



# MR Linak Cihazları için Kalite Kontrol ve Kalite Güvencesi Raporu

## Guide for Quality Control and Assurance Tests in Mr-Linac Units

**Nazlı BİLİCİ GÜVEN,<sup>1</sup> Osman Artunç TÜRE,<sup>2</sup> Anatolia SERKİZYAN,<sup>3</sup> Uğur AKBAYIRLI,<sup>4,5</sup>  
Ebru Oruç BAKIR,<sup>4</sup> Görkem GÜNGÖR,<sup>3</sup> Hüseyin SERTEL,<sup>6</sup> Emre ŞANLI<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Hisar Intercontinental Hospital, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

<sup>2</sup>Acıbadem Altunizade Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

<sup>3</sup>Acıbadem Maslak Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

<sup>4</sup>Medicana Ataşehir Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

<sup>5</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Biyomedikal Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (BİYOTAM), Sakarya-Türkiye

<sup>6</sup>Liv Hospital Ulus, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

<sup>7</sup>Anadolu Sağlık Merkezi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, Kocaeli-Türkiye

### ÖZET

MFDGG005'in amacı ViewRay MR-Linac ve Elekta Unity MR-Linac sistemleri için kalite kontrol testlerini detaylandıran ulusal rapor oluşturulmasıdır. MR-Linac sistemleri, manyetik rezonans görüntüleme ile lineer hızlandırıcı teknolojisini birleştirerek radyoterapi tedavilerinde kullanılmaktadır. Kılavuz, cihazların güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için gerekli olan testleri ve prosedürleri açıklamaktadır. Kalite kontrol prosedürleri konvansiyonel linaklara benzer dahi olsa, MR'in her daim aktif olması sebebiyle yapılan kalite kontrol testlerinde ve kullanılan fantomlarda değişiklikler olmaktadır. Bu rapor, piyasada en çok kullanılan 1.5T Elekta Unity ve 0.35T MRIdian Viewray cihazının güvenlik, mekanik, dozimetrik ve MR görüntüleme testleri için uluslararası rehberler referans alınarak ve bu görev grubundaki kullanıcıların tecrübelerine dayanarak hazırlanmış bir rapordur. Her testin amacı, kullanılan yöntem ve ekipmanlar, tolerans aralıkları ve eylem düzeyleri sunulmuştur. Kullanıcılar tecrübe kazandıkça kendi fantomlarını oluşturabilir ve kendi testlerinin sıklıklarını belirleyebilirler. Bu kapsamlı kalite temini programları, radyoterapide MR-Linac sistemlerinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Dozimetri; güvenlik testleri; kalite kontrol; manyetik rezonans görüntüleme; MR-linac.

### SUMMARY

The purpose of MFDGG005 is to produce a national report detailing the quality control tests for the ViewRay MR-Linac and Elekta Unity MR-Linac systems. MR-Linac systems combine magnetic resonance imaging with linear accelerator technology for radiotherapy treatments. The guide describes the tests and procedures required to ensure the safe and effective operation of the devices. Although the quality control procedures are similar to conventional linacs, there will be changes in the quality control tests and phantoms used due to the fact that MR is always active. This report is a report prepared based on the experience of users in this task group, based on international guidelines for safety, mechanical, dosimetric and MR imaging tests of the most commonly used 1.5T Elekta Unity and 0.35T MRIdian Viewray devices on the market. The purpose of each test, the methods and equipment used, tolerance ranges and action levels are presented. As users gain experience, they can create their own phantoms and determine the frequency of their own tests. These comprehensive quality assurance programs will ensure the safe and effective operation of MR-Linac systems in radiotherapy.

**Keywords:** Dosimetry; safety tests; quality control; magnetic resonance imaging; MR-linac.

Copyright © 2024, Turkish Society for Radiation Oncology



## 1. GİRİŞ

Manyetik rezonans (MR) tabanlı lineer hızlandırıcı (MR-Linak) teknolojisi ve klinik uygulamaları uzun zamandan beri konvansiyonel ve hipo-fraksiyone tedavilerde kullanılmaktadır.[1] Raporun bu bölümü ViewRay MR-Linac cihazları için kalite temini programı oluşturulurken yol gösterici olarak kullanılması amacı ile hazırlanmıştır.

## 2. LİNAK TEKNİK ÖZELLİKLERİ

ViewRay MRIdian Linak 30/sn hızında dönebilen bir gantry üzerinde, S-bandında çalışan ve 90 cm'lik bir kaynak eksen mesafesine (SAD) sahip bir sistemdir.[2,3] Doz hızı 600 cGy/dk olan 6 MV enerjisine sahip FFF X-ışını üretir. Tedavi demeti çift yığın, çift odaklı çok yapraklı kolimatör (MLC) ile şekillendirilir. MLC'ler üst üste iki katlı toplam 138 tungsten alaşımli yapraktan oluşur. Açılabilen en küçük alan boyutu 0.2×0.415 cm<sup>2</sup> ve en büyük alan boyutu 27.4×24.1cm<sup>2</sup>'dir. MLC'lerin konumlanma hızı 4.5 cm/sn'dir.[3]

## 3. GÜVENLİK TESTLERİ

### Amaç

Oluşabilecek radyasyon kazaların engellemek, acil durumların sonuçlarını hafifletmek ve kontrol altına almak, çalışanları ve halkı korumak amacı ile aşağıdaki tabloda belirtilen güvenlik testleri günlük, aylık ve yıllık olarak kontrol edilmelidir.

### Yöntem ve Ekipmanlar

Acil durum talimatı, cihaz kullanım kılavuzları, kapıda ve ilgili bölgelerde radyasyon uyarı etiketleri, kamera sistemi, hasta ile haberleşme sistemi, kapı üzerindeki ışıklı radyasyon uyarı sistemi, tedavi konsolu üzerindeki acil durdurma butonu, oda içerisindeki ikincil acil durdurma butonu, kapı açık olduğunda radyasyonu kesen kontrol sistemi, sıcaklık-basınç-nem göstergesi kontrolü, tedavi odasında ve hasta üzerinde metal kontrolü, SF6 kontrolü, helyum kontrolü, lazer kontrolü düzenli aralıklarla yapılmalıdır.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Fonksiyonel olmalıdır. Günlük olacak şekilde tekrarlanmalıdır.

