljivija na lokalna odstupanja, pogotovo u područjima s nižim dozama.

3. Prag

Uz kriterije se u gama analizi treba definirati prag (engl. threshold). Radi se o iznosu ispod kojeg se doze isključuju iz analize. Definira se prema maksimalnoj dozi u cijeloj raspodjeli.

II. METODE

U ovome su istraživanju provedene dvije provjere za svaki plan zračenja. U prvoj se provjeri ozračuje fantom ArcCHECK, u drugoj se provjeri ozračuje EPID.

A. ArcCHECK

ArcCHECK je matrični detektor (fantom) cilindričnog oblika proizvođača Sun Nuclear⁴. Radi se o plaštu valjka unutarnjeg promjera 15 cm te vanjskog promjera 25 cm. Plašt je izrađen od polimetil metakrilata (PMMA). Unutar plašta nalazi se mreža od 1386 spiralno postavljenih dioda. Promjer mreže je 21 cm. Dioda su razmaknute po 1 cm te je ukupna duljina mreže 21 cm. U šupljinu ArcCHECK-a mogu se dodavati ionizacijske komore po potrebi (sl. 3).



Slika 3: Matrični detektor ArcCHECK. ArcCHECK je položen na svoj nosač, na detektoru su oznake za usklađivanje s laserima te je predložak za umetanje dodatnih ionizacijskih komora izvučen iz šupljine. Slika je preuzeta sa službene internetske stranice Sun Nuclear, <https://www.sunnuclear.com/>

Dioda su poluvodički detektori. U slučaju radioterapije radi se o p-Si diodama, što znači da je površina diode sloj silicija n tipa, a unutrašnjost je sloj silicija p tipa. Između dva sloja nastaje područje osiromašenja te pripadno električno polje. Upadno ionizirajuće zračenje stvara elektron šupljina par. Ovisno o tome gdje par nastaje, manjinski nosioc naboja (elektron u p tipu, tj. šupljina u n tipu) biva ubrzan pod utjecajem električnog polja i nastaje struja. Ta je struja mjera zračenja [4].

Plan provjere za ArcCHECK dobije se tako što Eclipse izračuna raspodjelu doze kliničkog plana na ArcCHECK-u. Za izračun se koristi virtualni fantom ArcCHECK-ovih dimenzija i oblika, uključujući i nosač za ArcCHECK. Izračunata raspodjela doze i plan provjere se šalju u ArcCHECK-ov program, SNCPatient v8.5, koji zatim stvara izračunatu raspodjelu koja će se moći usporediti s izmjerenom raspodjelom. Raspodjele doza prikazane su u projekciji razmotanog plašta valjka čije oplošje odgovara pozicijama dioda. Gama analiza ArcCHECK mjerenja provodi se u ArcCHECK-ovom programu SNCPatient.

⁴ Sun Nuclear Corporation, Melbourne, Florida, SAD

ArcCHECK se pozicionira u odnosu na izocentar. Na ležaj za pacijenta prvo se postavlja nosač za ArcCHECK, a na samom se fantomu nalaze oznake za usklađivanje s laserima koji prikazuju izocentar. Prije ozračivanja ArcCHECK-a se također provodi kV oslikavanje koje osigurava točnost unutar 0,6 mm [5].

B. EPID

EPID je 2D detektor ugrađen u Halcyon, postavljen nasuprot glave uređaja i rotira u skladu s njom. Upadno rendgensko zračenje međudjeluje s bakrenim slojem i slojem scintilatora proizvodeći vidljive fotone koje detektira niz fotodioda. Rezultirajuća slika proporcionalna je energiji apsorbiranoj u nizu fotodioda.

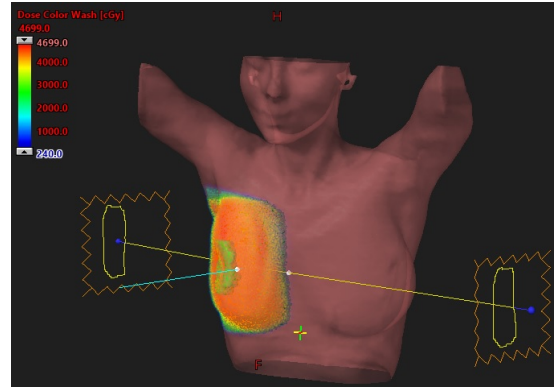
Mjerenja u ovom radu su *non-transit forward projection*. To znači da je EPID direktno zračen (između EPID-a i izvora zračenja nema pacijenta niti fantoma) te se radila analiza izmjerene doze koju je apsorbirao EPID (umjesto analize raspodjele izmjerene doze rekonstruirane u pacijentu na temelju EPID mjerenja pomoću TPS-a).

Pri izradi plana provjere za EPID, Eclipse ne preračunava raspodjelu doze, već računa tok energije (engl. fluence) kliničkog plana na položaju EPID detektora. Tok energije zatim pretvara u odziv EPID-a koji se koristi kao izračunata raspodjela u gama analizi. Budući da je EPID implementirani dio Halcyona, slasnije izračunate raspodjele doze i plana provjere u dodatni program nisu potrebni.

