

Volumetrik ark tedavi (VMAT) plan doğrulaması için silindirik diyod array performansının değerlendirilmesi

Evaluation of cylindrical diode array performance for VMAT (Volumetric Arc Therapy) verification

Hande BAŞ AYATA, Cemile CEYLAN, Ayhan KILIÇ, Timur UĞUR, Metin GÜDEN, Kayıhan ENGİN

Özel Anadolu Sağlık Merkezi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, Kocaeli

AMAÇ

Bu çalışmada, ArcCHECK dozimetri sisteminin karakteristiğini göstermek için performans testleri yapılarak VMAT planları için uygunluğu değerlendirildi.

GEREÇ VE YÖNTEM

Kısa dönem tekrar edilebilirlik, doz hızı, alan boyutu ve doz lineerite bağımlılığı testleri 6X, 10X ve 6FFF enerjileri için yapıldı. Ayrıca sekiz basit plan ve 10VMAT planı ArcCHECK-QA sistemi tarafından değerlendirildi.

BULGULAR

ArcCHECK sisteminin kısa dönem tekrar edilebilirlik için standart sapma 6X için %0.043, 10X için %0.06 ve 6FFF için %0.057 bulundu. Output 20 MU'dan fazla olduğunda doz cevap değişimi 6X için ± 0.3 , 10X için ± 0.2 ve 6FFF için ± 0.16 'nın içinde idi. Doz hızı bağımlılığı için, doz hızı ile rölatif doz sonuçları 6X için %0.6, 10X için %1.1 ve 6FFF için %0.4 artış gösterdi.

SONUÇ

ArcCHECK'in kısa dönem tekrar edilebilirlik, doz linearitesi, doz hızı ve alan boyutu bağımlılığı son derece iyi ve klinik kalite kontrol için uygundur.

Anahtar sözcükler: Diyet array; kalite kontrol; IMRT; VMAT.

Yoğunluk ayarlı radyoterapi (IMRT) 3 boyutlu konformal radyoterapiye göre (3BKRT) karmaşık bir tedavi tekniğidir ve kullanımı son yıllarda hızla artmıştır. Yoğunluk ayarlı radyoterapinin 3BKRT'ye göre daha konformal bir doz dağılımı sağladığı ve sağlıklı dokuları daha iyi koruduğu birçok çalışma ile gösterilmiştir. Yoğunluk ayarlı radyoterapi planları çoklu yaprak kolimatör (MLC-Multilif Colli-

OBJECTIVES

In our study, we were performed tests to understand the characteristics of the ArcCHECK QA system and were evaluated the suitability of this QA system for VMAT verification.

METHODS

Short term reproducibility, dose linearity, dose rate and field size dependence tests were performed to evaluate the characteristics of the ArcCHECK QA system.

RESULTS

For the short term reproducibility, the standard deviations were found 0.043% for 6X, 0.06% for 10X and 0.057% for 6FFF. For the dose linearity, when its output was greater than 20 MU, the dose response variations were within ± 0.3 % for 6X, ± 0.2 % for 10X and ± 0.16 % for 6FFF. For the dose rate dependence, the dose responses exhibited 0.6% for 6X, 1.1% for 10X and 0.4% for 6FFF with increasing the dose rate.

CONCLUSION

The short term reproducibility, the dose linearity, the dose rate and field size dependence of ArcCHECK are very good and it is suitable for pretreatment quality assurance of VMAT plans.

Key words: Diod array; quality assurance; IMRT; VMAT.

mator) kullanarak birçok alandan oluşması dolayısı ile karmaşıktır ve bundan dolayı IMRT planlarının dozimetrik doğruluğu ve kalite kontrolü önemlidir. Son zamanlarda kullanımı hızla artan Volumetrik Modulated Arc Therapy (VMAT) IMRT'ye göre daha gelişmiş bir tedavi tekniğidir. Volumetrik Modulated Arc Therapy tedavileri tekli ya da çoklu arklarla doğrulukla ve etkili bir şekilde iletilebil-

İletişim (Correspondence): Dr. Hande BAŞ AYATA. Özel Anadolu Sağlık Merkezi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, Kocaeli, Turkey.

Tel: +90 - 262 - 678 55 17 e-posta (e-mail): hande.bas@anadolusaglik.org

© 2015 Türk Radyasyon Onkolojisi Derneği - © 2015 Turkish Society for Radiation Oncology

mektedir. Volumetrik Modulated Arc Therapy'de IMRT'den farklı olarak aynı anda gantri dönme hızı, doz hızı ve MLC şekli sürekli değiştiğinden VMAT iletimi IMRT'ye göre daha karmaşıktır. Volumetrik Modulated Arc Therapy'nin öncelikli avantajı sabit gantri IMRT'den çok daha hızlı bir sürede hastayı tedavi edebilmesidir. Rao ve ark., VMAT tedavisi ile sabit gantri IMRT ve helikal tomoterapiyi karşılaştırmışlar ve VMAT tedavi zamanını ortalama 2.1–4.6 dakika, IMRT tedavisini ortalama 7–11 dakika ve helikal tomoterapi tedavi zamanının da 4–7 dakika arasında değiştiğini göstermişlerdir.^[1] Volumetrik Modulated Arc Therapy'nin bir başka avantajı ise, MU etkinliğinin artması yani daha az MU ile tanımlanan dozun iletilmesidir. Artan MU etkinliğinin iki ana etkisi vardır; Birinci olarak, tedavi cihazının aşınma ve yıpranmasını azaltır, ikinci olarakta MU'nun azalmasına bağlı olarak sızıntı ve saçılım dozunu azaltır. Yine Rao ve ark.nın yaptığı aynı çalışmada ve benzer çalışmalarda VMAT'nin IMRT'den yaklaşık olarak %18 daha az MU kullandığı gösterilmiştir.^[1–3] Tedavi tekniklerine göre kritik organ karşılaştırması yapıldığında VMAT tekniğinin bazı olgularda sabit gantri IMRT'den daha iyi bir kritik organ koruması sağladığı gösterilmiştir.^[1,3–4] Volumetrik Modulated Arc Therapy'nin ana dezavantajı ise sabit gantri IMRT'ye göre optimizasyon zamanının uzun olmasıdır. Ancak optimizasyon zamanları gelişen cihaz ve teknolojilerle azaltılmıştır.

Yoğunluk ayarlı radyoterapi ve VMAT tekniği iletimin dinamik doğasından ve MLC hareketi ile module edildiğinden dolayı daha ayrıntılı commissioning, cihaza ve hastaya özgü kalite kontrol (QA) gerektirir.^[5] Rotasyonel tedavinin dozimetrik performansını değerlendirmek için birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları jel dosimetri,^[6] elektronik portal görüntüleme cihazları (Electronic portal imaging device [EPID])^[7,8] ve film dozimetridir (radyografik ya da radyokromik).^[9,10] Jel ve film dozimetri çok zaman alıcı iken portal dozimetri günlük hasta kalite kontrolü için çok daha zaman kazandırıcıdır. Bunlara alternatif olarak son yıllarda yeni elektronik iyon odası ve diyod dedektör arraylerinin ticari olarak kullanılabilir olması ve bu düzlemsel arraylerin set-up kolaylığından dolayı birçok klinik 2 boyutlu (2B) dedektör array

sistemlerine geçiş yapmıştır. İki boyutlu dedektör arraylerin (PTW seven29, İBA Matrixx ve Sun-Nuclear MapCHECK) IMRT planlarının doğrulanmasında klinik olarak uygunluğu birçok çalışmada gösterilmiştir.^[11–14] Jursinic ve ark. modifiye edilmiş MAPCHECK ile açı bağımlılığını orjinal MAPCHECK'e göre %20'den %2'ye azaltabileceklerini göstermişler,^[11] Van Esch ve ark.nın yaptığı bir başka çalışmada ise 2D array'in yön bağımlılığını kompanse etmek için Seven29 iyon odası array'ini (PTW, Freiburg, Germany) Octavius fantom ile birlikte kullanmışlar,^[13] Han ve ark.nın yaptığı çalışmada ise MatriXX iyon odası array'i (IBA Dosimetry GmbH, Schwarzenbruck, Germany) uygun düzeltme faktörü ile kullanılmıştır.^[14] Ancak birçok çalışmada düzlemsel array dedektörlerin sabit gantri açılı IMRT tedavi planlarının kontrolü için uygun ancak düzlemsel dizaynlarından dolayı lateral demetlerin büyük kısmının kaybindan ve bu alanların kalibrasyonundaki belirsizliğinden dolayı ark tedavisinin tedavi öncesi hasta kalite kontrolü için ideal olmadığı çünkü düzlemsel arraylerle yapılan tedavi öncesi toplam planın kalite kontrolünde gamma analiz tabanlı geçme oranlarının planın önemli dozimetrik hatalarına karşın hassas olmadığı gösterilmiştir.^[15–18] Yapılan çalışmaların sonucunda VMAT'nin kompleks doz iletiminde, kapsamlı ve doğru hasta QA için 3B QA sistemleri, 2B'li düzlemsel arraylerin kullanımına göre daha tercih edilir olmuştur.