## 4. MLC KALİTE KONTROLÜ

### 4.1. Picket Fence Testi

#### Amaç

Picket Fence testi klasik MLC sistemlerine sahip linaklarda uzun zamandan beri MLC pozisyon doğruluğu

için kullanılan bir testtir. Statik ve kayan MLC'ler için kullanılmaktadır. MRIdian gibi sistemlerde ise klasik kolimatörlere sahip olmadığından ve çift odaklı üst üste ikili MLC'lere sahip olması nedeniyle Picket Fence testi hem üst hem de alt MLC grubu için ayrı ayrı ve beraber hareket halindeyken test edilmelidir. MRIdian sistemlerinde step and shoot tedavi tekniği uygulandığı için ışınlama sırasında MLC'ler statiktir ve Picket Fence testi statik MLC hareketine göre tasarlanmalıdır.

### 4.2. Üst MLC Testi

Üst MLC *Picket Fence* testinde SAD 90cm ve derinlik 5cm olacak şekilde gantri 0°, 90° ve 270°de, kolimasyon üst MLC açık (Alt MLC'ler en geri pozisyonda park halinde), sol ve sağ MLC'ler arası 10 mm açıklıkta 5 farklı Alan dışı (off-axis) konumda, 3.konum merkez ekseninde, katı fantomda film kullanılarak (EBT3 veya EBT4) her bir picket fence açıklığı için 300MU (Monitor Unit) ile toplam 1500 MU film üzerinde ışınlama yapılır.

### 4.3. Alt MLC Testi

Alt MLC *Picket Fence* testinde SAD 90cm derinlik 5cm olacak şekilde gantri 0°, 90°, 270°de, kolimasyon alt MLC açık (Üst MLC'ler en geri pozisyonda park halinde), sol ve sağ MLC'ler arası 10 mm açıklıkta 5 farklı Alan dışı (off-axis) konumda, 3. konum merkez ekseninde, katı fantomda film kullanılarak (EBT3 veya EBT4) her bir picket fence açıklığı için 300MU (Monitor Unit) ile toplam 1500 MU film üzerinde ışınlama yapılır.

### 4.4. İkili MLC Testi

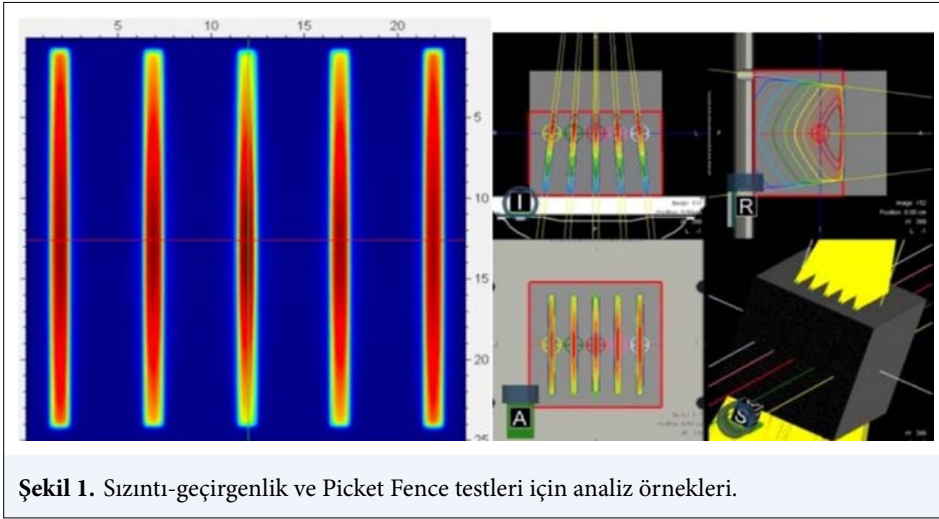
İkili MLC *Picket Fence* testinde SAD 90cm derinlik 5cm olacak şekilde gantri 0°, 90°, 270°de, kolimasyon ikili MLC açık, sol ve sağ MLC'ler arası 10 mm açıklıkta 5 farklı Alan dışı (off-axis) konumda, 3. konum merkez ekseninde, katı fantomda film kullanılarak (EBT3 veya EBT4) her bir picket fence açıklığı için 300MU (Monitor Unit) ile toplam 1500 MU film üzerinde ışınlama yapılır (Şekil 1).

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Film analizinde ikili MLC'lerin konumlanma düzlüğünün 1mm'den az olması beklenir.

### 4.5. Üst MLC için Sızıntı ve Geçirgenlik Testi

Üst MLC için sızıntı ve geçirgenlik testinde SAD 90cm ve derinlik 5cm olacak şekilde, Alt MLCler park halindeyken, üst MLC'ler sola ve sağa dayalı olacak şekilde alan kapatılır. Katı fantomda iyon odası kullanılarak yapılır. Ölçümde, İkili MLC ile 20×20 cm açık alanda 6000 MU ışınlama ile okuma alınır. Sola dayalı Üst MLC ve park halinde Alt MLC ile 6000 MU ışınlama ile okuma alınır. Sağa dayalı Üst MLC ve park halinde Alt MLC ile 6000



Şekil 1. Sızıntı-geçirgenlik ve Picket Fence testleri için analiz örnekleri.

MU ışınlama ile okuma alınır. Sola ve sağa dayalı okumaların ortalaması alınır. Açık alan okumasına bölünür. Üst MLC için sızıntı ve geçirgenlik değeri elde edilir.

#### 4.6. Alt MLC için Sızıntı ve Geçirgenlik Testi

Alt MLC için sızıntı ve geçirgenlik testinde, üst MLC sızıntı ve geçirgenlik testinde anlatılan ölçüm düzeneği kurulur. Üst MLC'ler park halindeyken, alt MLC'ler sola ve sağa dayalı olacak şekilde alan kapatılır.

#### 4.7. İkili MLC Sızıntı ve Geçirgenlik Testi

İkili MLC sızıntı ve geçirgenlik testinde, üst MLC sızıntı ve geçirgenlik testindeki ölçüm düzeneği kurulur. MLC'ler sola ve sağa dayalı olacak şekilde kapalı haldeyken, ölçüm aynı şekilde yapılır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Ölçüm değerleri ve TPS hesaplama değerleri arasındaki fark kıyaslanır. Tolerans aralığı  $< \%1$  olarak önerilmektedir.