III. MJERENJA

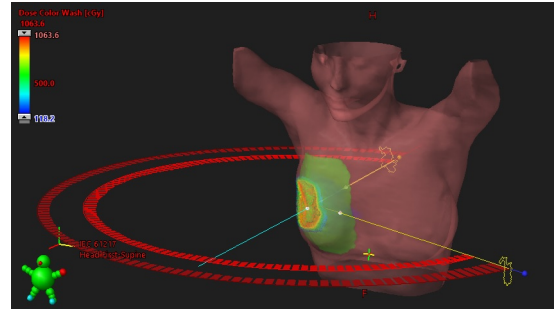
Napravljene su dozimetrijske provjere dva plana zračenja dojke. Oba se plana odnose na istu pacijenticu. U prvom se planu radi o ozračivanju cijele (desne) dojke s dva polja IMRT tehnikom. U drugom se planu dodatno zrači ciljni volumen (engl. boost) VMAT tehnikom.

IMRT plan ima ukupno 16 frakcija⁵, srednja doza za cijelu dojku po jednoj frakciji iznosi 2.66 Gy. Provedena je dozimetrijska provjera prve frakcije. Za prvo IMRT polje glava uređaja postavljena je na 58°, dok je kolimator rotiran za 5°. Za prvo je polje upotrijebljeno 456 monitorskih jedinica⁶ (engl. monitor unit, MU). Zatim glava uređaja mijenja položaj. Za drugo je polje glava uređaja pod kutom od 230°, a kolimator 355°. Doza je predana u 307 MU.



Slika 4: Prikaz kliničkog IMRT plana u Eclipse-u. Na slici su prikazani položaji glave uređaja za svako IMRT polje. Dva kvadrata valovitih rubova predstavljaju ukupnu veličinu polja $28 \times 28 \text{ cm}^2$, a rubovi predanih polja označeni su žutim linijama. Smjerovi fotonskih zraka prikazani su žutim pravcima, a plavi pravac označava 0°. Na slici se također vidi raspodjela doze u pacijentici, a vrijednosti doze su po iznosu u cGy prikazane skalom boja. Slika je dobivena uređivanjem slike zaslona s ukupnim kliničkim IMRT planom u Eclipse sustavu.

VMAT plan ima ukupno 5 frakcija, srednja doza za *boost* je 2 Gy. Također je provedena dozimetrijska provjera prve frakcije. U VMAT planu glava uređaja napravila je dva poluluka. U prvome se poluluku kretala od 181° do 63°, pri čemu je predala 194 MU. Kolimator je bio pod kutem od 315°. U drugom poluluku glava uređaja se vraćala istim putem, od 63° do 181° uz 197 predanih MU. Kut kolimatora bio je 45°.



Slika 5: Prikaz kliničkog VMAT plana u Eclipse-u. Na slici su crvenom bojom prikazani lukovi po kojima putuje glava uređaja. Žutom su bojom obrubljeni otvori MLC listića. Smjerovi fotonskih zraka prikazani su žutim pravcima, a plavi pravac označava 0°. Na slici se također vidi raspodjela doze u pacijentici, a vrijednosti doze su po iznosu u cGy prikazane skalom boja. Slika je dobivena uređivanjem slike zaslona s ukupnim kliničkim VMAT planom u Eclipse sustavu.

⁵ Pacijentima se ne predaje ukupna planirana doza pri jednom zračenju, već se predaje u frakcijama kroz određeni period.

⁶ Intrinzična mjerna jedinica svakog linearnog akceleratora koja povezuje predano zračenje i energiju apsorbiranu u pacijentu.

ukupnog mjerenja, a ne svakog polja zasebno. Za mjerenje je korištena mreža dioda, bez dodatnih ionizacijskih komora u središtu ArcCHECK-a. U slučaju dozimetrijske provjere pomoću EPID-a, analizira se svako polje zasebno. Za VMAT plan se u gama analizi ArcCHECK mjerenja ponovno uspoređuju oba luka zajedno, a kod analize EPID mjerenja svaki luk zasebno.

Dozimetrijska provjera i prvog i drugog plana mjerenog pomoću ArcCHECK-a sastojala se od globalne gama analize s 3%/3 mm, 3%/2 mm, 2%/3 mm i 2%/2 mm kriterijem te lokalne gama analize s 2%/2 mm kriterijem. Klinički kriterij u KBC Zagreb je 3%/2 mm⁷. Prolaznosti za 3%/2 mm kriterij i 2%/3 mm kriterij se međusobno uspoređuju kako bi se doznalo je li veće odstupanje u razlici u dozama ili u DTA. Dozimetrijska provjera svih polja mjerenih pomoću EPID-a sastojala se od globalne i lokalne gama analize s 2%/2 mm i 2%/1 mm kriterijima. Klinički kriterij u KBC Zagreb je 2%/2 mm za globalnu gama analizu. Da bi plan zračenja bio prihvatljiv, prolaznost za oba klinička kriterija mora biti $\geq 95\%$.

Pri gama analizi ArcCHECK mjerenja prag je bio 10% za sva mjerenja. Za analizu EPID mjerenja prag je bio 5% za sva mjerenja, tj. manji nego kod ArcCHECK mjerenja. Uzrok tomu je što EPID nema dodatne doprinose pri detektiranju. Na njega uglavnom upada snop pod pravim kutem te se s ovim pragom od 5% eliminiraju doze izvan polja. Također, s obzirom da je EPID integriran u sam Halcyon, ima smisla tražiti veću prostornu točnost te je se u skladu s tim za sve kriterije zahtijevala prolaznost od 95%.