Üç boyutlu QA sistemleri, hasta tabanlı dozun tahmini için hasta anatomisi üzerine ölçülmüş QA fantom dozunu yeniden oluşturmaya yetenekli bir yazılım ve 3B doz fantomundan oluşur. Son yıllarda IMRT ve VMAT planlarının rutin kalite kontrolünde kullanılmak üzere birçok üretici tarafından 3B'li dedektör sistemleri üretilmiştir. Bunlardan bazıları; Delta4 diyod array fantom (ScandiDos Inc, Uppsala, Sweden),^[19,20] MatriXX iyon odası array ve COMPASS yazılımı (IBA Dosimetry, Schwarzenbruck, Germany),^[21] Dosimetry Check (Math Resolutions LLC, Columbia, MD), PTW Seven 29 iyon odası array ile Octavius fantom^[22] ve ArcCHECK silindirik diyod array ve 3DVH (Sun Nuclear Inc, Melbourne, FL) yazılımıdır.^[23–25]

Yeni 3B'li diyod array ArcCHECK (Sun Nuc-

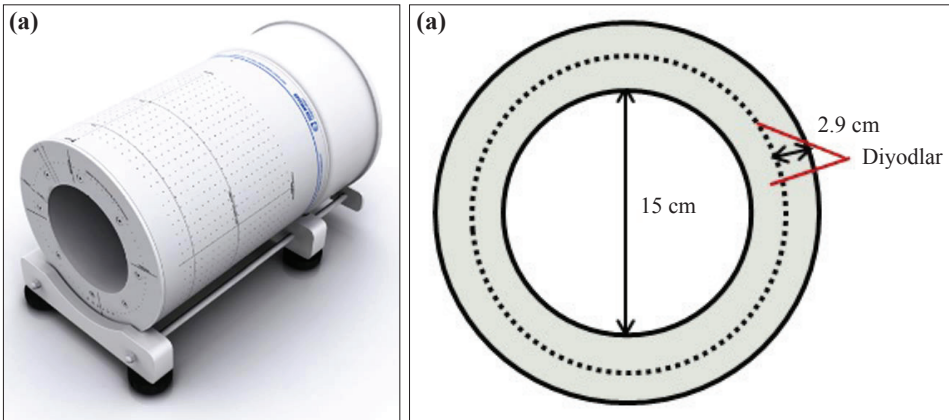
lear, Melbourne, FL), IMRT ve VMAT rutin hasta öncesi QA'i için geliştirilmiştir. ArcCHECK 10 mm dedektör aralığına sahip 1386 diyod dedektörden oluşmuş su eşdeğeri silindirik bir fantomdur (Şekil 1a). ArcCHECK'nin silindirik geometrisinden dolayı bütün dedektörler bütün gantri açılarındaki demete diktir. Aktif dedektör çapı 0.8x0.8 mm'dir. ArcCHECK'nin dış çapı 26.6 cm ve yüzeyden ArcCHECK'nin merkezine olan uzaklık (yarıçap) 13.3 cm'dir. ArcCHECK, iç ve dış olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Dış kısım 6 cm kalınlığında ve iç kısım 15 cm çapında bir kavitedir. ArcCHECK'de dedektörler 3.28 cm su eşdeğeri derinliğine eşit 2.85 cm akrilik buildup derinliğe gömülüdür (Şekil 1b). Kavite kısmına yerleştirilen bir plug ile plugun ortasına iyon odası yerleştirilmesine olanak sağlayan geometrisi ile aynı anda ArcCHECK ile merkezi eksen doz ölçümü yapılmaktadır.

Tedavi öncesi hasta QA için kullanılacak QA cihazının uygun commissioning'i ve uygun doz değerlendirilmesinde cevapların ve değişimin anlaşılması, hataların minimuma indirilmesi ve güven açısından en önemli basamaktır. Her QA sistemindeki olması gibi, ArcCHECK absolute doz ölçümü için yeterince doğru olmalıdır. Bu yüzden ArcCHECK'nin karakteristiğini anlamak önemlidir. Kozelka ve ark. yaptıkları çalışmada ArcCHECK'nin açılal pozisyon bağımlılığı ve alan boyutu bağımlılığını göstermişlerdir.^[26] Feygelman ve ark. da yaptıkları çalışma ile ArcCHECK'in minör alan boyutu ve açılal bağımlılığını göstermiş-

lerdir.^[26] ArcCHECK ile alan boyutu, yön ve açılal bağımlılıklar üzerine ve sabit ark dozimetrisindeki sınırlamalar yapılan diğer çalışmalarda da gösterilmiştir.^[24-27,28]

Hesaplanan ve ölçülen doz karşılaştırılmasında tedavi planlamasında kullanılan doz hesaplama algoritmasının sonuçları etkileyebileceği bilinmektedir. Petoukhova ve ark. montecarlo ve pencil beam algoritma sistemleri ile yapılmış hibrit planlarını hesaplamış ve ArcCHECK dozimetri sisteminde ölçülmüş absolute doz dağılımlarını karşılaştırmışlar ve pencil beam hesaplamalarını ArcCHECK ölçümlerinde anlamlı şekilde farklı bulmuşlardır. Montecarlo algoritmasının pencil beam algoritmasına göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.^[25]

Bu çalışmada, ArcCHECK dozimetri sisteminin karakteristiğini göstermek için kısa dönem tekrar edilebilirlik, doz hızı bağımlılığı, alan boyutu bağımlılığı ve doz linearitesi testleri SNC patient yazılımı (Versiyon 6.2.3) kullanılarak flattening filter'li 6 MV ve 10 MV ve flattening filter olmadan 6MV foton demetleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrıca 10 VMAT hasta planının ArcCHECK QA sisteminde ölçümleri alınarak ArcCHECK'nin VMAT hasta planlarının doğrulanmasındaki hassasiyeti incelenmiştir. Hasta planlarının karşılaştırılmasında Tedavi Planlama Sistemi (TPS) hesaplamalarına karşı fantom ölçümlerinin karşılaştırılması 3B gamma analizi üzerinden yapılmıştır.^[29,30] Bütün ölçümler merkezi plug yerleştirilerek ve homojen densite değerinde yapılmıştır.



Şekil 1. (a) ArcCHECK 1386 diyod dedektörden oluşmuş su eşdeğeri silindirik bir fantomdur. (b) ArcCHECK'de dedektörler 3.28 cm su eşdeğeri derinliğine eşit 2.85 cm akrilik buildup derinliğe gömülüdür.

Gamma analiz sonuçları ArcCHECK’de ölçülmüş ve TPS’de hesaplanmış referans dozlar arasındaki uyumla gösterilmiştir. Gamma değerlendirmeleri %3/3 mm ve %2/2 mm için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Gamma değerlendirmeleri absolute moda, analizi klinik olarak ilgili alana sınırlandırmak için %10 threshold’da ve maksimum doza normalize edilerek yapılmıştır. ArcCHECK’de performans testlerinden önce ArcCHECK’nin array kalibrasyonu ve absolute doz kalibrasyonu yapılmıştır.

GEREÇ VE YÖNTEM

Bütün ölçümler ortadaki 32 adedi 0.25 cm ve kenarlarda 28 adedi 0.5 cm kalınlığında toplamda 120 yapraklı HD MLC’li (High Definition-Multi-leaf Collimator) Truebeam STX lineer hızlandırıcıda 6 MV, 10 MV flattening filter’lı ve son yıllarda kullanımı özellikle SRS/SBRT (Stereotactic Radio-Surgery/Stereotactic Body Radiation Therapy) klinik uygulamalarında sıklıkla artan 6 MV flattening filtersız (6X, 10X ve 6 FFF (Flattening Filter Free) olarak gösterilmiştir) foton enerjileri için ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışmaya dahil edilen 10 VMAT hastasının tedavi planları Varian Eclips TPS’de (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, versiyon 11) ve analytical anisotropic algoritması (AAA) kullanılarak 2.5 mm x 2.5 mm x 2.5 mm voksel boyutuyla hesaplatılmıştır. ArcCHECK QA sisteminin performansını incelemek için çeşitli temel testler yapılmıştır. Absolute doz ölçüm karşılaştırmaları için 0.6 cc farmer tip ve 0.125 cc iyon odası kullanılmıştır.