## 5. MANYETİK REZONANS GÖRÜNTÜLEME TESTLERİ

### 5.1. Signal-to-Noise Ratio (SNR)

#### Amaç

Signal-to-Noise Ratio (SNR), bir MR görüntüsündeki yararlı sinyal seviyesinin, istenmeyen gürültü (noise) seviyesine oranını ifade eder. SNR, bir görüntünün kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek SNR, daha net ve daha detaylı görüntüler elde edilmesini sağlar, bu da tanısal doğruluğu artırır. Düşük SNR ise görüntüdeki detayların kaybolmasına, kontrastın azalmasına ve tanısal doğruluğun düşmesine neden olabilir.[4,5]

### 5.2. Uniformity

#### Amaç

*Uniformity*, bir MR görüntüsündeki sinyal yoğunluğunun homojenliğini ve tutarlılığını ifade eder. Yüksek *uniformity*, görüntüdeki tüm bölgelerin eşit şekilde aydınlatıldığını ve sinyal yoğunluğunun tutarlı olduğunu gösterir. *Uniformity*, MR cihazının tüm ilgili bölgelerde tutarlı performans gösterdiğini ve görüntü kalitesinin tekdüze olduğunu garanti eder.[6,7]

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Gövde (Torso Coil) koili (Şekil 2) ve baş boyun koili için ayrı ayrı test yapılmalıdır. Silindirik fantom tutucu düzeneğin içerisine 24 cm çapındaki küresel fantom yerleştirilir. Lazerler yardımıyla, küresel fantom sanal izomerkeze gelecek şekilde ayarlanır. Yükseklik lazer eşleştirmesi için silindirik fantom tutucunun ortasındaki çizgi kullanılır. Son olarak alt ve üst koiller birbirlerine bantlanarak yatak gerçek izomerkeze gönderilir.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

*Uniformity* formülü sonucu  $20'$  nin altında kaldığında klinik değerlendirme önerilir. SNR sonucu da  $30'$  un altında kaldığında klinik değerlendirme önerilir (Şekil 3, 4).[8]

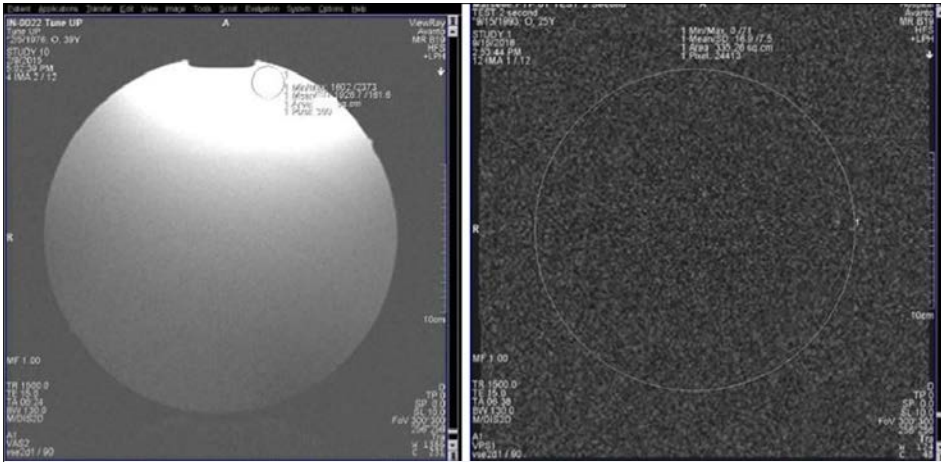
### 5.3. Spatial Integrity (Mekansal Bütünlük)

#### Amaç

*Spatial Integrity*, MR görüntüsünün uzaysal doğruluğunu ve geometrik doğruluğunu ifade eder. Yüksek *spatial Integrity*, görüntüdeki anatomik yapıların doğru ve orantılı olarak temsil edildiğini gösterir. Bu, özellikle hastalık tanıları ve hassas tedavi planlamaları için kritik öneme sahiptir.[8]



Şekil 2. Gövde ve Baş-boyun koili ile test setupü.



Şekil 3. SNR ve Uniformity örnek analiz görüntüleri.  
SNR: Sinyal-gürültü oranı.

Torso Normalization OFF (SN)							Torso Normalization ON (SN)						
	Noise SD	Mean	Min	Max	SNR	Uniformity		Noise SD	Mean	Min	Max	SNR	Uniformity
Tra	13.3	983.3	593	1804	51.8		Tra	28.9	1014.7	904	1138		88.5
Sag	13.3	869.8	597	1654	45.8		Sag	26.6	994.7	892	1147		87.5
Cor	13.4	727	585	977	38.0		Cor	22.8	989	867	1093		88.5

Şekil 4. SNR ve Uniformity testleri için örnek analiz sonuçları.

## Yöntem ve Ekipmanlar

*Spatial Integrity* ölçümü için uygun fantom kullanılır (Şekil 5). Eğer 2 boyutlu bir fantom kullanılıyorsa, fantom test yapılmak istenen eksene göre (aksiyal, koronal veya sagittal) tedavi masasına yerleştirilir. Fantom üzerindeki merkez çizgileri ile lazerler eşleştirilerek fantom sanal izomerkez konumlandırılır ve tedavi masası gerçek izomerkeze gönderilir. Aynı test, fantom izomerkezden +7,5cm, -7,5cm ve +12,5cm, -12,5cm uzaklıkta olduğu konumlar için tekrarlanır.

## Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

*Spatial Integrity* iç daire çapı 20 cm'de analiz değeri 1 mm, dış daire çapı 35 cm'de analiz değeri 2 mm'nin

üzerinde olduğu takdirde klinik değerlendirme önerilir (Şekil 6).[8]

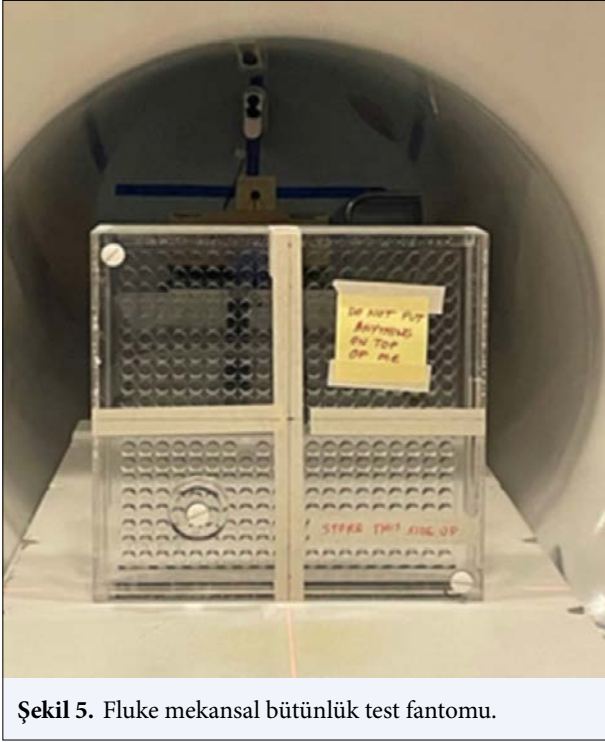
## 5.4. Homojenite

### Amaç

Homojenite, manyetik alanın tekdüzeliğini ve tutarlılığını ifade eder. Yüksek homojenite, manyetik alanın her noktada aynı güçte olduğunu gösterir ve bu da görüntü kalitesini doğrudan etkiler. Homojen bir manyetik alan, daha net ve artefaksız görüntüler elde edilmesini sağlar.