IV. REZULTATI

A. Raspodjele doza

Na slikama 6, 7, 8 i 9 nalaze se primjeri raspodjela doza. Prve dvije dobivene su pri dozimetrijskoj provjeri prvog plana pomoću ArcCHECK-a i EPID-a, a druge dvije pri dozimetrijskoj provjeri drugog plana pomoću ArcCHECK-a i EPID-a. Na sve četiri slike s lijeva na desno su izračunata raspodjela doze, usporedba dviju raspodjela te izmjerena raspodjela doze. Slika 6 i slika 8 prikazuju raspodjele za mjerenja pomoću ArcCHECK-a koje su dobivene u ArcCHECK-ovom programu SNCPatient. Slika 7 i slika 9 prikazuju raspodjele za mjerenja pomoću EPID-a koje su dobivene u Eclipse programu.

1. IMRT

Na sl. 6 prikazani su rezultati mjerenja prvog plana pomoću ArcCHECK-a. Na sve se tri slike s donje strane

mjere stupci, s lijeve strane redovi, a s gornje strane odgovarajući ArcCHECK kutovi. U ovome je slučaju riječ o lokalnoj gama analizi s 2%/2 mm kriterijem te pragu od 10%. Točke na sl. 6(b) predstavljaju mrežu dioda, dok je izračunata raspodjela sive boje. Dioda se pojavljuje u tri različite boje, zelenoj, plavoj i crvenoj. Zelena boja znači da mjerenje zadovoljava kriterije, dok plava i crvena ne. Plave su diode izmjerile vrijednost nižu nego što je izračunato, dok su crvene diode izmjerile višu vrijednost.

Na sl. 7 prikazani su rezultati mjerenja drugog IMRT polja pomoću EPID-a. Radi se o globalnoj gama analizi s 2%/1 mm kriterijem te je prag 5%. Ovdje se odmah može uočiti razlika između mjerenja pomoću ArcCHECK-a i pomoću EPID-a. Pri usporedbi raspodjele na sl. 7 s raspodjelom od drugog polja (lijevo polje) na sl. 6. može se primjetiti da je raspodjela na sl. 6 "šira". Naime u slučaju ArcCHECK-a su diode mjerile dva puta. Prvo su izmjerile zračenje koje je došlo od prvog polja, a zatim i zračenje koje je došlo od drugog polja, dok se pomoću EPID-a mjeri svako polje zasebno.

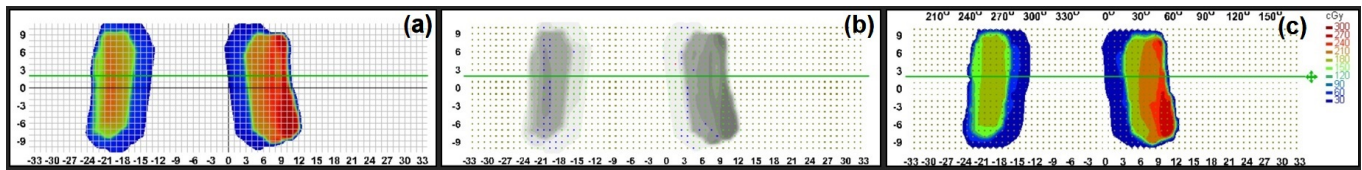
2. VMAT

Kao što je prije spomenuto, u VMAT tehnici liječenja, glava uređaja istovremeno kruži oko pacijenta i zrači. Rezultirajuća je raspodjela stoga "razlivena" duž mreže dioda. Isto je prikazano na sl. 8. To je globalna gama analiza s 3%/2 mm kriterijem i pragom od 10%. Na obje se raspodjele vidi da ArcCHECK, osim direktnog zračenja detektira i zračenje koje je prošlo kroz njega na drugoj strani (niskodozni dio raspodjele uz desni rub).

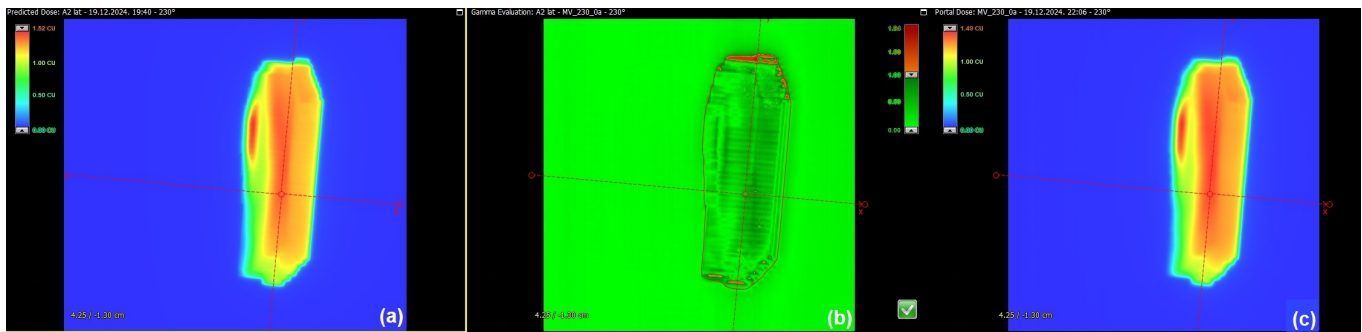
Kako se u slučaju IMRT plana dozimetrijska provjera pomoću ArcCHECK-a sastojala od gama analize ukupnog plana, a pomoću EPID-a se zasebno gledalo svako polje, tako je i u slučaju VMAT terapije. Pomoću EPID-a se zasebno provodi dozimetrijska provjera svakog luka. Na sl. 9 nalaze se raspodjele doza dobivene pri mjerenju prvog VMAT luka (gibanje glave uređaja s lijeva na desno). Rezultati se odnose na globalnu gama analizu s 2%/2 mm kriterijem te prag od 5%. Raspodjele mjerene pomoću ArcCHECK-a i EPID-a bile su slične u slučaju IMRT tehnike s dva polja jer je glava uređaja mirovala za vrijeme zračenja. Kod VMAT metode glava uređaja ne miruje pri zračenju, ali je to uočljivo samo kod ArcCHECK mjerenja. EPID koji se nalazi nasuprot glave uređaja mjeri istu⁸ raspodjelu doze bez obzira na to giba li se glava ili miruje.