ArcCHECK kalibrasyonu

ArcCHECK ölçüm için kullanılmadan önce üretici tarafından dizayn edilen kalibrasyon işlem basamakları kullanılacak her bir enerji için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bu kalibrasyon işlemleri iki kısımdan oluşmaktadır. İlki array kalibrasyonu, ikincisi ise absolute doz kalibrasyonudur. Array kalibrasyonunda amaç diyod arraydeki rölatif hassasiyet farkını belirleyip diyodları aynı duyarlılığa getirmektir. Absolute doz kalibrasyonu ise, absolute dozimetri standartında iyon odasıyla daha önce ölçülmüş dozun bilindiği derinlikte arrayle yapılan açık alan ölçümüdür. Bu doz kalibrasyon düzeltme faktörü array hassasiyet düzeltme faktörüyle birlikte bütün dedektörlere uygulanır. Array kalibras-

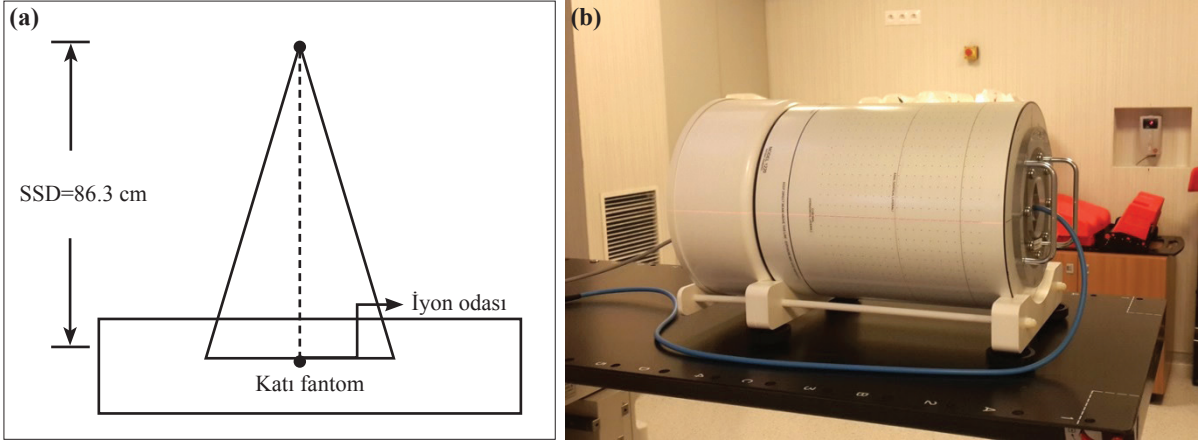
yonu üretici tarafından oluşturulmuş 12 basamaklı bir ışınlama işlemi içerir. Absolute doz kalibrasyonunda ise ölçümler her bir enerji için katı-su fantomda ArcCHECK fantomunun yüzeyinden 2.85 cm uzaklığa gömülü olan dedektörlerin 3.28 cm su eşdeğeri buildup mesafesinde 0.6 cc iyon odası ile ölçülmüştür. Absolute doz kalibrasyonu çalışmada kullanılacak her foton enerjisi için (6X, 10X ve 6 FFF) 10x10 cm² alan boyutunda SAD 100 cm’de (SSD=86.3 cm) 200 MU verilerek yapılmıştır (Şekil 2a). İyon odasından elde edilen doz değerleri ArcCHECK fantomunun oda lazeri ile hizalandırıldığında (SSD=86.7 cm) 10x10 cm²’lik alanda 200 MU verilerek yapılan ölçümde iyon odası değerleri tanıtılarak yapılmıştır.

Bütün ölçümler ArcCHECK merkezi plug yerleştirilerek yapılmıştır. ArcCHECK fantomu tarafından kaydedilen ölçümler ölçüm doz dosyasına kaydedilmeden önce background radyasyon için düzeltme faktörü, açılal bağımlılık, alan boyutu bağımlılığı ve heterojenite düzeltmesi otomatik olarak uygulanır. Çalışmadaki yapılmış bütün karşılaştırmalarda bu düzeltme faktörleri uygulanmıştır. Bu düzeltme faktörleri yukarıda anlatılan ArcCHECK’nin ilk kalibrasyonu sırasında belirlenir ve SNC yazılımında text dosyası olarak sağlanır. Her ölçümden sonra “Stop” tuşuna basıldığında, yazılımda bir işlem çubuğu görünür ve bu sırada her bir gantry açısı hesaplanır ve bahsedilen bütün düzeltmeler (background düzeltmesi, açılal düzeltme, alan boyutu düzeltmesi ve heterojenite düzeltmesi) uygulanır. SNC yazılımı alan boyutunu hesaplayarak alan boyutu düzeltme faktörü uygulanır ve kullanılan enerjiye, diyod lokasyonuna ve plug kullanımına göre düzeltme faktörü uygulanır. Tedavi Planlama Sistemi hesaplanmış doz ArcCHECK değerlendirme testlerinde referans olarak kullanılmıştır.

Performans testleri

Kısa dönem tekrar edilebilirlik

ArcCHECK diyod array kısa dönem tekrar edilebilirliği standart sapma (SS) hesaplanarak değerlendirilmiştir. Kısa dönem tekrar edilebilirlik her bir enerji için (6X, 10X ve 6 FFF) ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ölçümler SAD 100 cm’de (SSD



Şekil 2. (a) Absolute doz kalibrasyonu her foton enerjisi için $10 \times 10 \text{ cm}^2$ alan boyutunda SAD 100 cm 'de ($SSD=86.3 \text{ cm}$) yapılmıştır. (b) İzomerkezdeki absolute dozu ölçmek için ArcCHECK fantomunun içine PTW 0.125 cc iyon odası yerleştirilmiştir.

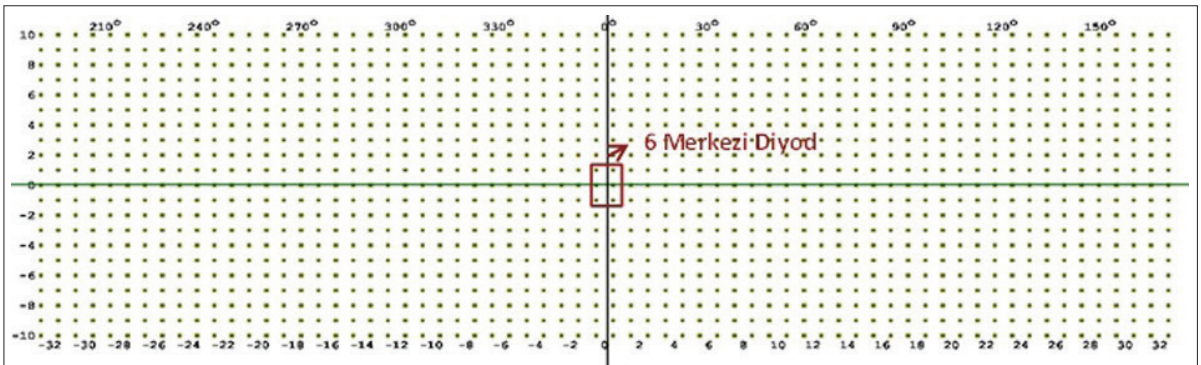
86.7 cm) ve alan boyutu $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 'de 100 MU (Monitor Unit) verilerek yapılmıştır. Eğer fantomun alttan kesilip silindirik şeklin transverse düzlemde $2B$ dikdörtgen hale getirildiği düşünülürse bütün diyodlar aynı düzlemde yayılır. Bu şekilde düşünüldüğünde analiz için kullanılan ArcCHECK silindirin merkezi ekseninin 5 mm içindeki 6 diyodun gösterimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu merkezi 6 diyodun herbiri için 10 kez ölçüm alınarak tekrar edilebilirlikleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Lineer hızlandırıcı output'undaki herhangi bir değişimi kompanse etmek için absolute dozlar için ArcCHECK fantomunun içine yerleştirilmiş iyon odası kullanılmıştır (Şekil 2b) ArcCHECK diyodları ile ölçülmüş dozlar iyon odası ile ölçülmüş doza normalize edilmiş ve sonra herbir diyoddan alınmış 10 sonuç ortalama değere normalize edilmiştir.