## Yöntem ve Ekipmanlar

24 cm çapında SNR fantomu mavi altılığıyla beraber tedavi masasına yerleştirilir. Fantomun üzerindeki çap-



Şekil 5. Fluke mekansal bütünlük test fantomu.

raz çizgiler lateral ve long. yönde hizalanır. Yükseklik için çizgi bulunmamaktadır ancak fantomun orta noktasına yaklaştığında sağ ve sol lazerin birbirine yaklaşım üst üste bindiği görülecektir. Koiller kullanılmayacaktır. Yatak gerçek izomerkeze gönderilir. Ölçümler gantri açısı 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330° olacak şekilde yapılmalıdır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

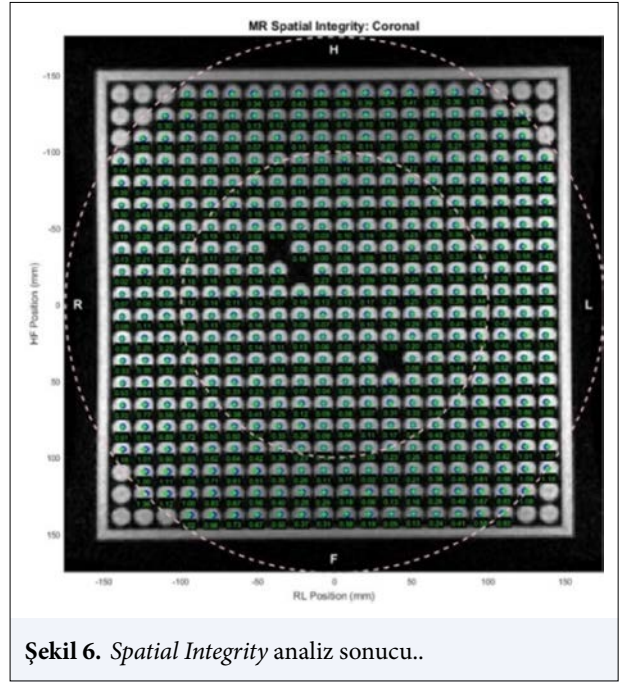
Maksimum değer in yarısında tam genişlik (FWHM) değeri 4' ün üzerinde olduğu takdirde klinik değerlendirme önerilir (Şekil 7).[8]

## 6. LİNAK DOZİMETRİK TESTLER

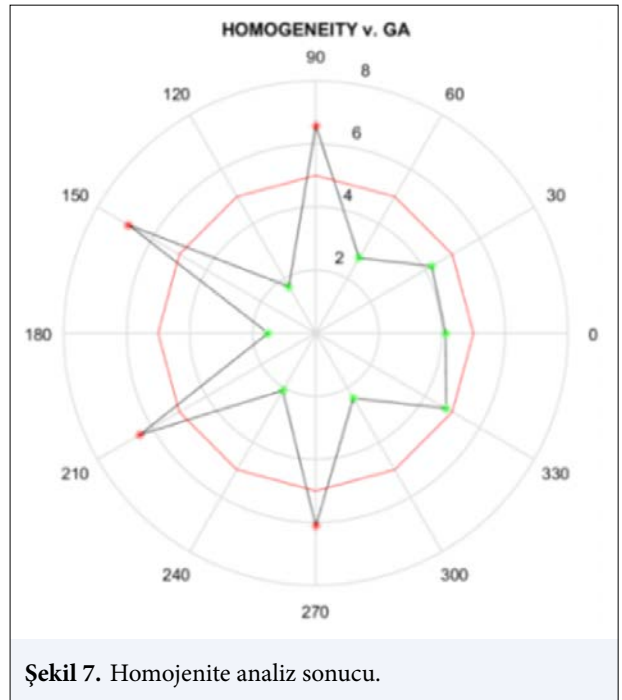
### 6.1. Yüzde Derin Doz (PDD)

#### Genel Bilgi ve Amaç

Klinik dozimetri, hem referans hem de referans dışı koşullar için alan boyutu ve şeklinin bir fonksiyonu olarak merkezi eksen PDD dağılımları, TPR'ler (Doku Fantom Oranı) veya TMR'ler (Doku Maksimum Oranı), izodoz dağılımları, enine ışın profilleri ve output (doz verimi) faktörlerinin ölçümlerini gerektirir. Dozimetrik kalite kontroller ve kabul testleri, uygun radyasyon dedektörlerine sahip doku eşdeğeri fantomlarda yapılır. Dozimetrik testler; derinlik, alan boyutu, kaynak yüzey mesafesi (SSD) veya kaynak eksen mesafesi (SAD) referans koşullarında belirlenir.[9]



