

Praca poglądowa/Review paper

Porównanie technik planowania radioterapii w nowotworze piersi

*Comparison of radiotherapy planning techniques for breast cancer*Marta Paluszyńska¹, Olga Bąk¹, Patrycja Borowska¹, Sara Styś¹¹ Zakład Fizyki Medycznej, Wielkopolskie Centrum Onkologii, Poznań, Polska**Streszczenie**

Radioterapia jest integralną częścią kompleksowego leczenia raka piersi, który stanowi ponad 20% wszystkich zachorowań na nowotwory wśród kobiet w Polsce. Wraz z postępem technologicznym, rozwijane są metody zarówno poprawiające skuteczność leczenia i komfort pacjentek jak i ograniczające toksyczność terapii. Najpopularniejszą techniką napromieniania w przypadku nowotworu piersi jest trójwymiarowa radioterapia konformalna (3DCRT, ang. Three-Dimensional Conformal Radiotherapy), gdyż zapewnia najniższe dawki promieniowania zaabsorbowane przez narządy kontrlateralne. Techniki dynamiczne, w porównaniu ze statycznymi, zapewniają w przypadku nowotworów piersi bardziej jednorodny rozkład dawki w objętości tarczowej (PTV, ang. Planning Target Volume), ale wyższe dawki w narządach krytycznych (OAR, ang. Organ at Risk). Coraz większą popularnością cieszy się metoda hybrydowa łącząca zalety planów statycznych i dynamicznych.

Celem pracy było porównanie czterech technik napromieniania piersi: 3DCRT, obrotowej z modulacją intensywności dawki (VMAT, ang. volumetric modulated arc therapy), B-VMAT (ang. Butterfly VMAT) tzw. motyl, w którym emisja wiązki terapeutycznej w pewnym zakresie kątowym łuku jest zablokowana oraz techniki hybrydowej łączącej w jednym planie leczenia pola realizowane techniką 3D i VMAT.

Dla grupy 11 pacjentek przygotowano w systemie planowania leczenia (TPS, ang. Treatment Planning System) Eclipse (Varian Medical Systems, Palo Alto, USA) i porównano plany leczenia dla każdej z omawianych technik. Oceniono rozkłady dawek, histogramy dawka-objętość (DVH, ang. Dose Volume Histogram) oraz dawki średnie w narządach krytycznych: płucach, płucu kontrlateralnym, sercu oraz zdrowej piersi.

Na podstawie analizy DVH, stwierdzono, że wszystkie analizowane plany leczenia były klinicznie akceptowalne. Za najkorzystniejsze pod względem dawek deponowanych w OAR można uznać plany leczenia techniką 3DCRT. Jednocześnie należy zauważyć, że w technice hybrydowej dawki te są jedynie nieznacznie wyższe. Dla planów VMAT zaobserwowano zwiększenie procentowych objętości narządów krytycznych objętych izodozami niskich dawek, zwłaszcza dla narządów kontrlateralnych. Zablokowanie emisji wiązki

Adres do korespondencji

Marta Paluszyńska

Zakład Fizyki Medycznej,

Wielkopolskie Centrum Onkologii, ul. Garbary 15, 61-866 Poznań, Polska

Telefon. +48 61 88 50 550

e-mail: marta.paluszynska@wco.pl

w części łuku, tj. zastosowanie techniki B-VMAT częściowo zniwelowało ten efekt, jednakże w ograniczonym zakresie. Dla tzw. „motyli”, podobnie jak w przypadku standardowych planów VMAT, objętości OAR, w których deponowane są niskie dawki promieniowania są zauważalnie wyższe niż dla planów 3DCRT i hybrydowych.

Hybrydowa technika napromieniania piersi stanowi dobrą alternatywę dla planów 3DCRT i może zostać wdrożona do zastosowania klinicznego, skracając czas realizacji planów leczenia na aparacie terapeutycznym i poprawiając tym samym komfort leczonych pacjentek.

Abstract

Radiotherapy is an integral part of the comprehensive treatment of breast cancer, which accounts for over 20% of all cancer cases among women in Poland. Along with technological progress, methods are developed that improve the effectiveness of treatment, patient comfort and reduce the toxicity of therapy. The most popular irradiation technique for breast cancer is Three-Dimensional Conformal Radiotherapy (3DCRT), as it provides the lowest doses of radiation absorbed by the contralateral organs. Compared to static techniques, dynamic techniques provide a more uniform dose distribution in the target volume (PTV, Planning Target Volume), but higher doses in the critical organs (OAR, Organ at Risk). The hybrid method combining the advantages of static and dynamic plans is becoming more and more popular.

The aim of the study was to compare four breast irradiation techniques: 3DCRT, rotary volumetric modulated arc therapy (VMAT), B-VMAT so-called butterfly, in which the emission of the therapeutic beam is blocked in a certain angular range of the arc, and a hybrid technique combining 3D and VMAT fields in one treatment plan.

For a group of 11 patients, plans were prepared in the Eclipse Treatment Planning System (TPS) (Varian Medical Systems, Palo Alto, USA) and compared for each of the discussed techniques. Dose distributions, Dose Volume Histograms (DVH) and mean doses in critical organs: lungs, contralateral lung, heart and healthy breast were evaluated.

Based on the DVH analysis, all treatment plans were found to be clinically acceptable. The 3DCRT treatment plans can be considered the most favorable in terms of doses in OAR. At the same time, it should be noted that in the hybrid technique these doses are only slightly higher. For the VMAT plans, an increase in the percentage of critical organ volumes covered by low dose isodoses was observed, especially for contralateral organs. Blocking the beam emission in the part of the arc in the B-VMAT technique partially offset this effect, but as in the case of VMAT, the OAR volumes in which low doses are deposited are noticeably higher than for the 3DCRT and hybrid plans.

The hybrid technique of breast irradiation is a good alternative to 3DCRT plans and can be implemented for clinical use, shortening the time of implementation of treatment plans on a medical accelerator and improving the comfort of treated patients.

Słowa kluczowe: planowanie leczenia, radioterapia, nowotwór piersi, 3DCRT, VMAT

Keywords: treatment planning, radiotherapy, breast cancer, 3DCRT, VMAT

Wstęp

W minionym półwieczu zachorowalność na nowotwory piersi w populacji Polek stale rosła. Obecnie udział nowotworów w tej lokalizacji w strukturze zachorowań onkologicznych to niemal 22,9%. Jest to druga najczęstsza przyczyna zgonów wśród pacjentek chorych na nowotwór w Polsce. Szacuje się, że rocznie raka piersi rozpoznaje się u 1,5 miliona kobiet na całym świecie, a około 400 tysięcy umiera z tego powodu [1,2].

W ostatnich latach skuteczność leczenia nowotworów piersi uległa znacznemu zwiększeniu dzięki lepszemu doborowi odpowiedniej techniki operacyjnej, nowym możliwościom leczenia systemowego oraz dokładniejszemu zrozumieniu podłoża choroby. Radioterapia jest integralną częścią kompleksowego leczenia raka piersi. Odgrywa ona zasadniczą rolę w ogólnym postępowaniu z pacjentami z nowotworem w tej lokalizacji - począwszy od wczesnych stadiów choroby do miejscowo zaawansowanych i przerzutowych. Na przestrzeni lat radioterapia piersi ewoluowała od trwającego 5-7 tygodni dwuwymiarowego leczenia

(bazującego na wykorzystaniu pól tangencjalnych wyznaczanych na podstawie 2D zdjęć rentgenowskich obszaru napromieniania) w zbiór technik, które nie tylko skracają czas trwania leczenia, ale także poprawiają współczynnik terapeutyczny poprzez zmniejszenie ostrej i przewlekłej toksyczności sercowej i płucnej oraz zwiększenie kontroli miejscowej. Najczęściej stosowanymi współcześnie technikami napromieniania piersi są trójwymiarowa radioterapia konformalna (3DCRT, ang. three-dimensional conformal radiotherapy), radioterapia z modulowaną intensywnością dawki (IMRT, ang. intensity modulated radiation therapy) i technika obrotowa z modulacją intensywności dawki (VMAT, ang. volumetric modulated arc therapy) [2,3].