Doz lineeritesi

Ölçümler her bir enerji için ($6X$, $10X$ ve 6 FFF) $10 \times 10 \text{ cm}^2$ alan boyutunda ve SAD 100 cm 'de yapılmıştır. ArcCHECK diyodun doz lineerite cevabı $2-400$ ($2, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 200, 250, 300, 350$ ve 400) MU demet iletiminde merkezdeki 6 diyodunun output ölçümlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Lineer hızlandırıcı output'undaki herhangi bir değişimi kompanse etmek için absolute dozları elde etmek için ArcCHECK fantomunun içine iyon odası yerleştirilmiş ve ArcCHECK ile alınan ölçümler ilgili iyon odası ölçümüne normalize edilmiştir. Ölçümlerdeki belirsizliği yok etmek için ölçümler beş kez tekrarlanmıştır.

Doz hızı bağımlılığı

Ölçümler SAD 100 cm ve $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 'lik alanda



Şekil 3. ArcCHECK diyod dedektörün merkezi eksenini etrafındaki 6 dedektör.

100 MU verilerek yapılmıştır. Doz hızı bağımlılığı, 6X ve 10X foton enerjileri için 20, 40, 80, 100, 200, 300 ve 400 MU/min ve 6FFF foton enerjisi için 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 1400 MU/min doz hızlarında merkezdeki 6 diyodunun output ölçümlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Hızlandırıcı outputunda olabilecek herhangi bir değişimi kompanse etmek için izomerkezdeki absolute dozu ölçmek için ArcCHECK fantomunun içine iyon odası yerleştirilmiştir ve ArcCHECK'nin her bir ölçümü ilgili iyon odası ölçümüne normalize edilmiştir. Ölçümler arasındaki belirsizliği en aza indirmek için her bir ölçüm üç kez tekrarlanmıştır.

Alan boyutu bağımlılığı

Ölçümler SAD 100 cm'de ve 100 MU'da yapılmıştır. Alan boyutu bağımlılığı 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 8x8, 10x10, 12x12, 15x15, 18x18, 20x20 ve 25x25 cm² alan boyutlarında merkezdeki 6 diyodunun output ölçümlerinin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Tüm ölçümler 6X, 10X ve 6 FFF foton enerjilerinde ayrı ayrı yapılmıştır. Ölçümler aynı şartlar altında katı-su fantomun içerisine yerleştirilen 0.6 cc farmer tip iyon odası ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Ölçümler arasındaki belirsizliği en aza indirmek için her bir ölçüm üç kez tekrarlanmıştır. Ölçülen her alan boyutu ayrıca bilgisayarlı tomografi (BT) kesitleri Eclips tedavi planlama sistemine aktarılan ArcCHECK fantomunda oluşturularak hesaplatılmıştır. ArcCHECK'de ölçülmüş sonuçlar, hesaplatılmış TPS dozu ve iyon odası ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

çülmüş sonuçlar, hesaplatılmış TPS dozu ve iyon odası ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Basit plan doğrulaması

ArcCHECK QA sisteminde doğrulanmak üzere sekiz basit plan yaratılmıştır. Her bir plan dört alandan oluşan ve 00, 900, 1800, 2700 gantry açılarında dikdörtgen alandan oluşmaktadır. Planların alan boyutları 10 cm x 20 cm, 12 cm x 20 cm, 14 cm x 20 cm, 16 cm x 20 cm, 18 cm x 20 cm, 20 cm x 20 cm, 22 cm x 20 cm ve 24 cm x 20 cm'dir. Tüm ölçümler 6X, 10X ve 6 FFF foton enerjilerinde ayrı ayrı yapılmıştır. Tedavi Planlama Sistemi'nde hesaplanmış doz dağılımı ile ArcCHECK'de ölçülmüş doz dağılımlarını karşılaştırmak için gamma indeks (γ) geçme oranları değerlendirilmiştir.

Volümetrik Modulated Arc Therapy Hasta planlarının doğrulaması

Volümetrik Modulated Arc Therapy planlarının doğruluğunu analiz etmek için farklı tedavi bölgelerini içeren 10 VMAT hastası seçilmiştir. Çalışma için kullanılan hastaların tedavi planlarına ait ayrıntılar Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan hastaların dördü larenks, ikisi prostat, ikisi akciğer ve ikisi mide kanseridir. Hastaya özgü VMAT doğrulaması için ArcCHECK QA sistemi ve SNC Patient yazılımı kullanılmıştır. Volümetrik Modulated Arc Therapy planları ArcCHECK fantomunun BT kesitlerine aktarılarak tekrar hesaplatılmış

Tablo 1

Farklı tedavi bölgelerini içeren 10 hastanın tedavi ayrıntıları

Hasta sayısı	Tedavi bölgesi	Verilen Doz (Gy)	Enerji (MV)	VMAT		
				Ark sayısı	Derece	Control points
# 1	Larenks ca	70	6	2 yarım ark	353	212
# 2	Larenks ca	70	6	2 full ark	720	356
# 3	Larenks ca	70	6	2 full ark	720	356
# 4	Larenks ca	70	6	2 full ark	720	356
# 5	Prostat ca	76	10	2 full ark	720	356
# 6	Prostat ca	76	10	2 full ark	720	356
# 7	Mide ca	50.4	6	2 yarım ark	335	196
# 8	Mide ca	50.4	6	2 full ark	720	356
# 9	SBRT Akciğer	60	6 FFF	2 yarım ark	360	196
# 10	SBRT Akciğer	60	6 FFF	2 yarım ark	360	196

VMET: Volümetrik Modulated Arc Therapy; SBRT: Stereotactic Body Radiation Therapy.

ve klinik protokolümüze göre kabul edilen VMAT planlarını SNC Patient yazılımında değerlendirmek için TPS'den "RTplan" ve "RTdose" dicom data'ları export edilmiştir. ArcCHECK'de ölçülmüş doz dağılımı ile TPS tarafından hesaplatılmış doz dağılımlarını karşılaştırmak için gamma indeks (γ) geçme oranları değerlendirilmiştir.

BULGULAR

Performans testleri

Kısa dönem tekrar edilebilirlik

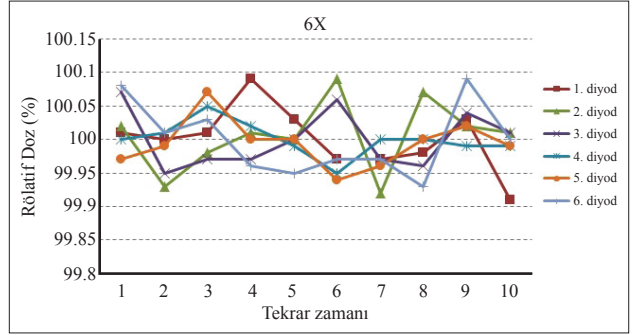
Şekil 4, 5 ve 6'da ArcCHECK QA sisteminin sırasıyla 6X, 10X ve 6 FFF enerjilerindeki tekrar zamanına göre doz değişimi gösterilmiştir. Merkezi altı diyotta üç enerji için 10 ışınlama yapılmış ve standart sapmalar 6X için %0.043, 10X için %0.06 ve 6 FFF %0.057 olarak bulunmuştur.

Doz lineeritesi

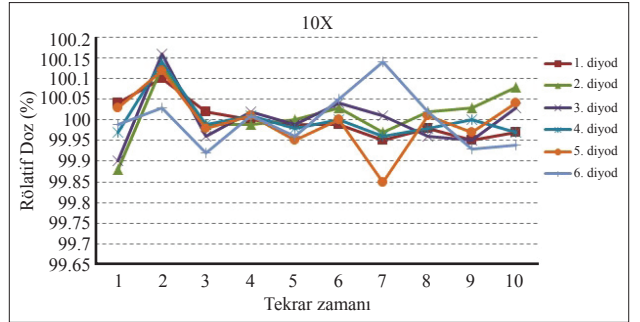
ArcCHECK doz lineeritesinin lineer hızlandırıcı output'una karşı grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir. Bulunan grafiğin R2 değeri 6X, 10X ve 6FFF enerjileri için 1'e çok yakın bulunmuştur. Şekil 8'de hızlandırıcı output'unun kararsızlığını elimine etmek için iyon odası sonuçlarıyla karşılaştırılmalı ArcCHECK doz lineeritesi gösterilmiştir. Output 2 MU olduğunda, doz cevap hatası 6X için maksimum -%1.24, 10X için -%1.9 ve 6FFF için -%1.45'dir (doz cevabı 100MU daki doz cevabına normalize edildiğinde). Output 20 MU'dan daha fazla olduğunda doz cevap değişimleri 6X için %0.3, 10X için %0.2 ve 6FFF için %0.16'nın içindedir.