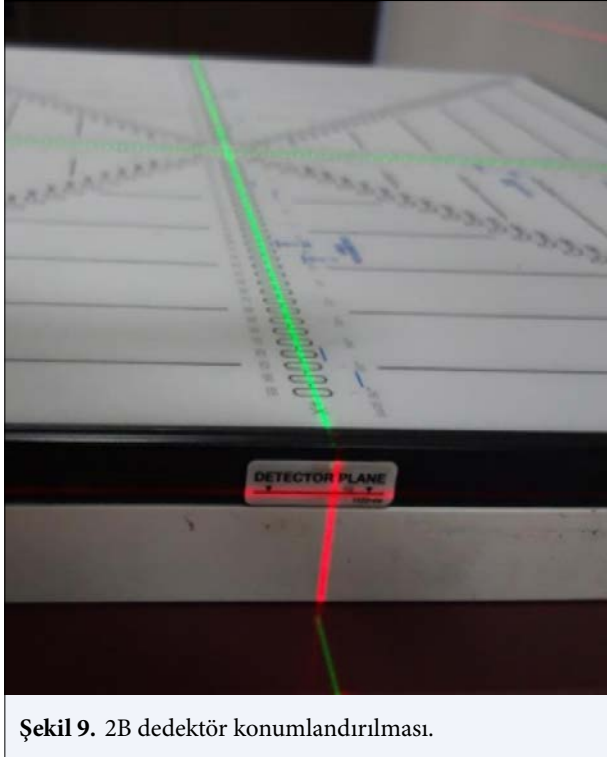
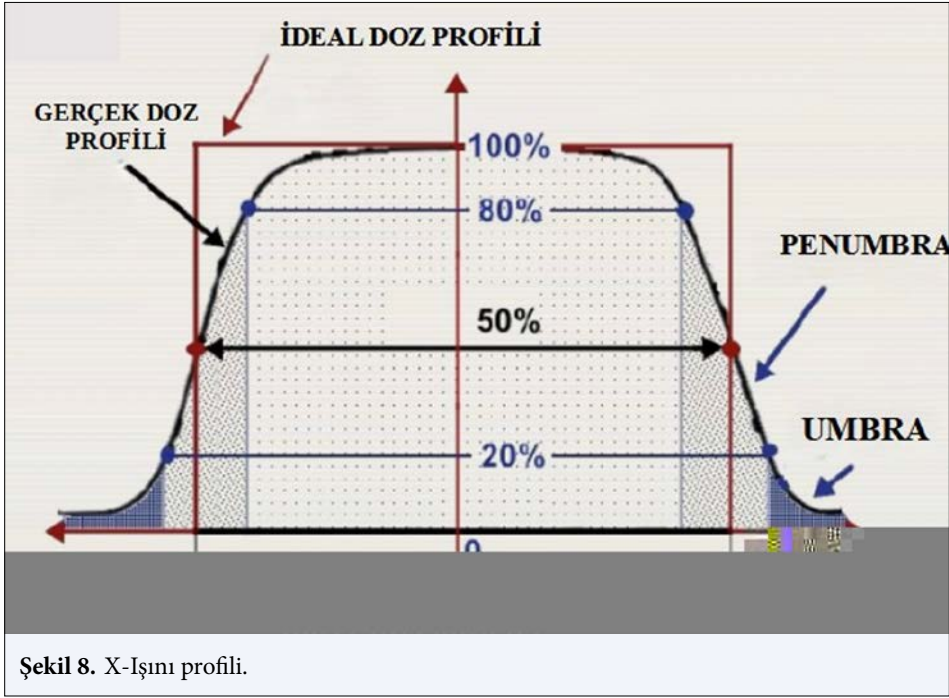
Şekil 6. Spatial Integrity analiz sonucu..



Şekil 7. Homojenite analiz sonucu.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Lineer hızlandırıcı, kaynak-eksen mesafesinde (90 cm) 600 cGy/dakika doz hızına sahip 6 MV FFF foton ışınları üretmektedir. Yüzde derin doz ölçümleri su fantomu ile yapılmaktadır. Ölçüm için MR uyumlu Pin-Point, SemiFlex ve küçük alanlar için MicroDiamond gibi iyon odaları kullanılabilir. Ölçümler için fantom



lazerler yardımıyla merkeze konumlandırılır. İyon odası, ışının merkezi ekseninde olacak şekilde, su yüzeyine ayarlanır ve bu koordinat (0, 0, 0) orijin olarak belirlenir. Alan ışığı sistemi bulunmadığından SSD veya SAD mesafe ölçümü yapılamaz. Bu nedenle su yü-

zeyi lateral lazerlere göre ayarlanır ve iyon odasının su yüzeyindeki konumu kontrol edilir. Dedektör su fantomunda (0, 0, 0) noktasına getirildikten sonra 10x10 cm alanda ve cihaz alanının maksimum olduğu değerlerde açılarak 20cm derinlikten başlanarak ölçüm alınır ve  $d_{max}$ , 5cm, 10cm, 20cm) değerleri kontrol edilir.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Yüzde derin doz ölçümlerinin yıllık olarak gerçekleştirilmesi tavsiye edilir. tolerans aralığı  $\pm\%1$  olarak önerilmiştir.[10]

## 6.2. Profil, Simetri ve Unflatness Ölçümleri

### Genel Bilgi ve Amaç

#### Doz Profilleri

Üç boyutta, merkez ekseninde (dikey z-ekseni) sabit bir noktaya göre x veya y eksenindeki noktaların doz değerlerinin taranmasına "doz profili" denir (Şekil 8).

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Geleneksel olarak, 3B su fantomu ışın dozimetri doğrulaması için kullanılır ancak MR Linak cihazlarında 3B (üç boyutlu) su fantomu kullanımında bazı teknik zorluklar vardır. Bu nedenle literatürde ışın dozimetri doğrulaması için 3B su tankına alternatif yöntemler önerilmiştir.[11] Profil, Simetri ve Unflatness ölçümlerinde alternatif olarak 2B dedektörler kullanılabilir (Şekil 9).

2B dedektör kurulumu yapıldıktan sonra *buildup* bölgesi oluşturmak için üzerine 0.5 cm katı su fantomu

yerleştirilebilir. Değerlendirilmek istenen alan boyutlarında ışınlamalar yapılır ve ölçüm sonuçları analiz edilir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Simetri ve Unflatness için tolerans aralığı  $\pm\%2$  olarak önerilmiştir. Ölçümün aylık olarak yapılması tavsiye edilir.[10]

### 6.3. TMR ve TPR

#### Genel Bilgi ve Amaç

TPR<sub>10</sub><sup>20</sup> 10×10 cm<sup>2</sup> referans alan boyutu için 20 cm ve 10 cm derinliklerde ölçülen D20 ve D10 dozlarının oranıdır. Bu oran, foton demetinin kalitesinin bir göstergesi olarak tanımlanmıştır. TMR ise, “Fantomda belirli bir noktadaki dozun, aynı kaynak noktası mesafesindeki maksimum doza oranı” olarak tanımlanır.[9]

$$TMR = \frac{D_Q}{D_{Qmax}}$$

#### Yöntem ve Ekipmanlar

TMR ölçümleri katı fantom ile alınabilir. TMR ölçümü için MR uyumlu Pinpoint, Semiflex veya Farmer tipi iyon odaları kullanılabilir.