W ostatniej dekadzie znacznie wzrosła świadomość dotycząca powikłań kardiologicznych, które mogą stanowić następstwo radioterapii piersi. W badaniu przeprowadzonym w latach 1958-2001 Darby i wsp. wykazali, że na każdy wzrost średniej dawki w sercu o 1 Gy ryzyko choroby wieńcowej wzrasta o 7,4% [4].

U kobiet poddanych radioterapii piersi popromienne zapalenie płuc w płucu po stronie leczonej występuje znacznie częściej niż w płucu przeciwnym. W przypadku młodych pacjentek, dawka promieniowania zdeponowana w zdrowej piersi może prowadzić do wyindukowania nowotworów wtórnych. W celu ochrony przylegających do objętości tarczowej narządów krytycznych, stosuje się technikę napromieniania piersi na głębokim wstrzymanym wdechu (DIBH, ang. deep inspiration breath hold), która jest kompatybilna zarówno z technikami 3DCRT, jak i IMRT oraz VMAT [5].

Ciągle udoskonalanie znanych już technik radioterapii oraz wprowadzanie nowych wynika z dążenia do maksymalnego obniżenia dawek zdeponowanych w narządach krytycznych (OARs, ang. Organs at Risk), przy jednoczesnym zachowaniu pożądanego pokrycia dawką zadaną objętości tarczowej (PTV, ang. Planning Treatment Volume) oraz uzyskanie jak najwyższej konformalności rozkładu dawki. Technikę 3DCRT wyróżnia stopień redukcji dawki zaabsorbowanej przez narządy kontrlateralne (piers i płuca). Wysoka jednorodność rozkładu dawki w objętości PTV charakteryzuje z kolei techniki dynamiczne. W planach IMRT i VMAT obserwuje się jednak większe objęcie niskimi dawkami promieniowania tkanek zdrowych w porównaniu z planami 3DCRT. Istnieje możliwość wdrożenia techniki hybrydowej, łączącej w jednym planie leczenia pola statyczne i dynamiczne. Pozwala to zachować kompromis między czasem leczenia a jednorodnością dawki w objętości PTV przy maksymalnym obniżeniu dawek w narządach krytycznych [6].

Cel

Radioterapia jest jednym z kluczowych elementów leczenia nowotworów piersi, które stanowią ponad 20% wszystkich zachorowań na nowotwory kobiet w Polsce. Celem pracy było porównanie czterech technik wykorzystywanych w radioterapii raka piersi: 3DCRT, dynamicznych: VMAT oraz B-VMAT i techniki hybrydowej pod względem rozkładów dawek, histogramów dawka-objętość oraz dawek w narządach krytycznych. Na tej podstawie oceniono, czy plany leczenia w technice dynamicznej lub hybrydowej mogą z powodzeniem zastąpić standardowo stosowane klinicznie plany statyczne.

Materiał i metody

Badanie przeprowadzono retrospektywnie na grupie 11 pacjentek z nowotworem piersi. Każda z nich miała wykonane skany tomograficzne z grubością warstwy 3mm, w pozycji leżącej na plecach, z wykorzystaniem dedykowanego do radioterapii skanera CT SOMATOM Definition AS (Siemens Medical Solutions, Erlangen, Niemcy). U osób leczonych metodą DIBH rejestrowano krzywą oddechową za pomocą zewnętrznego systemu bramkowania oddechowego (RPM, ang. Real-time Position Management) (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA) przeznaczonego do monitorowania oddechu w czasie rzeczywistym. Dla każdej pacjentki przygotowane zostały 4 plany leczenia przeznaczone do realizacji przez ten sam akcelerator liniowy Truebeam (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA) ze 120-listkowym kolimatorem z 40 listkami o szerokości 0,5 cm i 20 listkami o szerokości 1 cm w odległości izocentrum. Do przygotowania planów leczenia użyty został system planowania leczenia Varian Eclipse TPS ver. 16.1 (TPS, ang. Treatment Planning System) (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA) z anizotropowym algorytmem analitycznym (AAA, ang. Anisotropic Analytical Algorithm) z siatką obliczeniową o wymiarze 2,5 mm. Każdy plan leczenia został przygotowany w oparciu o wykonturowane przez lekarza radioterapeutę struktury PTV oraz narządów krytycznych. PTV obejmowały: piers (7 pacjentek), ścianę klatki piersiowej (2 pacj.), ścianę klatki piersiowej z węzłami

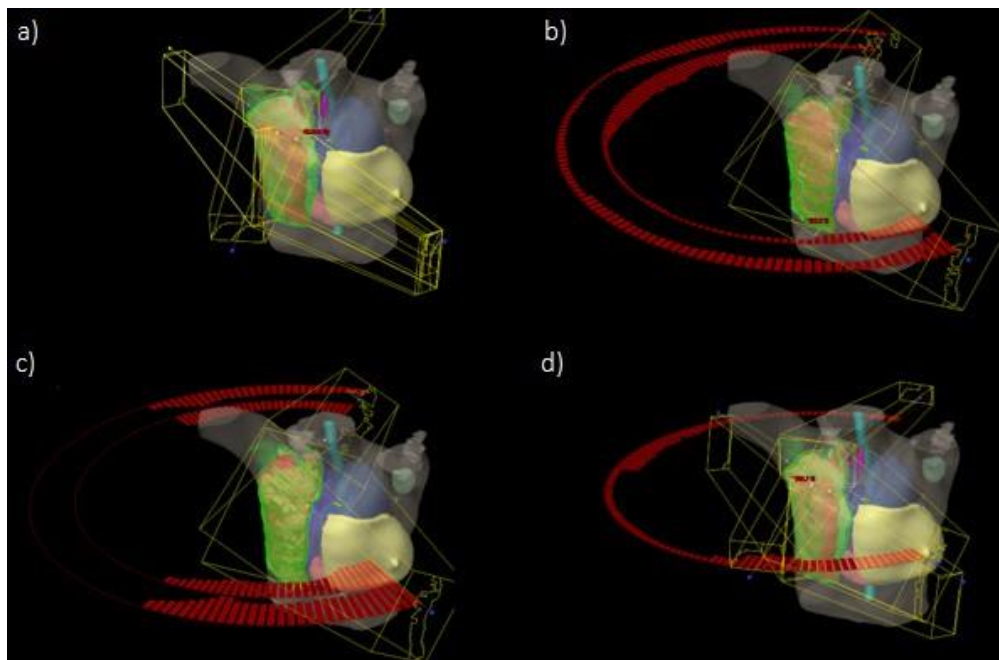
chłonnymi (2 pacj.). Na objętość tarczową zadane były dawki (odpowiednio: całkowita, frakcyjna): 45 Gy, 2,25 Gy (2 pacj.), 40,05 Gy, 2,67 Gy (7 pacj.) lub 54 Gy, 2,7 Gy (2 pacj.). Ze względu na efekt narastania dawki, objętość PTV u każdej pacjentki została odcięta o 0,3 cm od powierzchni ciała. Wykonturowane narządy krytyczne: serce, płuca oraz piersć zdrowa.