Doz hızı bağımlılığı

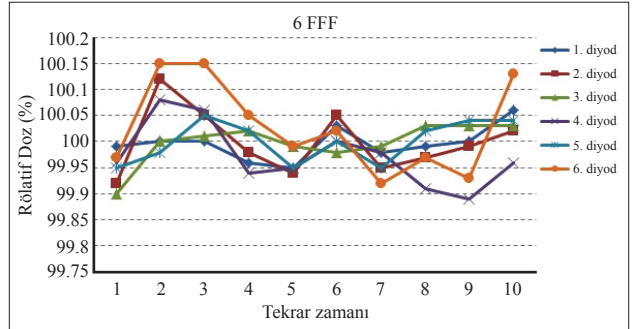
ArcCHECK'de merkezi 6 diyodun ortalama değerinin 6X için 20, 40, 80, 100, 200 ve 300 MU/min doz hızlarındaki doz hızı bağımlılığı Şekil 9'da, 10X için 20, 40, 80, 100, 200 ve 300 MU/min doz hızlarındaki doz hızı bağımlılığı Şekil 10'da ve 6 FFF'nin 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 1400 MU/min doz hızlarındaki doz hızı bağımlılığı Şekil 11'de gösterilmiştir. Farklı enerjiler için farklı doz hızlarında alınan ölçümler maksimum doz hızındaki ölçüm değerine normalize edilmiştir. Hızlandırıcının output verimini elimine ettiğimiz za-



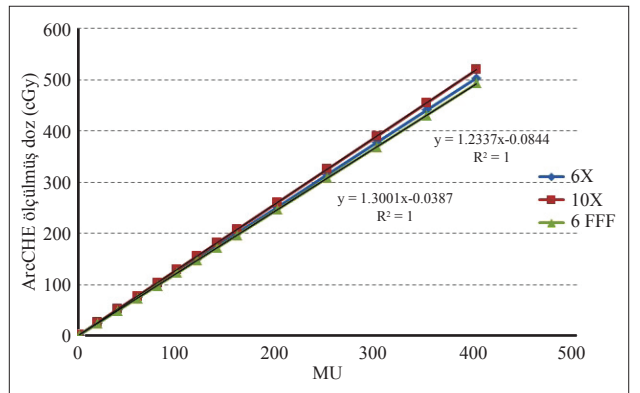
Şekil 4. 6X için kısa dönem tekrar edilebilirlik.



Şekil 5. 10X için kısa dönem tekrar edilebilirlik.



Şekil 6. 6 FFF için kısa dönem tekrar edilebilirlik.



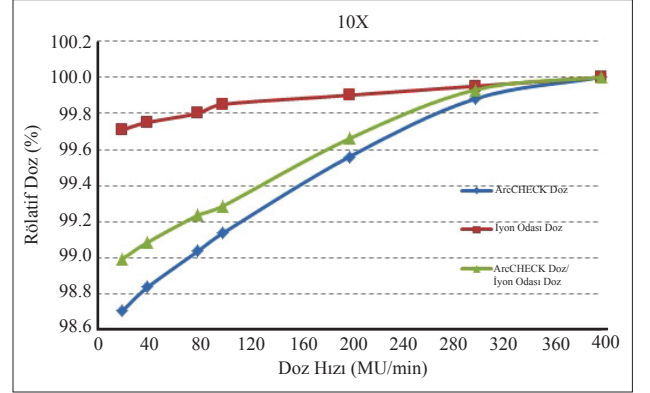
Şekil 7. ArcCHECK'de merkezi 6 diyodun ortalama değerinin 6X, 10X ve 6FFF enerjileri için MU ile değişimi.

man doz rate ile rölatif doz sonuçları değişimi 6X için maksimum %0.6, 10X için maksimum %1.1 ve 6 FFF için maksimum %0.4 artış göstermiştir. İyon odası 6X için %0.4, 10X için %0.3 ve 6FFF için yaklaşık %0.1 değişim göstermiştir. Sonuçta diyodun doz hızı bağımlılığı dinamik VMAT tedavileri için sorun olabilir.

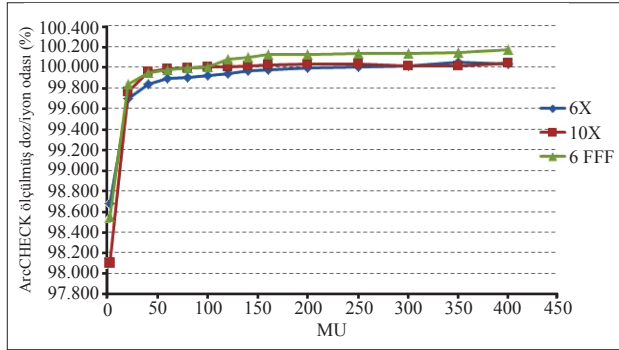
Alan boyutu bağımlılığı

Şekil 12, 13 ve 14'te ArcCHECK'de merkezi 6 diyodun ortalama değerinin 6X, 10X ve 6FFF enerjilerinde 3x3 cm²'den 25x25 cm²'ye (3 cm x 3 cm, 4 cm x 4 cm, 5 cm x 5 cm, 6 cm x 6 cm, 8 cm x 8 cm, 10 cm x 10 cm, 12 cm x 12 cm, 15 cm x 15 cm, 18 cm x 18 cm, 20 cm x 20 cm ve 25 cm x 25 cm) kadar olan alanlar için alan boyutu bağımlılığı ArcCHECK ölçülmüş doz, iyon odası okumaları ve TPS'de hesaplatılmış doz için ayrı ayrı gösterilmiştir. Alan boyutunun değişimi ile diyod dedek-

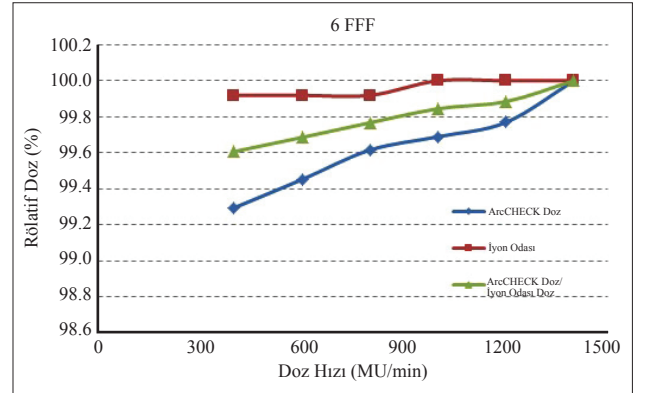
törlerin davranışı diğer radyasyon dedektörlerinde olduğu gibi total scatter faktör (baskın olarak fantom saçılması, Sp) de arttığı gösterilmiştir. 6X enerji için ArcCHECK ve iyon odası ölçümü arasındaki fark ortalama %1.2±0.08, 10X için ortalama



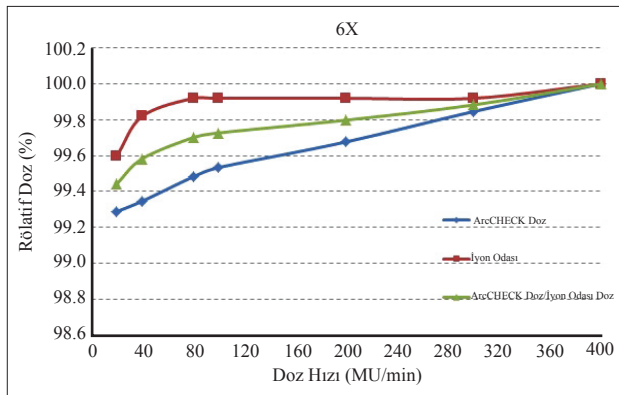
Şekil 10. 10X için ArcCHECK ölçümlerinin ve iyon odası okumalarının doz hızına bağlı değişimi.