Masa saçılmasını önlemek için 10 cm kalınlığında katı fantomlar tedavi masasına yerleştirilir ve üzerine kullanılacak iyon odasına özel delikli fantom yerleştirilir ve lazerlere göre merkeze pozisyonlandırılır. İyon odası yerleştirilen delikli fantom üzerine tekrar katı fantom konularak 10 cm derinlik elde edilir. Fantomlar yerleştirilirken arada hava boşluğu kalmamasına dikkat edilir. TMR10 ölçümü için setup'ü tamamlanan fantomlar izomerkeze gönderilir. Gantry: 0°, Alan Boyutu 9,96 cm×9,96 cm, MU: 100 olacak şekilde ölçüm alınır. Aynı ölçüm koşullarında fantomların üzerine 10 cm daha fantom eklenerek iyon odası derinliğinin 20 cm olması sağlanır ve tekrar ölçüm alınır. Ölçülen TPR20 ve TPR10 değerleri oranlanarak TPR<sub>10</sub><sup>20</sup> değeri bulunur.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Ölçümlerin yıllık olarak tekrarlanması tavsiye edilir. Tolerans aralığı olarak  $\pm\%1$  önerilmiştir.[10]

### 6.4. Output Doğruluğu – Referans Alan

#### Genel Bilgi ve Amaç

Lineer hızlandırıcılardan istenen dozu elde etmek için bir referans noktada doz verimi (*output*) ölçülmelidir. Bir lineer hızlandırıcının doz veriminin bir referans noktada monitör birimi (MU) başına 1cGy olacak şekilde ayarlanmasına doz kalibrasyonu denir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

*Output* doğruluğu için MR uyumlu Pinpoint, Semiflex veya 0,6 cc Farmer iyon odaları kullanılarak katı fantomda yapılabilir. Sıcaklık ve basınç etkisinin hesaplanabilmesi için termometre ve barometre kullanılmasıdır.

Katı fantomların düzgün konumlandırılmasını sağlamak için *lockbar* kullanılabilir. Fantomlar üst üste yerleştirilirken arada hava boşluğu kalmamasına dikkat edilmelidir. *Gantry* 0°de, alan boyutu 9,96 cm x 9,96 cm ve ışınlama süresi 100 MU olacak şekilde ışınlama parametreleri ayarlanır. Elektrometreden okuduğunuz yük değeri ile doz verimi değeri hesaplanır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Doz verimi ölçümünün haftalık olarak gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca, günlük olarak da 2B dedektörler ile kontrol edilebilir. Tolerans aralığı  $\pm\%2$  olarak önerilmektedir.[10]

### 6.5. Output Alana Bağlı Doğruluk

#### Genel Bilgi ve Amaç

Doz verimi için referans alan boyutu genellikle 10×10cm<sup>2</sup>'dir, ancak tedavilerde farklı alan boyutları da kullanılmaktadır. Bu nedenle, farklı alan boyutları için doz verimi doğruluğunun kontrol edilmesi gerekir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

İyon odası 10 cm derinlikte olacak şekilde katı fantomlar ile setup yapılır. *Gantry* 0°de, alan boyutu 9,96 cm×9,96 cm ve ışınlama süresi 100 MU olacak şekilde ışınlama parametreleri ayarlanıp, referans okuma alınır. Daha sonra 3,32×3,32cm<sup>2</sup>, 4,15×4,15cm<sup>2</sup>, 6,64×6,64cm<sup>2</sup>, 8,3×8,3cm<sup>2</sup>, 10×10cm<sup>2</sup>, 12,45×12,45cm<sup>2</sup>, 14,94×14,94cm<sup>2</sup>, 16,06×16,06cm<sup>2</sup>, 19,92×19,92cm<sup>2</sup>, 24,1×24,1cm<sup>2</sup>, 27,2×24,1cm<sup>2</sup> alan boyutları için okumalar alınır ve referans alan okuması ile oranlanarak alanların *output* faktörleri bulunur.

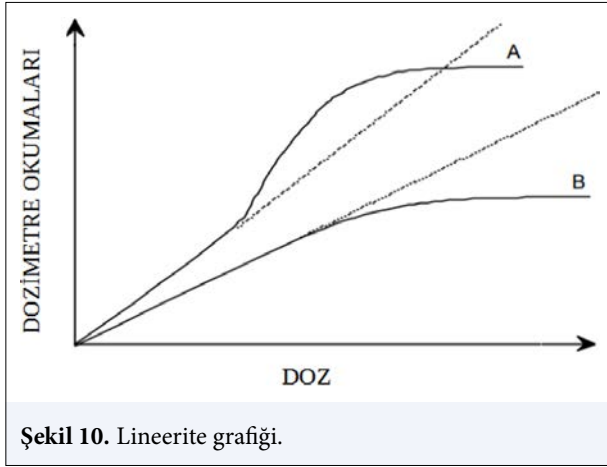
#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

*Output* faktörleri ölçümünün aylık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı olarak  $\pm\%2$  önerilmektedir.[11]

### 6.6. Lineerite

#### Genel Bilgi ve Amaç

İdeal olarak, yük okuması (M), doz (Q) ile doğrusal orantılı olmalıdır. Ancak, belirli bir doz aralığının ötesinde doğrusal olmayan bir durum ortaya çıkar. Doğrusallık aralığı ve doğrusal olmayan davranış, dozimetrenin türüne ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Dozimetri sistemlerinin tepki özelliklerine ilişkin iki tipik örnek Şekil 10'da verilmiştir. Eğri A önce dozla doğrusallık, sonra supralineer bir davranış ve son olarak doyunluk gösterir. Eğri B ise önce doğrusallık ve sonra yüksek dozlarda doyunluk gösterir. Genel olarak, doğrusal olmayan bir davranış için düzeltme yapılmalıdır. Bir dozimetre ve okuyucusu doğrusal olmayan özellikler gösterebilir ancak bunların birleşik etkisi daha geniş bir aralıkta doğrusallık üretebilir.[9]



Şekil 10. Lineerite grafiği.