Plan leczenia w technice 3DCRT składa się z dwóch głównych wiązek tangencjalnych służących napromienianiu gruczołu piersiowego/ściany klatki piersiowej. W przypadku napromieniania węzłów chłonnych dodatkowo stosowane są wiązki w projekcji przednio-tylnej służące objęciu tego obszaru dawką terapeutyczną (rycina 1a). Wiązki obejmujące obszar nadobojczyka i dołu pachowego były lekko odchylone od kierunku AP-PA, tak aby ominąć w trakcie terapii szyjny odcinek rdzenia kręgowego. Efektywny potencjał przyspieszający zastosowanych wiązek terapeutycznych to w technice 3DCRT 6 lub 15 MV. W procesie planowania leczenia zastosowano metodę pola w polu (ang. field in field) czyli sekwencje dodatkowych podpól dopromieniających z kątów o takiej samej orientacji jak wiązki tangencjalne i przednio-tylne. Ich zadaniem była redukcja niejednorodności rozkładu dawki w objętości PTV. Radioterapia realizowana była techniką jednego izocentrum. W przypadku napromieniania gruczołu piersiowego lub ściany klatki piersiowej znajdowało się ono wewnątrz obszaru tarczowego w połowie piersi w osi długiej. W przypadku napromieniania piersi/ściany klatki piersiowej wraz z węzłami chłonnymi, izocentrum było zlokalizowane na granicy pól tangencjalnych i nadobojczykowo-pachowych. Kształt pól był formowany za pomocą kolimatora wielolistkowego MLC. W procesie planowania uwzględniona została też ruchomość oddechowa poprzez otwarcie listków MLC i odsunięcie szczęki kolimatora o ok. 3cm od granicy ciała pacjentki.

W planach leczenia wykonanych w technice VMAT zastosowano dwie wiązki półlukowe fotonów (obrotów głowicy akceleratora w kierunku zgodnym (CW, ang. clockwise) i przeciwnym (CCW, ang. counterclockwise) do ruchu wskazówek zegara) o potencjale przyspieszającym 6 MV (rycina 1b). Początek łuku odpowiadał wartości kąta głowicy dla wewnętrznej wiązki tangencjalnej z planu wykonanego techniką 3DCRT, a jego koniec sięgał wartości kąta głowicy 190° przy napromienianiu strony prawej i 170° dla strony lewej. Kolimator obracano o $\pm 30^\circ$. Izocentrum wiązek znajdowało się w połowie obszaru tarczowego wzdłuż w osi długiej pacjentki. W procesie optymalizacji ustalono parametry opisujące pożądany rozkład dawki w objętości PTV i OAR takich jak serce, płuca oraz piersć zdrowa. Uwzględniono także ruchomość oddechową pacjentki, poprzez dodanie wirtualnego bolusa w okolicy PTV wymuszającego pracę listków MLC w określonej odległości od granicy ciała pacjentki. Nie zastosowano ograniczenia liczby jednostek monitorowych MU, aby umożliwić maksymalne oszczędzenie narządów krytycznych.

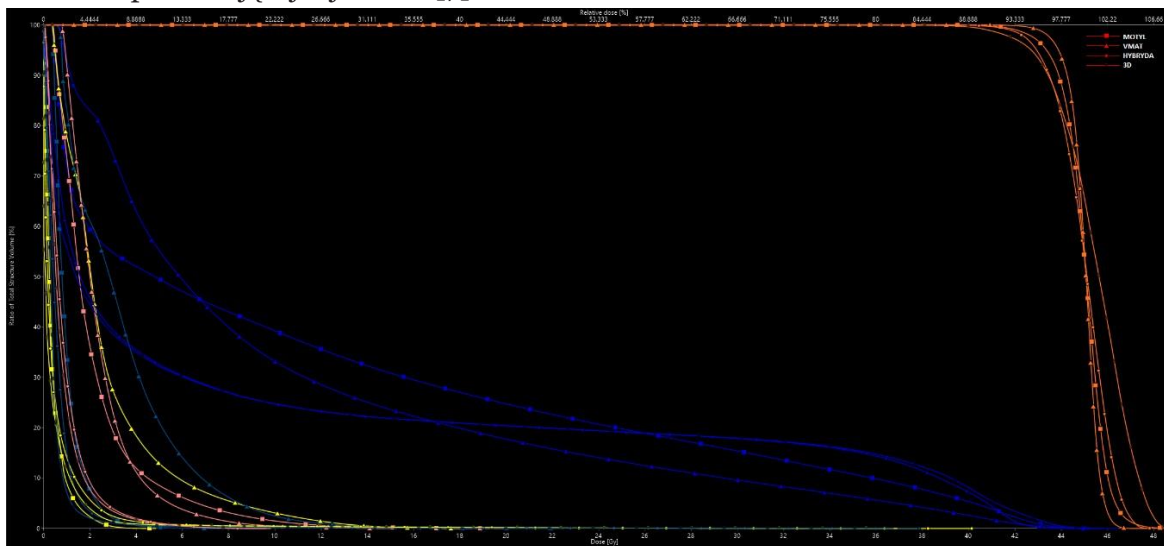
Dla każdej pacjentki, na bazie planów VMAT, zostały przygotowane plany leczenia w technice „motyl” (B-VMAT, ang. „butterfly VMAT”) (rycina 1c) poprzez dodanie sektorów wzbronionych (ang. avoidance sectors). Zastosowanie sektorów wzbronionych polega na zablokowaniu emisji wiązki promieniowania w określonym zakresie kątów podczas realizacji łuku. W przypadku planów leczenia w technice „motyl” dozwolone zostało promieniowanie w zakresie ok. 60° od każdego z końców łuku. W systemie planowania leczenia zostało to wygenerowane przez ustawienie sektora wzbronionego dla pozostałego zakresu kątów w każdym z łuków. Technika ta miała na celu ograniczenie dawek promieniowania deponowanych w narządach kontrlateralnych.

Plany leczenia w technice hybrydowej stanowią sumę dwóch planów: planu w technice 3DCRT (pola główne) oraz planu VMAT (zastosowanego w miejsce pól dopromieniających w technice field-in-field) (rycina 1d). Układ wiązek w planie obejmował 2 pola tangencjalne w przypadku napromieniania gruczołu piersiowego/ściany klatki piersiowej oraz ewentualnie 2 dodatkowe wiązki przednio-tylne w przypadku napromieniania piersi/ściany klatki piersiowej wraz z węzłami chłonnymi. Poprzez dobór odpowiedniej ilości jednostek monitorowych dla każdego z pól, dążono do uzyskania możliwie równomiernego pokrycia objętości PTV dawki zadanej. Tak opracowany plan stanowił bazę do optymalizacji planu w technice VMAT. Plan ten w technice VMAT oparty był o zastosowanie pojedynczej wiązki półlukowej o zakresie kątów głowicy od 181° do wartości kąta głowicy wewnętrznej wiązki tangencjalnej lub od kąta odpowiadającego wewnętrznej wiązce tangencjalnej do 180° dla radioterapii odpowiednio: prawo- i lewostronnej.