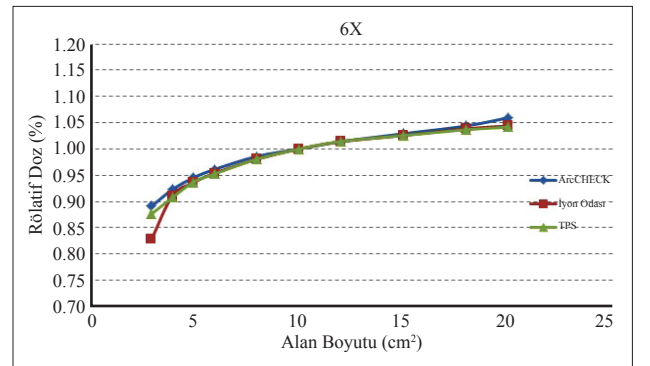
Şekil 8. İyon odası okumalara karşı ArcCHECK'de merkezi 6 diyodun ortalama değerinin 6X, 10X ve 6FFF enerjileri için MU ile değişimi.



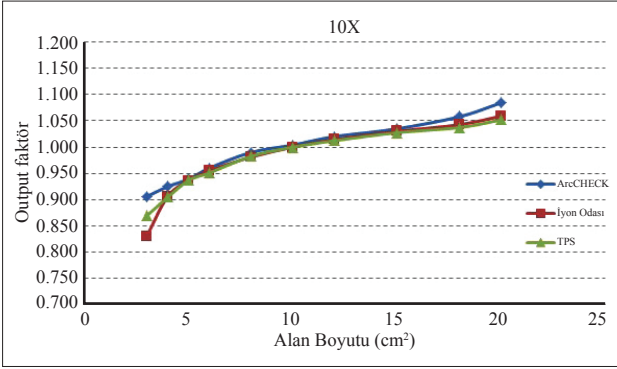
Şekil 11. 6 FFF için ArcCHECK ölçümlerinin ve iyon odası okumalarının doz hızına bağlı değişimi.



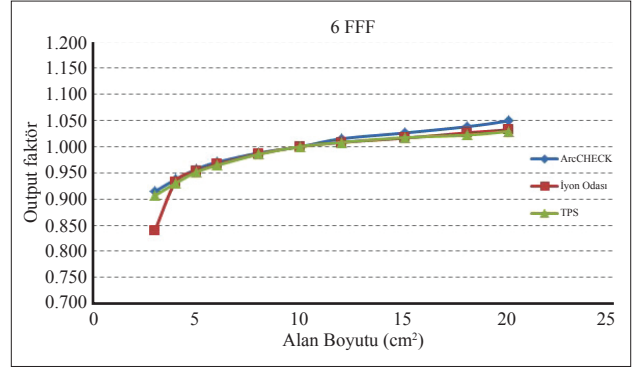
Şekil 9. 6X için ArcCHECK ölçümlerinin ve iyon odası okumalarının doz hızına bağlı değişimi.



Şekil 12. 6X enerjisi için ArcCHECK ve iyon odası ölçülmüş doz ile TPS'de hesaplatılmış dozun alan boyutuna bağlı değişimi.



Şekil 13. 10X enerjisi için ArcCHECK ve iyon odası ölçülmüş doz ile TPS'de hesaplatılmış dozun alan boyutuna bağlı değişimi.



Şekil 14. 6 FFF enerjisi için ArcCHECK ve iyon odası ölçülmüş doz ile TPS'de hesaplatılmış dozun alan boyutuna bağlı değişimi.

ma $\%1.6 \pm 0.12$ ve 6 FFF için ortalama $\%1.36 \pm 0.09$ bulunmuştur.

Basit plan doğrulaması

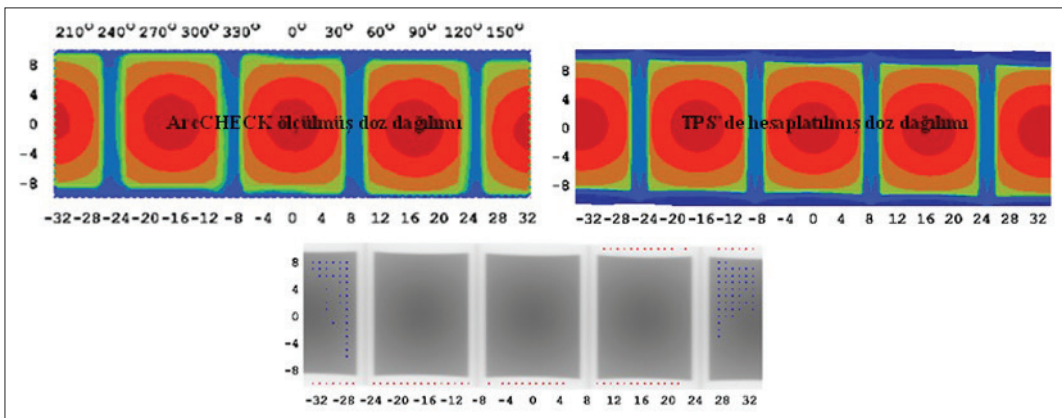
Tedavi Planlama Sistemi'nde hesaplanmış doz dağılımı ile ArcCHECK'de ölçülmüş doz dağılımlarını karşılaştırmak için gamma indeks (γ) geçme oranları ($\%3/3$ mm) SNC patient yazılımında değerlendirilmiştir. 6FFF enerjisinde 14 cm x 20 cm alanına ait örnek bir karşılaştırma Şekil 15'te gösterilmiştir. 6X, 10X ve 6FFF enerjileri için alan boyutuna karşı gamma indeks geçme oranları sırasıyla Şekil 16–18'de gösterilmiştir.

Alan boyutu X yönünde (sol-sağ) 20 cm'den küçük olduğunda absolute doz gamma geçme oranları birbirine benzerdir ve ortama gamma geçme oranı 6X için $\%97.2 \pm 0.4$, 10X için $\%95.5 \pm 1.3$ ve 6 FFF için $\%94.6 \pm 1.4$ olarak bulunmuştur. Alan

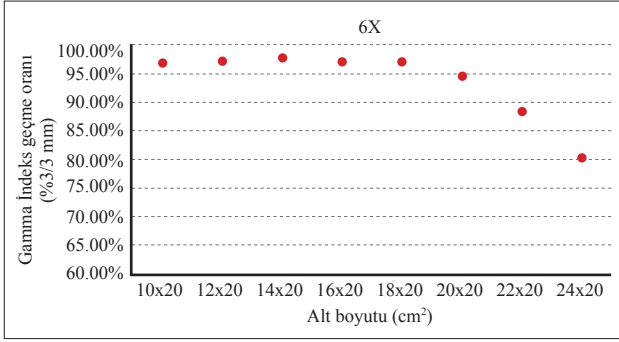
boyutu 20 cm'den büyük olduğunda gamma geçme oranı 6X için $\%80.2$, 10X için $\%75.2$ ve 6 FFF için $\%70.2$ 'ye düşmüştür.

Hastaya özel VMAT planlarının doğrulaması

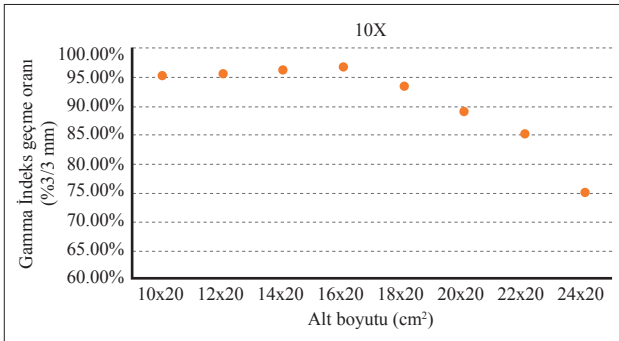
ArcCHECK QA sisteminin amacı özellikle VMAT gibi klinik radyoterapi planlarını kontrol etmektir. Bu çalışmada farklı tedavi bölgelerine ait 10 VMAT planı kontrol edilmiştir. ArcCHECK ve iyon odası sonuçları VMAT planlarında tedavi öncesi doğrulama için iyi bir uyum içinde gösterilmiştir. ArcCHECK QA sistemi VMAT tedavileri için başarı ile dizayn edilmiştir ve VMAT tedavileri için TPS hesaplanmış doğruluğu ve lineer hızlandırıcı iletimi klinik uygulamalarda memnun edici bulunmuştur. Klinik olarak VMAT doğrulamasında ArcCHECK'nin yön bağımlılığının etkisi



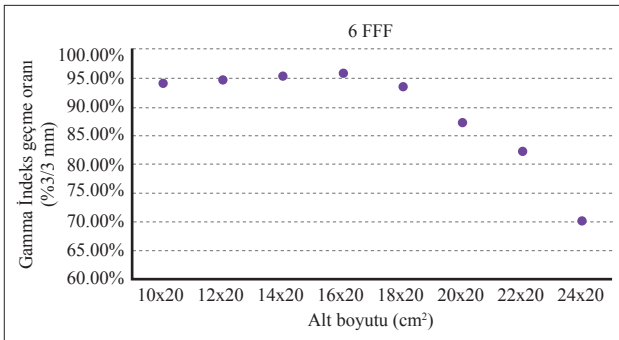
Şekil 15. 6 FFF enerjisi için SNC patient yazılımında TPS'de hesaplanmış doz dağılımı ile ArcCHECK'te ölçülmüş doz dağılımının karşılaştırılması.