### Yöntem ve Ekipmanlar

MR uyumlu Pinpoint, Semiflex veya 0,6 cc Farmer iyon odaları kullanılarak katı fantomda yapılabilir. Sıcaklık ve basınç etkisinin hesaplanabilmesi için termometre ve barometre kullanılmalıdır. Katı fantomların düzgün konumlandırılmasını sağlamak için *lockbar* kullanılabilir. Fantomlar üst üste yerleştirilirken arada hava boşluğu kalmamasına dikkat edilmelidir. *Gantry* 0°de, alan boyutu 9,96 cm x 9,96 cm ve ışınlama süresi 100 MU olacak şekilde ışınlama parametreleri ayarlanır. Düşük MU lineeritesinin kontrolü için 1MU, 2MU, 5MU, 10MU, 15MU, 20MU ışınlama yaparak elektrometre ile okumalar alınır. Yüksek MU lineeritesinin kontrolü için 20MU, 50MU, 100MU, 200MU, 500MU ışınlama yaparak okumalar alınır.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Lineerite ölçümü yıllık olarak gerçekleştirilen standart QA kontrollerinden biridir. AAPM TG142 lineerite testi için IMRT olmayan tedavilerde <5MU için +/-2%; IMRT, SBRT ve SRS tedavilerinde 2-4 MU için ±5% ve <1MU için ±2% tolerans aralıklarını önermiştir.[10]

## 6.7.Masa Geçirgenlik (Transmission) Faktörü

### Genel Bilgi ve Amaç

Klasik Linaklarda kullanılan karbon fiber tedavi masaları iletken özelliklerinden dolayı MR-Linak cihazlarında kullanıma uygun değildir. Bu nedenle kompozit malzemeden yapılmış masalar kullanılmaktadır. Fakat bu masalarda doz düşüşü fazla olduğundan dolayı geçirgenlik faktörü ölçülmelidir.

### Yöntem ve Ekipmanlar

Ölçüm için kullanılacak olan dedektörler mutlaka MR uyumlu olmalıdır, Pinpoint, Semiflex ve 0.6 cc Farmer iyon odaları kullanılabilir. İyon odası 10 cm

derinlik olacak şekilde katı fantomlar yerleştirilir. *Gantry* 270° ve 90° referans hava değeri olarak kabul edilir. *Gantry* 300°den 270°ye kadar 10°lik aralıklarla, *Gantry* 270°den 90°ye kadar 1°, 2°, 3°, 5°, lik dar aralıklarla okumalar alınır.

Referans hava değeri:

$$D_{\text{açık alan}} = \frac{D_{\text{geçirgenlik}}(G^0)}{\frac{G(270)^0 + G(90)^0}{2}}$$

formülü ile farklı açılardaki masa transmission faktörü hesaplanır.[12]

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Hava boşluklarının ve manyetik düzeltme faktörlerinin dozimetrik etkileri dikkate alınmalıdır. Masa geçirgenlik faktörünün bulunması tüm tedavi cihazları için mutlaka yapılması gereken kalite kontroller arasındadır.

## 7. LİNAK MEKANİK TESTLERİ

### 7.1. MR Eşmerkez vs Gantry Açısı

#### Genel Bilgi ve Amaç

*Gantry* pozisyonundaki değişiklikler, MR-linak sistemlerinin geometrik güvenilirliği için kritik öneme sahip olan B0/B1 alan homojenliğini etkileyebilir.[13]

#### Yöntem ve Ekipmanlar

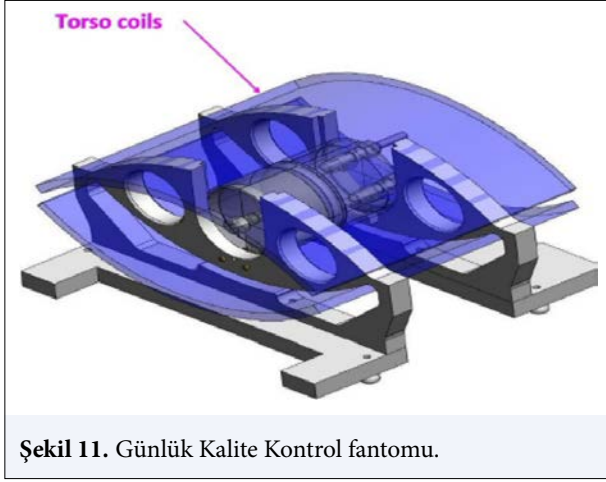
Günlük kalite kontrol fantomu ve film dozimetre yazılımları kullanılır. Şekil 11'deki günlük kalite kontrol fantomunun konumlandırılması için fantomu masanın 2. ve 3. çentiğine yerleştirilir.

*Gantry* açısı kontrolü için fantom X, Y, Z koordinatlarında lazerlere göre konumlandırılır. *Gantry* yönündeki (Z eksen) lazer piramidin başlangıcına göre ayarlanır. Gövde koillerin bağlantıları yapılır ve günlük fantom eşmerkeze gönderilir. TPS'de TRUFI 1,5x1,5x1,5 hızlı MR görüntüleme modunda *Gantry* 00'de günlük QA fantomunun MR görüntüsü alınır. *Gantry* 00'deki MR görüntüsü referans kabul edilir. Aynı MR çekim parametrelerinde *Gantry* 300, 150, 3450, 3300,3150, 3000, 2850, 2700, 2550, 2400, 2250, 2100, 1950, 1800, 1650, 1500, 1350, 1200, 1050, 900, 750, 600, 450 açılarındaki görüntüler alınıp *Gantry* 00'deki görüntü ile füzyon edilir. Her bir görüntünün X, Y, Z koordinatlarının değeri kontrol edilir ve tabloya işlenir.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

*Gantry* açısı kontrolü testinin aylık olarak yapılması tavsiye edilir. Tolerans aralığı ±1° olarak önerilmektedir.[10]





Şekil 11. Günlük Kalite Kontrol fantomu.



Şekil 12. Elekta Unity 1.5T MR Linak.

## 7.2. Gantry Açısı Kontrolü

### Yöntem ve Ekipmanlar

MR uyumlu hasta kalite kontrol fantomu ve yazılımı kullanılır. Üzerinde belirtilmiş olan çizgiler referans alınarak, fantom lazerlere göre konumlandırılır ve eşmerkeze gönderilir. Gantry 0°, 40°, 80°, 120°, 160°, 200°, 240°, 280°, 320°, 360° açılarında 50 MU ışınlama yapılır ve sonuçlar değerlendirilir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Gantry açısı kontrolünün yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı  $\pm 1^\circ$  olarak önerilmektedir.[10,13]

## 7.3. Masa Pozisyon Doğruluğu

### Genel Bilgi ve Amaç

Masanın düzgün ve doğru çalışma açısından fiziksel olarak değerlendirilmelidir.