⁷ Bio je 3%/3 mm, ali s obzirom da ArcCHECK omogućuje finiju usporedbu, klinički se kriterij promijenio.

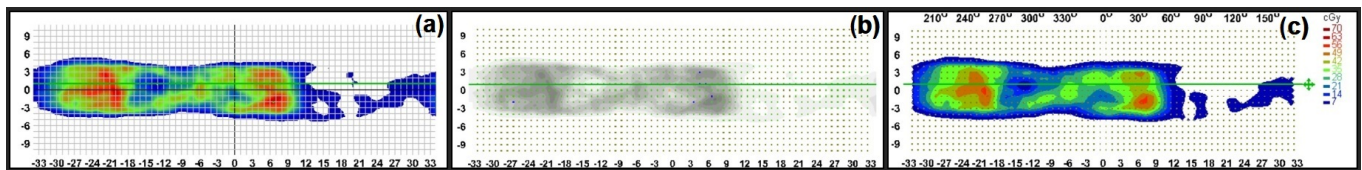
⁸ Nije doslovno ista raspodjela. Pri rotaciji može doći do mehaničkog pomicanja i glave uređaja i EPID držača što može uzrokovati razlike u mjerenju.



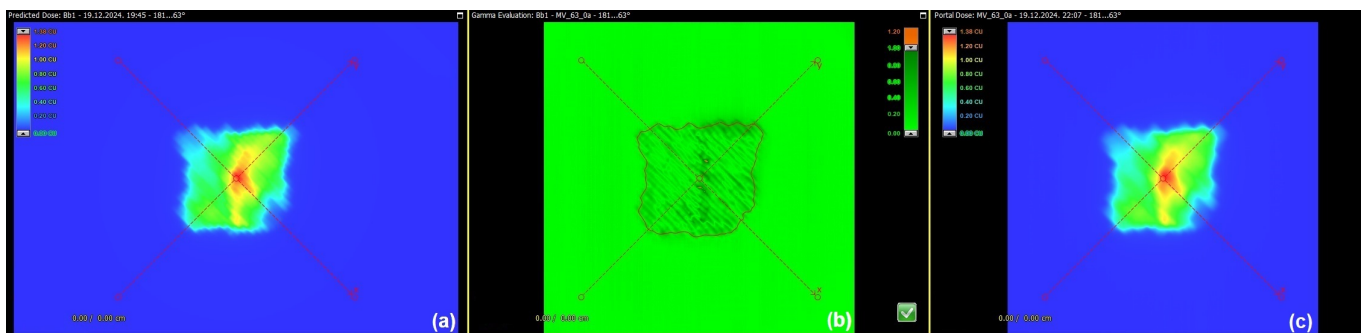
Slika 6: Raspodjele doza te njihova usporedba za mjerenje IMRT plana pomoću ArcCHECK-a. Radi se o lokalnoj gama analizi s 2%/2 mm kriterijem. Prag je 10%. (a) izračunata raspodjela doze (b) usporedba dviju raspodjela (c) izmjerena raspodjela doze. Svaka boja na raspodjeli odgovara specifičnoj vrijednosti doze izraženoj u cGy što je prikazano na skali u desnom gornjem kutu slike. Na sve se tri slike s donje strane mjere stupci, s lijeve strane redovi, a s gornje strane odgovarajući ArcCHECK kutovi. Na slikama se nalaze dvije raspodjele. Desna raspodjela je uglavnom rezultat ozračivanja ArcCHECK-a prvim IMRT poljem. Niskodozni dio desne raspodjele je posljedica ozračivanja tog dijela ArcCHECK-a pri ozračivanju drugim IMRT poljem. Isto tako je lijeva raspodjela uglavnom rezultat ozračivanja ArcCHECK-a drugim IMRT poljem.



Slika 7: Raspodjele doza te njihova usporedba za mjerenje drugog IMRT polja pomoću EPID-a. Radi se o globalnoj gama analizi s 2%/1 mm kriterijem. Prag je 5%. (a) izračunata raspodjela doze (b) usporedba dviju raspodjela (c) izmjerena raspodjela doze. Skala na sl. 7(b) određuje prag γ vrijednosti, a skale na sl. 7(a) i sl. 7(c) povezuju boju na raspodjeli s tokom energije izraženim u *calibrated units*, CU. Okviri slika su rubovi polja. Na slikama je označen i koordinatni sustav raspodjela doza. On ukazuje na položaj kolimatora, tj. os x je u smjeru kretanja MLC listića.