Ryc. 1. Trójwymiarowa wizualizacja geometrii wiązek a) dla techniki 3DCRT, b) dla techniki VMAT c) dla techniki B-VMAT oraz d) dla techniki hybrydowej.
 Źródło: materiały własne

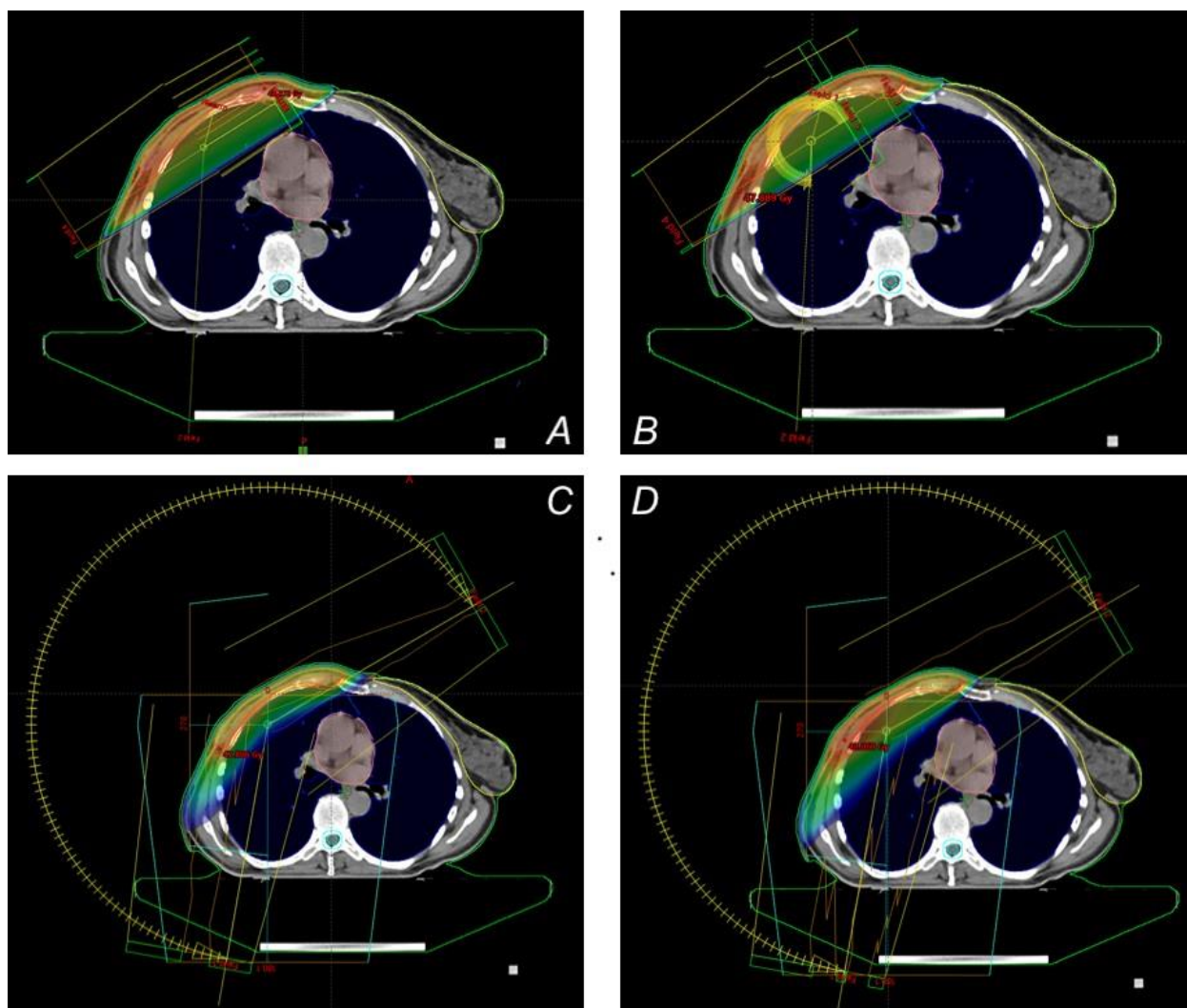
Plany leczenia poszczególnymi technikami zostały porównane między sobą pod kątem wybranych wartości dawek otrzymanych przez narządy krytyczne. Wykorzystano do tego celu histogram dawka – objętość (DVH, ang. Dose Volume Histogram). Przykładowy histogram porównawczy planów leczenia realizowanego 4 różnymi technikami dla tej samej pacjentki przedstawiono na rycinie 2. Oceniono procentową objętość płuc, w której zdeponowano dawkę 20Gy (V20Gy) i objętość piersi zdrowej, płuca kontrlateralnego oraz serca napromienionych dawką 5Gy (V5Gy). Porównano ponadto dawki średnie (D_{mean}) dla sumy płuc, płuca kontrlateralnego, zdrowej piersi oraz serca. Dodatkowo porównano plany pod kątem współczynnika konformalności (CI, ang. Conformity Index) oraz współczynnika gradientu (GI, ang. Gradient Index). Współczynnik CI określa stopień dopasowania kształtu izodoz do kształtu obszaru tarczowego, a współczynnik GI oznacza stosunek promienia kuli odpowiadającej izodozie połowy dawki zadanej do promienia kuli odpowiadającej tej dawce [7].



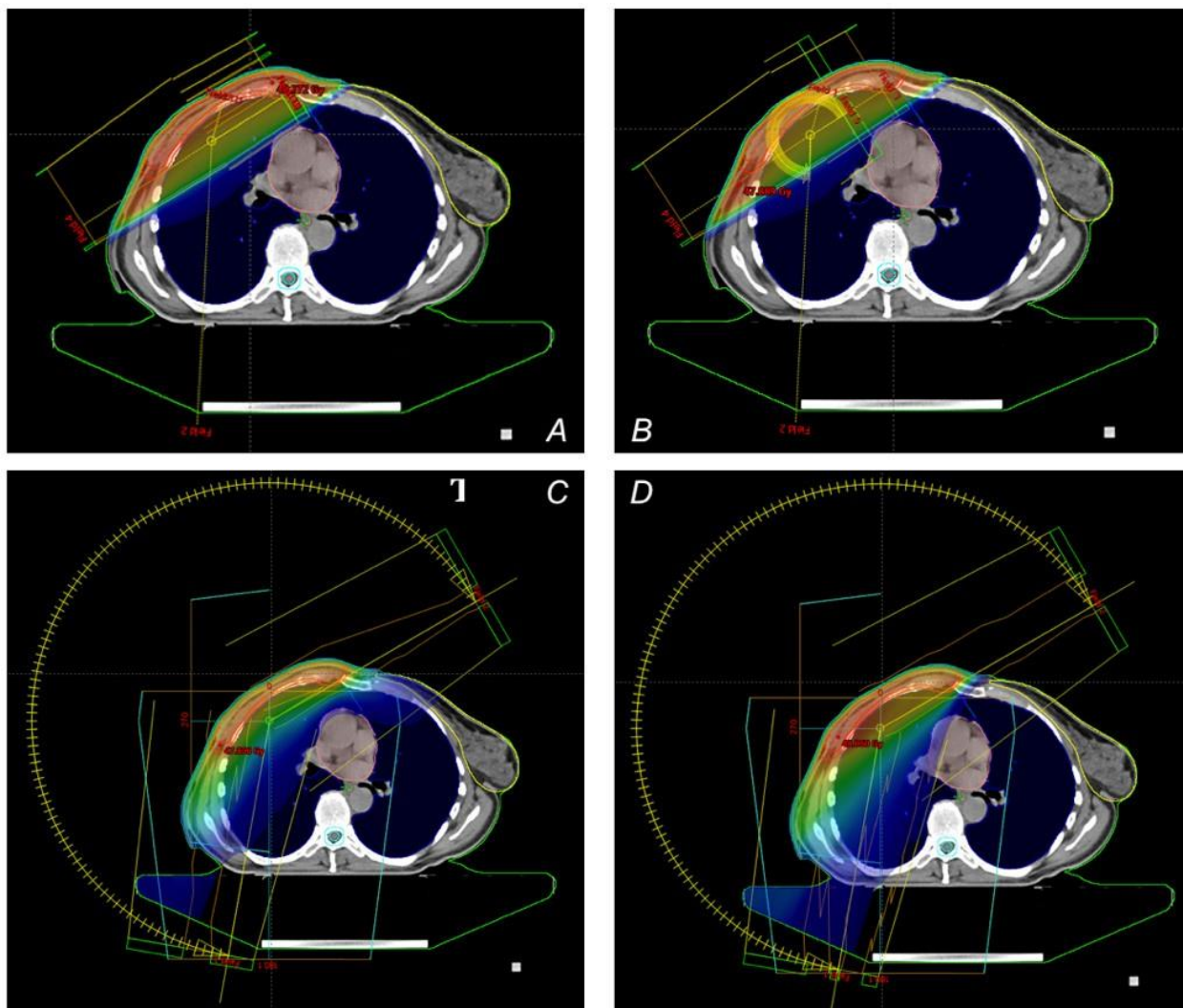
Ryc. 2. Histogram dawka-objętość przedstawiający: plan wykonany w technice 3DCRT $\circ$, technice VMAT $\blacktriangle$, technice B-VMAT $\blacksquare$, technice hybrydowej $\bullet$, dla następujących struktur: suma płuc (kolor niebieski), piersć zdrowa (kolor żółty, płuco kontrlateralne (kolor granatowy) oraz serce (kolor różowy). Źródło: materiały własne.