Şekil 16. 6X foton enerjisi için farklı alan boyutları için gamma indeks geçme oranları.



Şekil 17. 10X foton enerjisi için farklı alan boyutları için gamma indeks geçme oranları.



Şekil 18. 6 FFF foton enerjisi için farklı alan boyutları için gamma indeks geçme oranları.

iki ana sebepten dolayı ihmal edilebilir. Birincisi, sıfır masa açısında ArcCHECK'deki dedektörlerin gantri açısı hangi değerde olursa olsun tedavi demetine dik kalmaktadır. İkincisi; radyasyon arkadaki dedektörlerden önce ilk olarak 24 cm'ye yakın bir fantom materyalini geçer, bu yüzden arkadan gelen radyasyonun katkısı düşüktür. Tablo 2'de gösterildiği gibi ortalama gamma geçme oranı 6X foton enerjisinde γ (%3/3 mm) ve γ (%2/2 mm) için

sırasıyla %96.1 ve %92.6, 10X foton enerjisinde γ (%3/3 mm) ve γ (%2/2 mm) için sırasıyla %98.3 ve %99.1 ve 6 FFF foton enerjisinde γ (%3/3 mm) ve γ (%2/2 mm) için sırasıyla %99.3 ve %95.1'dir.

TARTIŞMA

Çalışmamızda, VMAT QA için 6-10X ve 6 FFF foton demeti için silindirik diyod array ArcCHECK fantomunun performans testleri yapılmıştır. ArcCHECK diyodlarının linak doz, doz hızı, alan boyutu ve tekrar edilebilirlik testlerinin klinik olarak kabul edilebilir olduğu gösterilmiştir.

Kozelka ve ark. ArcCHECK fantomunun içindeki geniş hava boşluğunda tedavi planlama algoritmalarının yeteneklerini araştırmışlar ve Convolution-Superposition algoritmasına benzer algoritmaların 15 cm'lik hava boşluğunda çıkış dozunun doğru tahmini için uygun olmadığını göstermişlerdir. Ayrıca, ArcCHECK'nin karmaşık planlama tekniklerinde karakteristiğini anlamak için ArcCHECK'nin açıl pozisyon bağımlılığı, alan boyut bağımlılığı ve tekrar edilebilirlik oranlarını raporlamışlardır ve sonuçta ArcCHECK'nin alan boyutu bağımlılığı ve açıl pozisyon bağımlılığının gözlemlendiği gösterilmiştir.^[26] Hesaplanan ve ölçülen doz karşılaştırılmasında tedavi planlamasında kullanılan doz hesaplama algoritmasının sonuçları etkileyebileceği bilinmektedir. Petoukhova ve ark.^[25] montecarlo ve pencil beam algoritma sistemleri ile yapılmış hibrit planlarını hesaplamış ve ArcCHECK dozimetri sisteminde ölçülmüş absolute doz dağılımlarını karşılaştırmışlar ve pencil beam hesaplamalarını ArcCHECK ölçümlerinde anlamlı şekilde farklı bulmuşlardır. Montecarlo algoritmasının pencil beam algoritmasına göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir.

Volumetrik Modulated Arc Therapy planları için ArcCHECK diyodlarının yön bağımlılığı göz ardı edilebilir. Bunun iki sebebi vardır. İlki ArcCHECK dedektörler masa açısı 00 olduğu sürece tedavi alanlarına diktir. İkincisi, radyasyon alttaki dedektörlerden geçmeden önce yaklaşık 24 cm'lik fantom materyalinden geçer bu yüzden geriden gelen radyasyonun katkısı oldukça azdır.

ArcCHECK QA sisteminin kısa dönem tekrar edilebilirlik için standart sapmaları 6X için

Tablo 2

On hastanın VMAT planlarındaki planlanmış dozla iletilmiş doz karşılaştırmasında %3/3 mm ve %2/2 mm γ geçme değeri

	Enerji (MV)	Gamma indeks geçme oranları	
		%3/3 mm (%)	%2/2 mm (%)
Larenks #1	6	98.9	92.8
Larenks #2	6	91.8	87.4
Larenks #3	6	93.6	88.8
Larenks #4	6	97.4	90.6
Mide #1	6	99.8	98.0
Mide #2	6	95.3	97.9
Ortalama		96.1	92.6
Standart sapma		0.03	0.05
Prostat #1	10	98.6	96.3
Prostat #2	10	97.9	95.8
Ortalama		98.3	96.1
Standart sapma		0.005	0.003
Akciğer SBRT #1	6 FFF	98.5	94.2
Akciğer SBRT #2	6 FFF	100	95.9
Ortalama		99.3	95.1
Standart sapma		0.01	0.01

%0.043, 10X için %0.06 ve 6 FFF %0.057 olarak bulunmuştur. Li ve ark.nın yaptığı çalışmada benzer olarak kısa dönem tekrar edilebilirlik için standart sapma %0.05 bulunmuştur.^[24]

ArcCHECK'nin doz lineerite bağımlılığı testinde output 2 MU olduğunda, doz cevap hatası 6X için maksimum -1.24 , 10X için -1.9 ve 6FFF için -1.45 'dir (doz cevabı 100MU'daki doz cevabına normalize edildiğinde). Output 20 MU'dan daha fazla olduğunda doz cevap değişimleri 6X için ± 0.3 , 10X için ± 0.2 ve 6FFF için ± 0.16 'nın içindedir. Li ve ark.nın yaptığı çalışmada düşük MU'larda maksimum hata -0.88 , Büyük MU'larda doz cevabı ± 0.2 'nin içinde bulunmuştur.^[28]

ArcCHECK QA sisteminin doz hızı bağımlılığı için doz rate ile rölatif doz sonuçları değişimi 6X için maksimum %0.6, 10X için maksimum %1.1 ve 6 FFF için maksimum %0.4 artış göstermiştir. İyon odası 6X için %0.4, 10X için %0.3 ve 6FFF için yaklaşık %0.1 olarak bulunmuştur. Chaswal ve ark.nın yaptığı çalışmada doz hızı bağımlılığı 6 MV ve 6FFF enerjilerinin her ikisi içinde %1'in içinde bulunmuştur.^[31]

Çalışmamızda, alan boyutu bağımlılığı testinde iyon odası ölçümleriyle ArcCHECK'de alınmış ölçümler arasında özellikle büyük alanda (20x20 cm²) bir miktar fark bulunmuştur (Şekil 12–14). Bunun sebebi özellikle büyük alanlarda ArcCHECK fantomu ile katı fantom içine yerleştirilmiş iyon odası arasındaki saçılma şartlarının aynı olmamasındandır. ArcCHECK ve iyon odası ölçümü arasındaki fark alan boyutunun artmasıyla 6X için ortalama 1.2 ± 0.08 , 10X için 1.6 ± 0.12 ve 6 FFF için 1.36 ± 0.09 olarak bulunmuştur. Li ve ark.nın yaptıkları çalışmada da benzer olarak doz pulse bağımlılığı ve alan boyutu bağımlılığı büyük alanlarda bir miktar farklı bulunmuştur.^[28] Chaswal ve ark.nın yaptığı çalışmada da diyod tabanlı alan boyutu bağımlılığı %0.5'in içinde bulunmuştur.^[31]