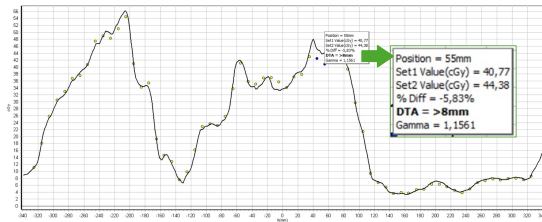
Slika 8: Raspodjele doza te njihova usporedba za mjerenje VMAT plana pomoću ArcCHECK-a. Radi se o globalnoj gama analizi s 3%/2 mm kriterijem. Prag je 10%. (a) izračunata raspodjela doze (b) usporedba dviju raspodjela (c) izmjerena raspodjela doze. Svaka boja na raspodjeli odgovara specifičnoj vrijednosti doze izraženoj u cGy što je prikazano na skali u desnom gornjem kutu slike. Na sve se tri slike s donje strane mjere stupci, s lijeve strane redovi, a s gornje strane odgovarajući ArcCHECK kutovi. Na slikama se nalazi razlivena raspodjela doze kao rezultat istovremenog kruženja i zračenja u VMAT tehnici. Niskodozni dio raspodjele uz desni rub je izlazno zračenje koje su diode na suprotnoj strani valjka detektirale.



Slika 9: Raspodjele doza te njihova usporedba za mjerenje prvog VMAT luka pomoću EPID-a. Radi se o globalnoj gama analizi s 2%/2 mm kriterijem. Prag je 5%. (a) izračunata raspodjela doze (b) usporedba dviju raspodjela (c) izmjerena raspodjela doze. Skala na sl. 9(b) određuje prag γ vrijednosti, a skale na sl. 9(a) i sl. 9(c) povezuju boju na raspodjeli s tokom energije izraženim u *calibrated units*, CU. Okviri slika su rubovi polja. Na slikama je označen i koordinatni sustav raspodjela doza. On ukazuje na položaj kolimatora, tj. os x je u smjeru kretanja MLC listića.

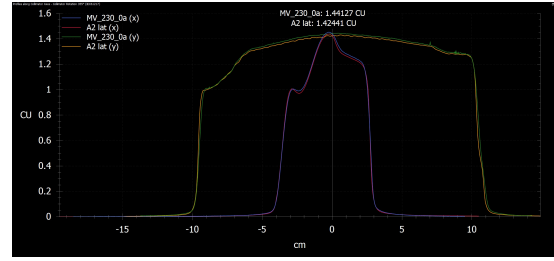
B. Profili

Točno odstupanje izmjerene vrijednosti od izračunate prikazuje se na tzv. profilima. Na sl. 10 nalazi se profil za globalnu gama analizu mjerenja VMAT plana pomoću ArcCHECK-a s 3%/2 mm kriterijem. Profil je dobiven u ArcCHECK-ovom programu SNCPatient. Profil daje uvid u svaki red ili supac dioda zasebno. Red ili stupac prikazan na profilu istaknut je zelenom linijom kakva se može vidjeti na sl. 6 i sl. 8. Točke na sl. 10 prikazuju izmjerene vrijednosti, a crna linija izračunate vrijednosti doze. Iznosi doze nalaze se u cGy na y osi, a na x osi nalazi se udaljenost dioda od centralne diode u mm. Centralna se dioda nalazi na centralnoj osi ulaznog snopa zračenja kad je glava uređaja postavljena na 0°. Osim grube vizualizacije odstupanja izmjerenih vrijednosti od izračunatih, profil omogućava i uvid u odstupanje svakog mjerenja zasebno. U TPS-u postoji mogućnost označavanja svakog mjerenja, što otvara zaseban prozor s gama analizom označenog mjerenja. Primjer takvog prozora, uvećan i uokviren u zeleni okvir nalazi se na sl. 10.



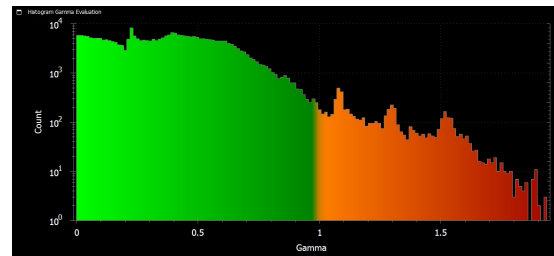
Slika 10: Profil za globalnu gama analizu mjerenja VMAT plana pomoću ArcCHECK-a s 3%/2 mm kriterijem. Na x osi nalazi se udaljenost dioda od centralne diode u mm, a na y osi nalaze se iznosi doze u cGy. Crna linija na grafu predstavlja izračunate vrijednosti doze, a točke predstavljaju izmjerene vrijednosti. Uvećan prozor u zelenom okviru daje detalje gama analize za odabranu točku raspodjele.

Na sl. 11 nalazi se profil za globalnu gama analizu mjerenja drugog IMRT polja pomoću EPID-a s 2%/1 mm kriterijem. Profil je dobiven u programu Eclipse. Na grafu se nalaze četiri linije. „A2“ linije (žuta i crvena) odnose se na izračunatu raspodjelu, dok se „MV“ linije (plava i zelena) odnose na izmjerenu raspodjelu. Već je spomenuto da se na sl. 7 i sl. 9 nalaze koordinatni sustavi raspodjela doza. Crvena i plava linija uspoređuju izračunatu i izmjerenu raspodjelu duž x osi, dok žuta i zelena uspoređuju izračunatu i izmjerenu raspodjelu duž y osi. Zato se na x osi grafa na sl. 11 nalazi udaljenost od ishodišta koordinatnog sustava u cm. Razlika u dozama kod EPID-a izražava se u *calibrated units* (y os na sl. 11), tj. uspoređuju se intenziteti toka energije. Za proučavanje bilo kojeg dijela raspodjela TPS omogućava pomicanje ishodišta koordinatnog sustava.