Wyniki i dyskusja

Dla wszystkich porównywanych technik leczenia uzyskano dla każdej z pacjentek plany akceptowalne klinicznie. Porównanie dawek 20 Gy i 5 Gy dla planów leczenia wszystkimi 4 porównywanymi technikami dla jednej pacjentki przedstawiono odpowiednio na ryc. 3A-D i 4A-D. Przekroje A ilustrują rozkład dawki dla planów 3DCRT, stanowiących plan odniesienia, jako stosowany w praktyce klinicznej. Przekroje B odpowiadają planom hybrydowym, C – VMAT, a D -B-VMAT. Zarówno dla rozkładu dawki 5 Gy, jak i 20 Gy nie są widoczne znaczne różnice pomiędzy planami 3DCRT a hybrydowym. W przypadku planów dynamicznych rozkłady dawki 20 Gy różnią się od rozkładu odniesienia w niewielkim stopniu, natomiast rozkłady dawki 5 Gy odbiegają znacząco od siebie. Można zaobserwować, że objętość tkanek pokrytych izodozą 5Gy jest znacząco większa w przypadku planów dynamicznych niż planów w technice 3D. Prawdopodobnie ta widoczna jest także w porównaniu histogramów dawka-objętość dla narządów krytycznych: płuc, serca, płuca kontralateralnego i piersi zdrowej. Ponadto, zaobserwowano, że rozkład niskich dawek deponowanych w zdrowej piersi oraz płucu kontralateralnym różni się pomiędzy planami w technice VMAT i B-VMAT na korzyść tych drugich, dowodząc skuteczności stosowania sektorów wzbronionych w optymalizacji planu. Potwierdza to analiza porównawcza DVH (ryc. 2).



Ryc. 3. Porównanie rozkładów dawki 20Gy dla technik napromieniania: 3DCRT (A), hybrydowej (B), VMAT (C) i B-VMAT (D).



Ryc. 4. Porównanie rozkładów dawki 5Gy dla technik napromieniania: 3DCRT (A), hybrydowej (B), VMAT (C) i B-VMAT (D).

Współczynniki konformalności (CI) oraz gradientu (GI) zostały wyznaczone dla objętości PTV analizowanych planów. Uśrednione wartości tych współczynników wraz z odchyleniem standardowym zostały przedstawione w tabeli 1.

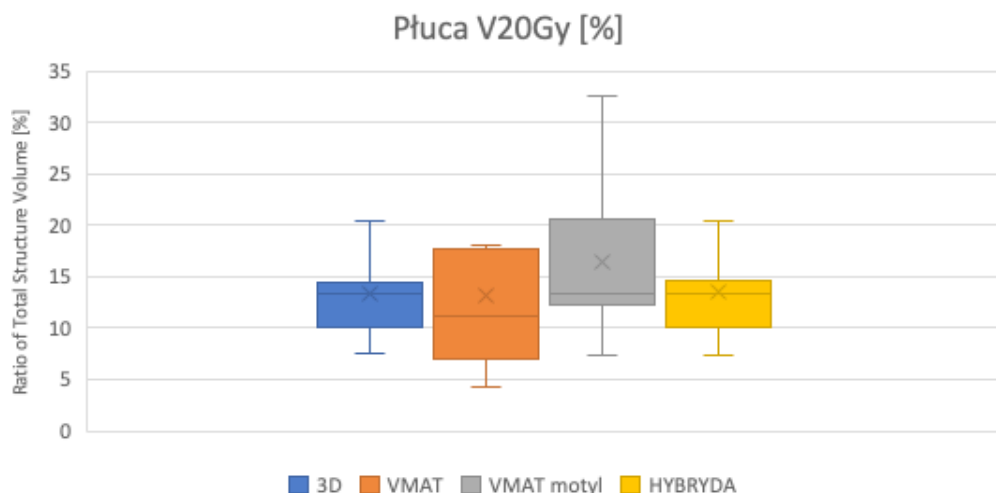
Tabela 1. Wartości średnie współczynnika konformalności (CI) oraz gradientu (GI) wraz z odchyleniem standardowym dla porównywanych technik.

	CI				GI [cm]			
	3D	VMAT	VMAT motyl	HYBRYDA	3D	VMAT	VMAT motyl	HYBRYDA
Średnia	0,962	0,680	0,706	0,676	2,623	3,948	4,040	3,273
Odchylenie standardowe	0,139	0,093	0,063	0,097	0,728	0,596	0,488	0,485

Wartość średnia CI ma niższe wartości dla planów dynamicznych niż dla planów 3DCRT, podobnie wartość współczynnika gradientu (tabela 1). Wartość gradientu dla planów dynamicznych jest wyższa niż dla planu statycznego, co wiąże się z mniejszym spadkiem dawki poza granicą PTV. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że współczynnik ten wyznaczany jest na podstawie izodozy odpowiadającej 50% dawki zadanej.