ArcCHECK QA sistemini özellikle VMAT planlarında klinik olarak kontrol etmek için farklı tedavi bölgelerinde 10 VMAT hastası kullanılmıştır. Öncesinde yaptığımız basit plan karşılaştırmalarında ArcCHECK fantomunun enlemesine (transverse) yönde (x-yönü/sol-sağ) 20 cm'den daha küçük alanlarda iyi bir uyum vardır, ancak alan boyutu diyodların dışına çıktığında absolute

doz gamma indeksin geçme oranı hızla azalmıştır. Enlemesine kesitte alan boyutu bütün diyodları içine alacak kadar büyük olduğunda alanların her iki yönündeki diyodlar planlanmış dozdan daha yüksek ölçüme sahip olurlar. Bu yüzden hesaplanmış doz dağılımına göre ölçülmüş dozlar daha yüksek gözlenmiştir. Ancak genel olarak klinik uygulamalarda alan boyutu 20 cm sınırı içindedir. Basit plan doğrulamasında alan boyutu 20 cm'den küçük (x yönünde) alanlar için absolute gamma geçme oranı birbirine çok yakındır ve ortalama gamma geçme oranı 6X için %97.2±0.4, 10X için %95.5±1.3 ve 6 FFF için %94.6±1.4 olarak bulunmuştur. Alan boyutu 20 cm'den büyük olduğunda gamma geçme oranı alan boyutu 24 cm'de 6X için %80.2, 10X için %75.2 ve 6 FFF için %70.2'ye düşmüş olarak bulunmuştur. Volumetrik Modulated Arc Therapy hasta planlarının doğrulamasında, ortalama gamma geçme oranı γ (%3/3 mm)'te 6X, 10X ve 6FFF foton enerjilerinde sırasıyla %96.1, %98.3 ve %99.3 olarak ve ortalama gamma geçme oranı γ (%2/2 mm)'te sırasıyla %92.6, %96.1 ve %95.1 olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak, ArcCHECK'nin kısa dönem tekrar edilebilirlik, doz linearitesi, doz hızı bağımlılığı ve alan boyutu bağımlılığı son derece iyi bulunmuştur ve yapılan plan karşılaştırma ölçümlerinin sonucuna göre ArcCHECK QA sistemi VMAT tedavi öncesi hasta kalite kontrolü için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Rao M, Yang W, Chen F, Sheng K, Ye J, Mehta V, et al. Comparison of Elekta VMAT with helical tomotherapy and fixed field IMRT: plan quality, delivery efficiency and accuracy. *Med Phys* 2010;37(3):1350–9.
- Verbakel WF, Cuijpers JP, Hoffmans D, Bieker M, Slotman BJ, Senan S. Volumetric intensity-modulated arc therapy vs. conventional IMRT in head-and-neck cancer: a comparative planning and dosimetric study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2009;74(1):252–9.
- Palma D, Vollans E, James K, Nakano S, Moiseenko V, Shaffer R, et al. Volumetric modulated arc therapy for delivery of prostate radiotherapy: comparison with intensity-modulated radiotherapy and three-dimensional conformal radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2008;72(4):996–1001.
- Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a

- single gantry arc. *Med Phys* 2008 Jan;35(1):310–7.
- Ezzell GA, Galvin JM, Low D, Palta JR, Rosen I, Sharpe MB, et al. Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: report of the IMRT Subcommittee of the AAPM Radiation Therapy Committee. *Med Phys* 2003;30(8):2089–115.
- Vergote K, De Deene Y, Duthoy W, De Gerssem W, De Neve W, Achten E, et al. Validation and application of polymer gel dosimetry for the dose verification of an intensity-modulated arc therapy (IMAT) treatment. *Phys Med Biol* 2004;49(2):287–305.
- Mans A, Remeijer P, Olaciregui-Ruiz I, Wendling M, Sonke JJ, Mijnheer B, et al. 3D Dosimetric verification of volumetric-modulated arc therapy by portal dosimetry. *Radiother Oncol* 2010;94(2):181–7.
- Iori M, Cagni E, Paiusco M, Munro P, Nahum AE. Dosimetric verification of IMAT delivery with a conventional EPID system and a commercial portal dose image prediction tool. *Med Phys* 2010;37(1):377–90.
- Bucciolini M, Buonamici FB, Casati M. Verification of IMRT fields by film dosimetry. *Med Phys* 2004;31(1):161–8.
- Pallotta S, Marrazzo L, Bucciolini M. Design and implementation of a water phantom for IMRT, arc therapy, and tomotherapy dose distribution measurements. *Med Phys* 2007;34(10):3724–31.
- Jursinic PA, Nelms BE. A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery. *Med Phys* 2003;30(5):870–9.
- Poppe B, Blechschmidt A, Djouguela A, Kollhoff R, Rubach A, Willborn KC, et al. Two-dimensional ionization chamber arrays for IMRT plan verification. *Med Phys* 2006;33(4):1005–15.
- Van Esch A, Clermont C, Devillers M, Iori M, Huyskens DP. On-line quality assurance of rotational radiotherapy treatment delivery by means of a 2D ion chamber array and the Octavius phantom. *Med Phys* 2007;34(10):3825–37.
- Han Z, Ng SK, Bhagwat MS, Lyatskaya Y, Zygmanski P. Evaluation of MatriXX for IMRT and VMAT dose verifications in peripheral dose regions. *Med Phys* 2010;37(7):3704–14.
- Rangel A, Palte G, Dunscombe P. The sensitivity of patient specific IMRT QC to systematic MLC leaf bank offset errors. *Med Phys* 2010;37(7):3862–7.
- Yan G, Liu C, Simon TA, Peng LC, Fox C, Li JG. On the sensitivity of patient-specific IMRT QA to MLC positioning errors. *J Appl Clin Med Phys* 2009;10(1):2915.
- Zhen H, Nelms BE, Tome WA. Moving from gamma passing rates to patient DVH-based QA metrics in pre-treatment dose QA. *Med Phys* 2011;38(10):5477–89.
- Nelms BE, Chan MF, Jarry G, Lemire M, Lowden J,

- Hampton C, et al. Evaluating IMRT and VMAT dose accuracy: practical examples of failure to detect systematic errors when applying a commonly used metric and action levels. *Med Phys* 2013;40(11):111722.
19. Bedford JL, Lee YK, Wai P, South CP, Warrington AP. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification. *Phys Med Biol* 2009;54(9):N167–76.
 20. Sadagopan R, Bencomo JA, Martin RL, Nilsson G, Matzen T, Balter PA. Characterization and clinical evaluation of a novel IMRT quality assurance system. *J Appl Clin Med Phys* 2009;10(2):2928.
 21. Swamy ST, Anuradha C, Kathirvel M, Arun G, Subramanian S. Pretreatment quality assurance of volumetric modulated arc therapy on patient CT scan using indirect 3D dosimetry system. *Int J Cancer Ther Oncol* 2004;4(4):2.
 22. Hussein M, Adams EJ, Jordan TJ, Clark CH, Nisbet A. A critical evaluation of the PTW 2D-ARRAY seven29 and OCTAVIUS II phantom for IMRT and VMAT verification. *J Appl Clin Med Phys* 2013;14(6):4460.
 23. McKenzie EM, Balter PA, Stingo FC, Jones J, Followill DS, Kry SF. Toward optimizing patient-specific IMRT QA techniques in the accurate detection of dosimetrically acceptable and unacceptable patient plans. *Med Phys* 2014;41(12):121702.
 24. Li G, Zhang Y, Jiang X, Bai S, Peng G, Wu K, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA system for IMRT and VMAT verification. *Phys Med* 2013;29(3):295–303.
 25. Petoukhova AL, van Egmond J, Eenink MG, Wiggendaad RG, van Santvoort JP. The ArcCHECK diode array for dosimetric verification of HybridArc. *Phys Med Biol* 2011;56(16):5411–28.
 26. Kozelka J, Robinson J, Nelms B, Zhang G, Savitskij D, Feygelman V. Optimizing the accuracy of a helical diode array dosimeter: a comprehensive calibration methodology coupled with a novel virtual inclinometer. *Med Phys* 2011;38(9):5021–32.
 27. Feygelman V, Zhang G, Stevens C, Nelms BE. Evaluation of a new VMAT QA device, or the “X” and “O” array geometries. *J Appl Clin Med Phys* 2011;12(2):3346.
 28. Neilson C, Klein M, Barnett R, Yartsev S. Delivery quality assurance with ArcCHECK. *Med Dosim* 2013;38(1):77–80.
 29. Depuydt T, Van Esch A, Huyskens DP. A quantitative evaluation of IMRT dose distributions: refinement and clinical assessment of the gamma evaluation. *Radiother Oncol* 2002;62(3):309–19.
 30. Low DA, Harms WB, Mutic S, Purdy JA. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Med Phys* 1998;25(5):656–61.
 31. Chaswal V, Weldon M, Gupta N, Chakravarti A, Rong Y. Commissioning and comprehensive evaluation of the ArcCHECK cylindrical diode array for VMAT pretreatment delivery QA. *J Appl Clin Med Phys* 2014;15(4):4832.