Slika 11: Profil za globalnu gama analizu mjerenja drugog IMRT polja pomoću EPID-a s 2%/1 mm kriterijem. „A2“ linije (žuta i crvena) odnose se na izračunatu raspodjelu, dok se „MV“ linije (plava i zelena) odnose na izmjerenu raspodjelu. Crvena i plava linija uspoređuju izračunatu i izmjerenu raspodjelu duž x osi iz koordinatnog sustava raspodjele sa sl. 7, dok žuta i zelena uspoređuju izračunatu i izmjerenu raspodjelu duž y osi iz koordinatnog sustava sa sl. 7. Na x osi nalazi se udaljenost od ishodišta koordinatnog sustava u cm, a na y osi uspoređuju se intenziteti toka energije u CU.

C. γ histogram



Slika 12: Histogram γ vrijednosti u globalnoj gama analizi mjerenja drugog IMRT polja pomoću EPID-a s 2%/1 mm kriterijem. Na x osi nalaze se vrijednosti koje je γ poprimila, a na y osi nalazi se broj ponavljanja tih vrijednosti. Zelenom su bojom označene prihvatljive gama vrijednosti, vrijednosti manje od 1, a narančastom bojom označene su neprihvatljive gama vrijednosti, one veće od 1.

Još jedno svojstvo Eclipse programa je da u slučaju mjerenja pomoću EPID-a daje statističku analizu gama vrijednosti za svaki kriterij. Na sl. 12 nalazi se histogram generiran u globalnoj gama analizi drugog IMRT polja s 2%/1 mm kriterijem. Eclipse program istovremeno daje uvid u raspodjelu na sl. 7, profil na sl. 11 i histogram na sl. 12. Također TPS daje srednje i maksimalne vrijednosti γ , $\bar{\gamma}$ i γ_{MAX} , za pojedini kriterij koje su indikatori. Npr. ako neki plan ima dobru prolaznost, ali je vrijednost γ_{MAX} jako velika, to je indikacija da se radi o izrazito toplim ili hladnim točkama. Takva situacija utječe na kliničku odluku. Također, ako je prolaznost dobra ali je $\bar{\gamma} \approx 1$, to može implicirati da nešto nije uredu s kalibracijom Halcyona ili EPID-a.

Tablica I: Tablica s prolaznostima za IMRT mjerenja.

ArcCHECK					
Kriterij	3%/3 mm, globalno	3%/2 mm, globalno	2%/3 mm, globalno	2%/2 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno
Prolaznost	98.1%	95.9%	95.9%	92.8%	84.7%
EPID, prvo polje					
Kriterij	2%/2 mm, globalno	2%/1 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno	2%/1 mm, lokalno	
Prolaznost	100.0%	91.1%	99.9%	86.9%	
EPID, drugo polje					
Kriterij	2%/2 mm, globalno	2%/1 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno	2%/1 mm, lokalno	
Prolaznost	100.0%	97.9%	99.9%	97.0%	

Tablica II: Tablica s prolaznostima za VMAT mjerenja.

ArcCHECK					
Kriterij	3%/3 mm, globalno	3%/2 mm, globalno	2%/3 mm, globalno	2%/2 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno
Prolaznost	99.6%	98.9%	99.1%	97.4%	87.7%
EPID, prvi luk					
Kriterij	2%/2 mm, globalno	2%/1 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno	2%/1 mm, lokalno	
Prolaznost	99.9%	96.5%	99.9%	94.2%	
EPID, drugi luk					
Kriterij	2%/2 mm, globalno	2%/1 mm, globalno	2%/2 mm, lokalno	2%/1 mm, lokalno	
Prolaznost	99.9%	96.9%	99.7%	92.3%	

D. Prolaznosti

U tablicama 1 i 2 navedene su prolaznosti za mjerenja pomoću ArcCHECK-a i EPID-a. Prva se tablica odnosi na prvi plan, tj. ozračivanje IMRT tehnikom, a druga se tablica odnosi na drugi plan, tj. ozračivanje VMAT tehnikom. Za svako polje mjereno pomoću EPID-a navedene su prolaznosti za 2%/2 mm i 2%/1 mm lokalne i globalne kriterije, dok su kriteriji za mjerenja pomoću ArcCHECK-a 3%/3 mm, 3%/2 mm, 2%/3 mm i 2%/2 mm globalno te 2%/2 mm lokalno. Navedene su podatke generirali programi SNCPatient (za mjerenja pomoću ArcCHECK-a) i Eclipse (za mjerenja pomoću EPID-a).