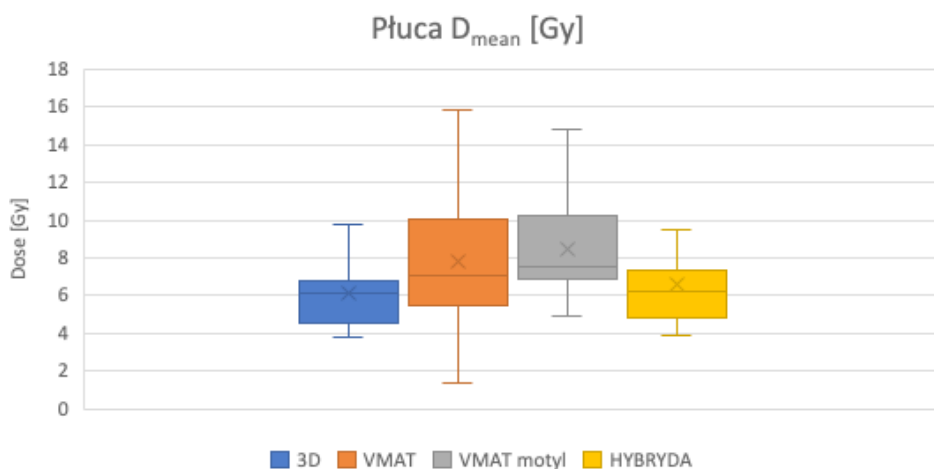
Nie pozwala on więc na ocenę szybkości spadku dawki w zakresie dawek wysokich. Wnioski z zestawienia wartości współczynnika GI dla różnych technik leczenia pokrywają się z wnioskami z porównania rozkładów dawek i analizy histogramów dla dawek niskich i średnich. Współczynnik GI przyjmuje wartości niższe dla planów 3D niż dla planów dynamicznych, co wskazuje na większy gradient dawki poza obszarem PTV w planach konformalnych. Odzwierciedla to pokrycie dawkami 5 i 20 Gy większej objętości tkanek w przypadku planów dynamicznych niż 3DCRT.

Na podstawie histogramów dawka-objętość ocenione zostały dawki w narządach krytycznych – płucach, sercu oraz zdrowej piersi. Ryc. 5 przedstawia dla każdej z technik wartości średnie wraz z maksymalnymi i minimalnymi procentowej objętości płuc, w której zdeponowana została dawka 20Gy. Wartość ta utrzymywała się na podobnym poziomie dla planów 3D ($13,291\% \pm 4,383\%$), VMAT ($13,236\% \pm 8,728\%$) oraz hybrydowych ($13,545\% \pm 4,453\%$), a najwyższa była dla planów B-VMAT ($16,391\% \pm 7,607\%$).



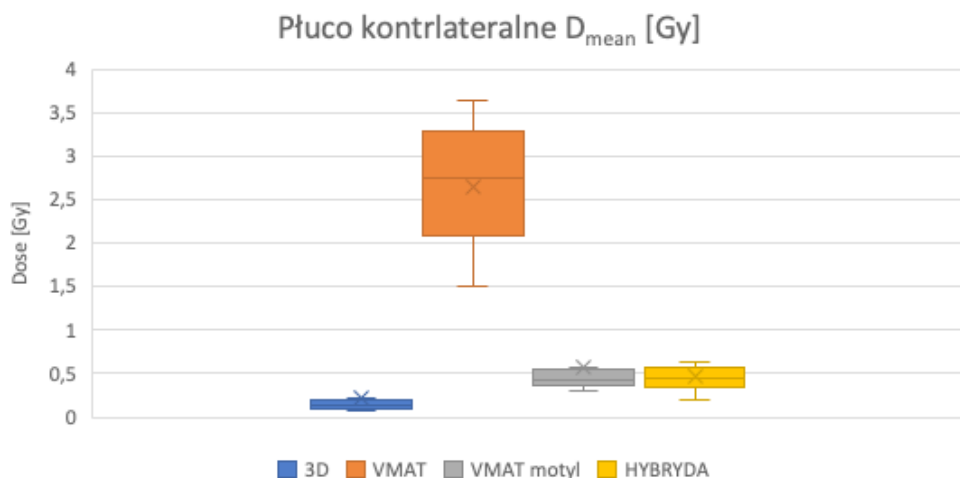
Ryc. 5. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi V20Gy w obu płucach dla różnych technik planowania.

Ryc. 6. przedstawia uśrednione wartości dawki średniej w płucach dla porównywanych technik. Utrzymują się one na podobnym poziomie dla planów 3D ($6,159\text{Gy} \pm 2,015\text{Gy}$) oraz hybrydowych ($6,573\text{Gy} \pm 2,271\text{Gy}$) i wzrastają dla planów VMAT ($7,780\text{Gy} \pm 3,771\text{Gy}$) najwyższą wartość osiągając dla planów B-VMAT ($8,475\text{Gy} \pm 2,982\text{Gy}$).

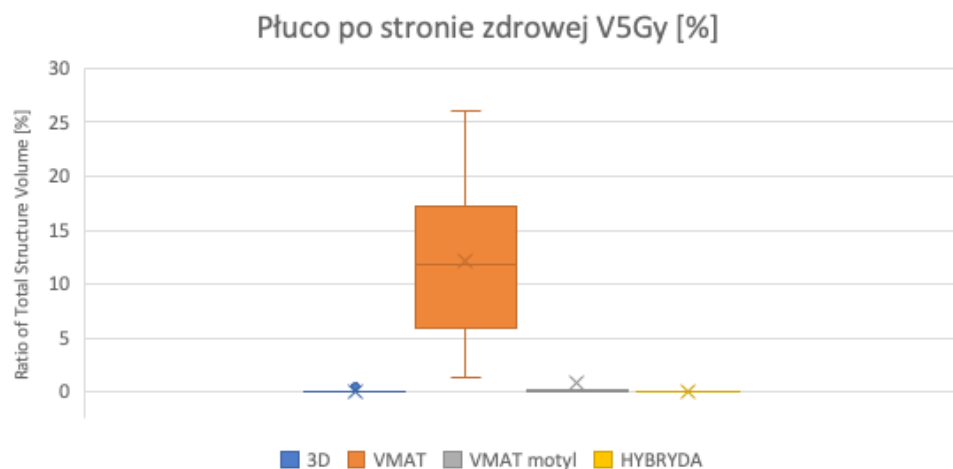


Ryc. 6. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi dawki średniej w obu płucach dla różnych technik planowania.

Średnie wartości D_{mean} w płucu kontrlateralnym zostały przedstawione na ryc. 7, natomiast ryc. 8 przedstawia zestawienie objętości tegoż OAR pokrytej izodozą 5 Gy w planach leczenia porównywanymi technikami. Zarówno dawka średnia, jak i objętość narządu pokryta izodozą 5 Gy są najwyższe dla planów w technice VMAT (odpowiednio: $2,646 \text{ Gy} \pm 0,730 \text{ Gy}$ i $12,109 \% \pm 8,027 \%$). Wielkości te osiągają najniższe wartości w planach 3DCRT (odpowiednio: $0,218 \text{ Gy} \pm 0,264 \text{ Gy}$ i $0,045 \% \pm 0,151 \%$). Na podstawie wykresów można zauważyć, że zastosowanie techniki „motyl” pozwala zredukować niskie dawki do poziomu zbliżonego do planów 3DCRT i hybrydowych [11], odbywa się to jednak kosztem wzrostu objętości płuca po stronie chorej objętej izodozą 20 Gy. Zastosowanie techniki hybrydowej pozwala natomiast na osiągnięcie dawek w narządach krytycznych porównywalnych do dawek w planie 3DCRT dla wszystkich porównanych poziomów izodoz [8-11].

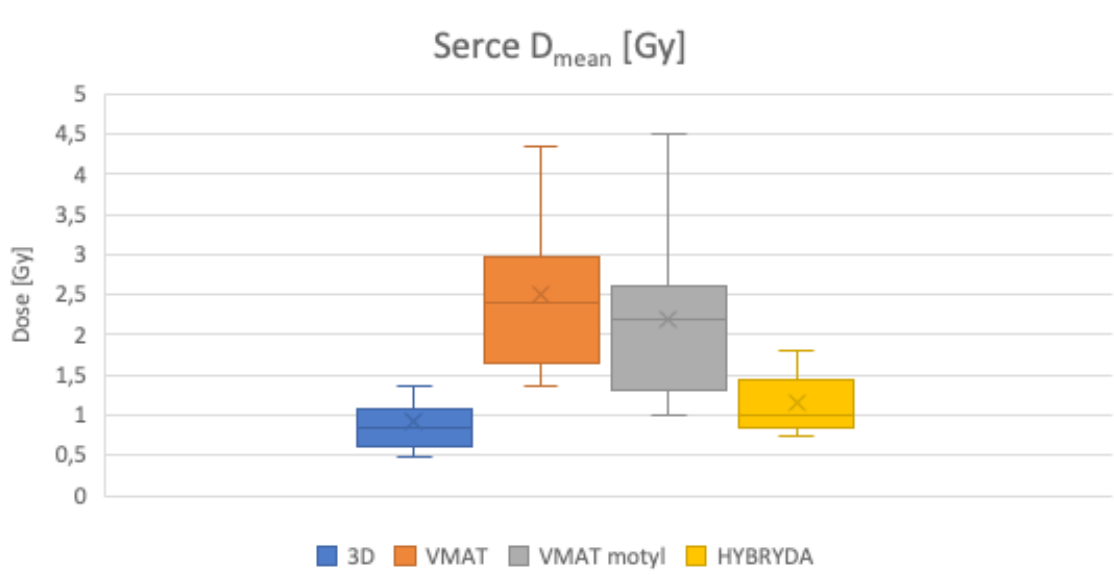


Ryc. 7. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi dawki średniej w płucu po zdrowej stronie dla różnych technik planowania.

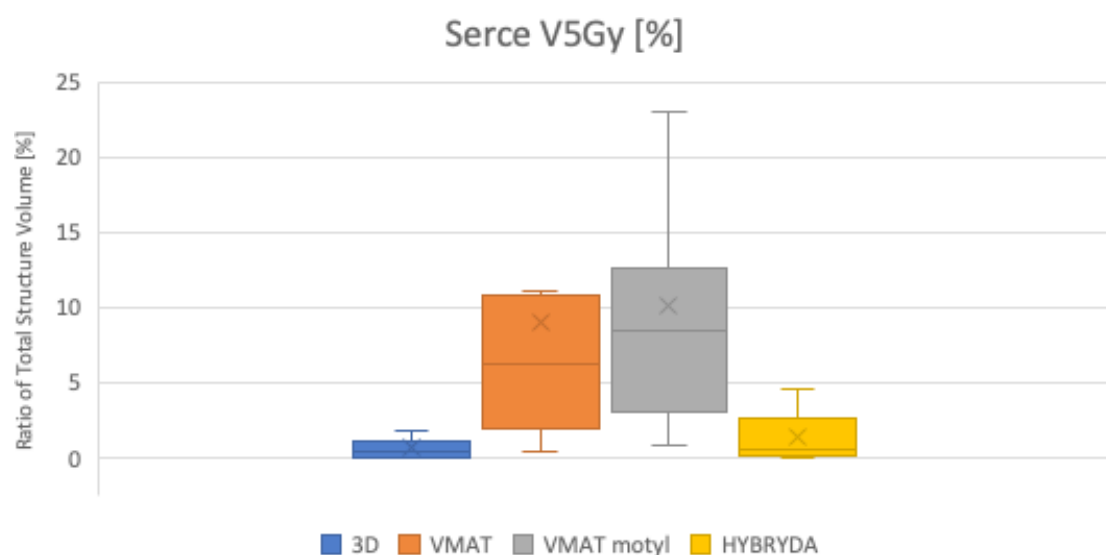


Ryc. 8. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi V5Gy w płucu po zdrowej stronie dla różnych technik planowania.

Na ryc. 9 zostały przedstawione dawki średnie w sercu. Podobnie jak w przypadku dawki średniej w płucach najwyższe wartości obserwowane są w przypadku planów dynamicznych – $2,514 \text{ Gy} \pm 0,990 \text{ Gy}$ (VMAT) oraz $2,197 \text{ Gy} \pm 1,119 \text{ Gy}$ (B-VMAT). Dawka średnia dla planów 3DCRT wyniosła $0,912 \text{ Gy} \pm 0,402 \text{ Gy}$ i $1,167 \text{ Gy} \pm 0,392 \text{ Gy}$ dla planów hybrydowych. Jak zostało zobrazowane na ryc. 10 w planach dynamicznych większa jest również procentowa objętość serca pokryta izodozą 5Gy. Uśrednione wartości V5Gy dla technik hybrydowych ($1,445 \% \pm 1,632 \%$) są nieznacznie wyższe w stosunku do planów 3DCRT ($0,736 \% \pm 0,927 \%$).

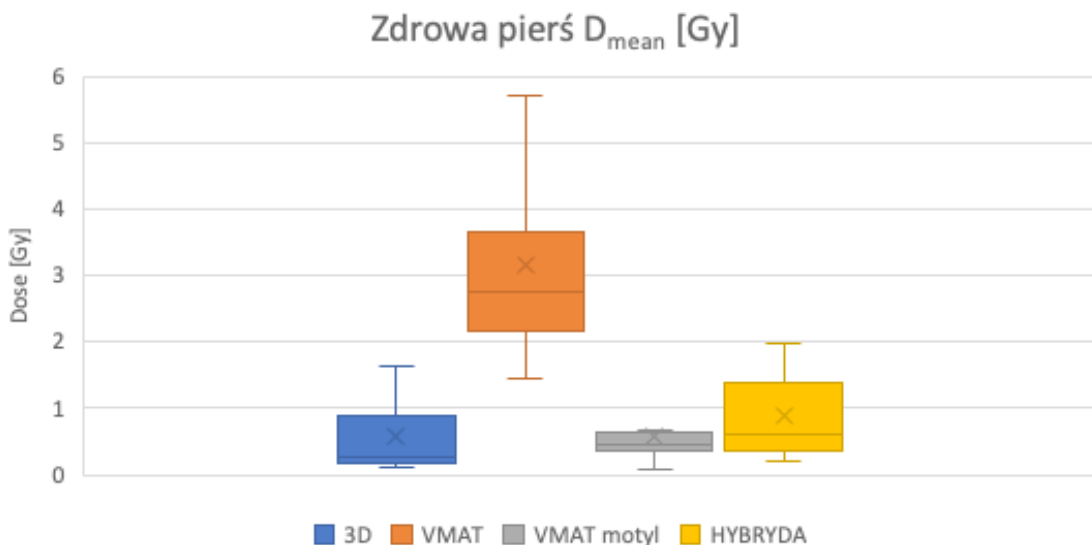


Ryc. 9. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi dawki średniej w sercu dla różnych technik planowania.