V. RASPRAVA

Za dozimetrijsku provjeru planova zračenja provedena je gama analiza mjerenja izvedenih pomoću ArcCHECK-a i EPID-a. Dvije se dozimetrijske provjere, ozračivanje ArcCHECK-a i ozračivanje EPID-a, razlikuju na više načina. Prva je razlika u samom izvođenju mjerenja. ArcCHECK nije integriran u sam Halcyon, već je potrebno uložiti više vremena za pravilno postavljanje matičnog detektora na ležaj Halcyona. Samo postavljanje ArcCHECK-a unosi dodatne nepouzdanosti u dozimetrijsku provjeru. Nepouzdanost isto tako unosi razmaknutost dioda od 1 cm pa je izmjerena raspodjela rezultat interpolacije. Nadalje, dozimetrijska provjera ArcCHECK-om se sastoji od gama analize ukupnog plana. Bez obzira na to pri dozimetrijskoj provjeri plana zračenja poželjno

je napraviti gama analizu i ArcCHECK mjerenja i EPID mjerenja jer daju različite informacije. Npr. prednost ArcCHECK-a je što omogućuje dozimetrijsku provjeru 3D raspodjele doze, dok je EPID primarno 2D detektor.

Prvi korak u dozimetrijskoj provjeri bio je ozračivanje ArcCHECK-a s prvim planom. Odmah je uočeno da točke uz rub prvog polja [desna raspodjela na sl. 6(b)] ne zadovoljavaju kriterije te se pojavila sumnja u pozicioniranje ArcCHECK-a. Dozimetrijska je provjera zatim zaustavljena kako bi se ArcCHECK ponovno namjestio. Pri ponovljenom mjerenju dobiveni su gotovo isti rezultati čime je ta sumnja otklonjena. Kod usporedbe raspodjela za ArcCHECK mjerenja koje su priložene u radu [sl. 6(b) i sl. 8(b)], a i na preostalim usporedbama, većinom su diode koje ne zadovoljavaju kriterije plave boje. To znači da je uglavnom izmjerena doza manjeg iznosa od izračunate. Isto se može vidjeti i na sl. 10 gdje je izmjerena doza označene točke 40.77 cGy, a izračunata doza je 44.38 cGy. Uobičajeno je da se pojavljuju i crvene i plave točke pri usporedbi. Stvar je u tome da predaja zračenja linearnih akceleratora, uključujući Halcyona, varira. Razlika između planirane i predane doze može biti i do 2%. Kako bi se to izbjeglo, svaki se dan vrši provjera. Tijekom mjerenja u ovom radu, Halcyon je predavao dozu manju za 0.5% od planirane.

Kod profila za EPID mjerenje (sl. 11) potrebno je komentirati razliku između izračunate i izmjerene doze u y smjeru, tj. smjeru okomitom na gibanje MLC listića. Žuta linija prikazuje izračunatu dozu, dok zelena linija prikazuje izmjerenu dozu. Na zelenoj se liniji uočavaju oštri vrhovi. To su tzv. "mrtvi pikseli". Radi se o odgovoru samog EPID-a na zračenje. Ti su "mrtvi pikseli" poznati iz kalibracije samog EPID-a koja se vrši jednom mjesečno te se oni isključuju iz gama analize.

Što se tiče γ histograma, rezultati su zadovoljavajući. Sve su $\bar{\gamma}$ vrijednosti manje od 0.5 te nema ekstremnih γ_{MAX} vrijednosti.

Pri analizi prolaznosti (navedenih u tablici 1 i tablici 2) treba uzeti u obzir samu tehniku ozračivanja. U IMRT tehnici se zračila cijela (desna) dojka, a u VMAT tehnici se dodatno ozračivao CTV. To znači da je polje zračenja u slučaju VMAT tehnike manje, tj. manji broj točaka se analizira pa je i ta analiza rigoroznija.

Za ArcCHECK mjerenja se iz tablica daju isčitati veće prolaznosti za VMAT tehniku u odnosu na IMRT tehniku. S jedne strane, to je posljedica usrednjavanja greške pozicioniranja u VMAT planovima. Kod VMAT tehnike, glava uređaja s izvorom zračenja kruži oko ArcCHECK-a i istovremeno zrači, pri čemu dolazi do "razmazivanja doze". Na taj se način prikrivaju neka odstupanja u planu. S druge strane, prolaznosti mjerenja IMRT plana pomoću ArcCHECK-a su netipično niske. Uzrok je vrlo složen plan zračenja. Uobičajeno je da plan zračenja cijele dojke IMRT tehnikom ima oko 500 monitorskih jedinica, a ovaj plan ih je imao 760. Ulogu igra i sam oblik CTV-a. U ovom je slučaju CTV vrlo tanak i konkavan pa je i TPS manje točan.

Kao što je prije spomenuto, usporedbom 3%/2 mm i

2%/3 mm prolaznosti ArcCHECK mjerenja doznaje se je li veće odstupanje u razlikama u dozi ili je veće odstupanje u DTA. U slučaju prvog plana prolaznosti su istog iznosa, što znači da su neslaganja između izračunate i izmjerene raspodjele doza jednako prisutna u oba kriterija, razlici u dozama i DTA. U drugom se mjerenju prolaznosti razlikuju. Prolaznost globalne gama analize s 3%/2 mm kriterijem je 98.9%, dok je prolaznost globalne gama analize s 2%/3 mm kriterijem 99.1%. Manja je prolaznost za strožiji DTA kriterij, znači da veći udio neslaganja između izračunate i izmjerene doze ne zadovoljava DTA uvijet.