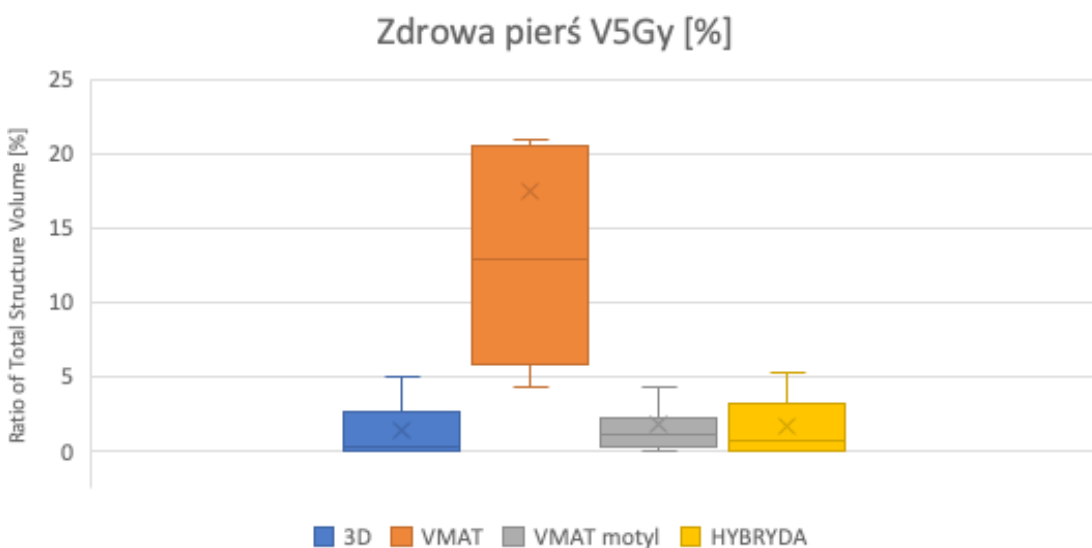


Ryc. 10. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi V5Gy w sercu dla różnych technik planowania.

Ryc. 11 przedstawia dawki średnie w zdrowej piersi dla różnych technik planowania. Dla planów 3D uśredniona wartość D_{mean} wynosi $0,571\text{Gy} \pm 0,562\text{Gy}$, dla planów B-VMAT utrzymuje się na podobnym poziomie ($0,576\text{Gy} \pm 0,447\text{Gy}$) i wyraźnie wzrasta dla planów VMAT o pełnym zakresie pólunku ($3,147\text{Gy} \pm 1,526\text{Gy}$). Ograniczenie pólunku w technice B-VMAT ma również korzystny wpływ na procentową objętość zdrowej piersi pokrytą izodozą 5Gy, co jest widoczne na ryc. 12. Najwyższą wartość V5Gy obserwujemy dla planów VMAT ($17,455\% \pm 16,343\%$), podczas gdy dla pozostałych technik jest ona znacząco niższa i wynosi odpowiednio: $1,427\% \pm 2,137\%$ (3DCRT), $1,736\% \pm 2,254\%$ (hybryda) oraz $1,900\% \pm 2,579\%$ (B-VMAT).



Ryc. 11. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi dawki średniej w zdrowej piersi dla różnych technik planowania.



Ryc. 12. Wartości średnie wraz z wartościami minimalnymi i maksymalnymi V5Gy w zdrowej piersi dla różnych technik planowania.

Podsumowanie

Radioterapia nowotworów piersi, stanowiąc jeden z kluczowych elementów leczenia zmian w tej lokalizacji, rozwija się w kierunku zapewnienia coraz niższej toksyczności terapii przy zachowaniu jej wysokiej skuteczności. Stosowane techniki napromieniania wykazują różne zalety – od zapewnienia lepszej ochrony narządów krytycznych po zachowanie jak najwyższej jednorodności rozkładu dawki w objętości tarczowej. Nie bez znaczenia jest również czas realizacji leczenia na aparacie terapeutycznym przekładający się w sposób bezpośredni na komfort pacjentki. Uzyskanie wysokiej jednorodności rozkładu w planie leczenia techniką statyczną (pozwalającym na najwyższy stopień ochrony narządów krytycznych) wiąże się z zastosowaniem metody field-in-field czyli szeregu pól dopromieniających, a co za tym idzie wydłużeniem realizacji frakcji leczenia i komplikacją samego procesu manualnego planowania. Zastosowanie planów leczenia realizowanych w technikach dynamicznych, zarówno VMAT jak i B-VMAT wiąże się z pokryciem

większej objętości tkanek zdrowych niskimi dawkami promieniowania niż w przypadku planów 3DCRT, choć metoda B-VMAT częściowo niweluje ten efekt. W powyższej pracy wykazano, że plany leczenia w technice hybrydowej łączą zalety techniki dynamicznej i statycznej. Uzyskane rozkłady dawki odznaczały się wysoką jednorodnością przy zastosowaniu niewielkiej liczby pól terapeutycznych, a co za tym idzie skrócony został proces realizacji terapii. Jednocześnie, zastosowanie planu statycznego jako bazy w połączeniu z półlukiem VMAT zastępującym pola dopromieniałe pozwoliło na zachowanie dawek w narządach krytycznych na poziomie niemal niezmiennym w porównaniu z planami 3DCRT. Plany hybrydowe stanowią więc realną alternatywę dla stosowanych standardowo planów statycznych, wykazując jednocześnie przewagę nad planami realizowanymi wyłącznie w technikach dynamicznych.

Bibliografia

- [1] Raport roczny. Nowotwory złośliwe w Polsce w 2019 roku. Narodowy Instytut Onkologii, http://onkologia.org.pl/wp-content/uploads/Nowotwory_2019.pdf, dostęp 02.11.2022 r.
- [2] Charmacińska M, Styś S, Bąk O, Kijeska W, Skrobała S, Od 2D do DIBH, przegląd technik radioterapeutycznych stosowanych w napromienianiu nowotworów piersi, *Letters in Oncology Science*, 2021; 18(2).
- [3] Shah Ch, Al-Hilli Z, Vicin F, *Advances in Breast Cancer Radiotherapy: Implications for Current and Future Practice*, *JCO Oncology Practice* 2021 17:12, 697-706.
- [4] Darby SC, Ewertz M, McGale P, et al. Risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer. *N Engl J Med*. 2013;368:987–98.
- [5] Haussmann, J., Corradini, S., Nestle-Kraemling, C. et al. Recent advances in radiotherapy of breast cancer. *Radiat Oncol*, 2020; 15, 71
- [6] Lin JF, Yeh DC, Yeh HL, Chang CF, Lin JC. Dosimetric comparison of hybrid volumetric-modulated arc therapy, volumetric-modulated arc therapy, and intensity-modulated radiation therapy for left-sided early breast cancer. *Med Dosim*. 2015 Autumn;40(3):262-7.
- [7] <https://www.myvarian.com/>
- [8] Vikström J, Hjelstuen MH, Wasbø E, Mjaaland I, Dybvik KI. A comparison of conventional and dynamic radiotherapy planning techniques for early-stage breast cancer utilizing deep inspiration breath-hold. *Acta Oncol*. 2018 Oct;57(10):1325-1330.
- [9] Venjakob, A., Oertel, M., Hering, D.A. et al. Hybrid volumetric modulated arc therapy for hypofractionated radiotherapy of breast cancer: a treatment planning study. *Strahlenther Onkol* 197, 296–307 (2021).
- [10] Virén, T., Heikkilä, J., Myllyoja, K. et al. Tangential volumetric modulated arc therapy technique for left-sided breast cancer radiotherapy. *Radiat Oncol* 10, 79 (2015).
- [11] Starke A, Bowden J, Lynn R, Hall K, Hudson K, Rato A, Aldridge E, Robb D, Steele P, Brady J, Mikhaeel NG. Comparison of butterfly volumetric modulated arc therapy to full arc with or without deep inspiration breath hold for the treatment of mediastinal lymphoma. *Radiother Oncol*. 2018 Dec;129(3):449-455.