Kao što je prije rečeno, EPID je fiksna dio Halcyona i zračenje na njega upada okomito. To opravdava zahtjevanje velike prostorne točnosti i prolaznosti od 95%. Na temelju podataka iz tablice 1 zaključujemo da EPID mjerenja prvog IMRT polja ne zadovoljavaju lokalnu gama analizu s 2%/1 mm kriterijem. To je posljedica *tongue and groove* učinka. On dovodi do povećanja apsorbirane doze u primjenama MLC-a. Do njega dolazi zbog preklapanja susjednih listića MLC-a, čime se ograničava propuštanje zračenja između listića. Različite kombinacije tih udubljenja i izbočenja propuštaju različite količine zračenja. Zbog složenosti IMRT plana u ovom radu, slaganje između izračunate i izmjerene raspodjele na rubovima bilo je teško postići. *Tongue and groove* efekt se može primijetiti na sl. 7(b) gdje kriterije ne zadovoljavaju točke u gornjem i donjem rubu polja.

U tablicama se pojavljuju isti kriteriji za ArcCHECK i EPID mjerenja. To su 2%/2 mm kriteriji i za globalnu i za lokalnu gama analizu. Proizvođač ne preporuča lokalnu gama analizu ArcCHECK mjerenja. S obzirom da pri mjerenju diode, osim upadnog zračenja detektiraju i izlazno zračenje, potrebno je postaviti visoki prag, a onda lokalna gama analiza gubi smisao. U ovom je radu lokalna gama analiza provedena u edukacijske svrhe. Za IMRT metodu prolaznost ArcCHECK mjerenja u slučaju globalne gama analize iznosi 92.8%. Kod EPID-a za oba IMRT polja, u slučaju globalne gama analize prolaznost je 100%, a u slučaju lokalne gama analize je 99.9%. Za VMAT metodu prolaznost ArcCHECK mjerenja, u slučaju globalne gama analize, iznosi 97.4%. Kod EPID-a za oba IMRT polja, u slučaju globalne gama analize, prolaznost je 99.9%, a u slučaju lokalne gama analize je 99.9% za 2%/2 mm kriterij te 94.2% za 2%/1 mm kriterij. Glava uređaja s izvorom se giba, pri čemu dolazi do pomaka uzrokovanih npr. utjecajem gravitacije. ArcCHECK, koji miruje na ležaju i nije vezan za samu rotaciju, detektira te pomake uzrokovane kruženjem glave uređaja i mjerenja pomoću ArcCHECK-a onda imaju niže prolaznosti. EPID koji kruži s glavom uređaja ima iste pomake kao i sama glava te oni ostaju nedetektirani, što rezultira višim prolaznostima.

Da bi planovi bili prihvatljivi, moraju biti zadovoljeni svi klinički kriteriji prolaznosti. To znači da za ArcCHECK mjerenja izračunata i izmjerena raspodjela doze trebaju se slagati u minimalno 95% točaka u slučaju globalne gama analize s 3%/2 mm kriterijem, dok je kod

EPID mjerenja u pitanju globalna gama analiza s 2%/2 mm kriterijem. Rezultati u tablicama 1 i 2 potvrđuju ispravnost oba plana zračenja.

VI. ZAKLJUČAK

Sa zračenjem pacijenata u radioterapiji raka dojke fotonskim snopovima, može se započeti ukoliko su provedene provjere kvalitete plana zračenja i rada uređaja. U ovom radu su provedene i analizirane provjere dviju radioterapijskih tehnika, IMRT i VMAT. Za provjeru svakog plana upotrijebljeni su matrični detektor cilindričnog oblika (ArcCHECK) i elektronički slikovni portalni uređaj (EPID) te su za usporedbu izračunatih i mjerenih raspodjela apsorbiranih doza provedene tzv. gama analize. Pokazano je da namještanje ArcCHECK-a unosi dodatnu nepouzdanost u mjerenju, ali isto tako on može dati uvid u odstupanja koja su uzrokovana gibanjem glave uređaja. EPID s druge strane detektira odstupanja MLC listića te omogućuje rigorozniju gama analizu uz strožije kriterije. S obzirom da dvije metode koriste različite programe, Eclipse i SNCPatient, iz jedne doznajemo statistiku γ vrijednosti, a iz druge doznajemo je li odstupanje većinski uzrokovano razlikom u dozi ili DTA. Na rezultate mogu utjecati i kalibracija EPID-a, zračenje Halcyona i složenost plana. Kako svaka od metoda ima svoje jedinstvene prednosti, njihova kombinacija omogućava sveobuhvatnije osiguranje kvalitete.

VII. ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Tomislavu Bokuliću i kolegama mag. phys. Andrei Murković i mag. phys. Miljenku Murkoviću iz KBC Zagreb na uloženom vremenu i trudu, na edukaciji i stručnoj kontroli za vrijeme mojih mjerenja te na korisnim smjernicama za pisanje seminara.

-
- [1] M. Miften *et al.*: *Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218*. Medical physics, 2018, 45.4: e53-e83.
 - [2] Lim, Tze Yee, *et al.*: *Characterization of the HalcyonTM multileaf collimator system*. Journal of applied clinical medical physics, 2019, 20.4: 106-114
 - [3] D. A. Low, W. B. Harms, S. Mutic, and J. A. Purdy: *A technique for the quantitative evaluation of dose distributions*. Medical physics, 1998, 25.5: 656-661.
 - [4] E.B. Podgorsak: *Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students* (2005)
 - [5] D. Létourneau, J. Publicover, J. Kozelka, D. J. Moseley, D. A. Jaffray: *Novel dosimetric phantom for quality assurance of volumetric modulated arc therapy*. Medical physics, 2009, 36.5: 1813-1821.