### Yöntem ve Ekipmanlar

Masa pozisyon doğruluğu için masa çok küçük kaydırmalardan büyük kaydırmalara doğru sırasıyla 1 mm, 2 mm, 5 mm, 1 cm, 3 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 155 cm kaydırılır. Tedavi masasının her bir dijital kaydırılması için tedavi masasının gerçek kayması bir referans belirlenerek cetvel ile ölçülür. Bütün verilen kaydırma değerleri için doğruluk kontrol edilir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Masa pozisyon doğruluğu testinin aylık olarak yapılması tavsiye edilir. Tolerans aralığı olarak  $\pm 1$ mm önerilmektedir.[14]

## 1.5T UNITY MR LİNAK KALİTE KONTROL TESTLERİ

Şekil 12'de gösterilen Elekta Unity, 7 Megavoltaj (MV) düzleştirici filtersiz lineer hızlandırıcı cihazı ve 1,5 Tes-

la (T) manyetik rezonans (MR) görüntüleme cihazını entegre eden bir sistemdir. Kaynak izomerkez uzaklığı (SAD) mesafesi 143,5cm'dir. Cihazın maksimum tedavi alanı boyutu 57.4×22 cm<sup>2</sup>'dir.[15]

## 1. GÜVENLİK TESTLERİ

### 1.1. Radyasyon Kapısı, Işın Göstergesi, Ekipman, Kamera-Ses Sistemi, Klima-Havalandırma, Sıcaklık, Basınç ve Nem Göstergesi Kontrolü Amaç

Hasta tedaviye girmeden önce, radyoterapi teknikeri cihaz ekipmanlarının çalışır olduğundan ve radyasyon-MR güvenliği açısından cihazın standartlara uygun olduğundan emin olmalıdır.

### Yöntem ve Ekipmanlar

Radyoterapi teknikerleri, günlük olarak cihazı ısıtırken, radyasyon kapısını ve ışın göstergesinin doğruluğunu test edebilirler.[16] MR-linak da kullanılan kamera-ses sistemi, klima-havalandırma, MR coil, kulaklık, acil durum butonu ve hasta sabitleme ekipmanlarının da çalışıp çalışmadığı kontrol edilmelidir. Klima-havalandırma sistemlerinin sıcaklık ve nem değerlerinin istenilen aralıkta olmasına dikkat edilmelidir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Tolerans aralığı olarak sıcaklık için 18°-22°, nem değeri ise %70'i geçmemeli ya da ekipmanlar fonksiyonel olup, çalışmalıdır. Cihazdaki acil durum butonlarının ve kumanda üzerindeki ışın kesme butonunun aylık olarak kontrol edilmesi önerilmektedir.[17]

## 2. MEKANİK TESTLER

### 2.1. Gantry Açısı Göstergesi Kontrolü

#### Amaç

Gantry açısının dijital doğruluğunun belirlenmesidir.[16]

## Yöntem ve Ekipmanlar

Testin, *gantry* üzerinde 270°'lik ve 90°'lik açı noktalarında su terazisi kullanılarak yapılması önerilir.[18]

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

*Gantry* açılı göstergesi testi aylık test grubuna girmekte olup, su fantomuyla alınacak olan dozimetrik testler öncesinde tekrar yapılması tavsiye edilir. Tolerans aralığı %0.3° olarak önerilmektedir. Cihaz *beam data* ölçümlerinde aralık %0.1°'dir.[16]

## 2.2. Kalite Temini Platformu Kalibrasyonu

### Amaç

QA platform (Şekil 13), üzerine konulan ölçüm ekipmanlarını eşmerkez de konumlandırmamıza yarayan kalite kontrol ekipmanıdır.[19]

### Yöntem ve Ekipmanlar

QA platformuna MV hizalama fantomu yerleştirilir ve eşmerkeze gönderilir. Masayı doğru konuma getirdikten sonra, cihaz servis modundayken ışınlanacak alan seçilir ve fantomun MV görüntüsü alınarak veri analiz programına (DPPC) gönderilir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Dozimetrik işlemler ve hasta kalite kontrolü için aylık olarak kontrol edilmesi önerilmektedir. DPPC programından gelen limit içinde ( $\pm 0.3\text{mm}$ ) olması beklenir.[19]

## 2.3. Radyasyon Eşmerkezi Testi

### Amaç

Bu test ile uzaydaki mutlak radyasyon izomerkezinin yarıçapı ve pozisyonunun kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.[18]

### Yöntem ve Ekipmanlar

MV hizalama fantomu ve QA platform kullanılır (Şekil 13). MV panel alanlarının görüntüleri çekilip, görüntüler RIT veya AQUA gibi analiz programlarda analiz edilir. Alternatif olarak, yıldız testi için *gantry*'nin farklı pozisyonlarında film çekimi yapılabilir. 1,5 Tesla MR linak cihazlarında, manyetik alan nedeniyle filmde oluşabilecek doz kaymasını önlemek için filmin üzerine bakır levha yerleştirilir.[17]

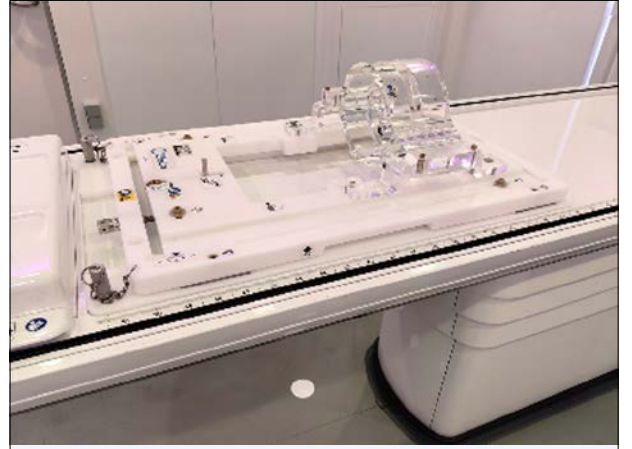
### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin sıklığı, SRS, SBRT uygulanan cihazlar için aylık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı  $\leq 0,5\text{mm}$  olarak önerilmektedir.[3]

## 2.4. Masa Boyuna Hareket Kontrolü

### Amaç

Bu test, QA ekipmanlarını doğru konuma göndermek için önemlidir.[18]



Şekil 13. QA platform ve hizalama fantomu.  
QA: Kalite temini platformu.

## Yöntem ve Ekipmanlar

Şekil 13'deki ekipmanlar sabitleme aparatıyla, MR-Linak masasının üzerinden bulunan numaralardan birine yerleştirilir ve konsoldan servis moduna masadaki numaraya denk gelen bir sayı yazılarak platform direkt olarak izomerkeze gönderilir. MV hizalama fantomundaki bilyelerin doğru konuma gidip gitmediği, üretici firmanın programı ile test edilir. Bu işlem her pozisyon için tekrarlanır ve koordinat değerlerindeki en büyük sapma kaydedilir.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin aylık olarak yapılması tavsiye edilmektedir.[17] Bu test için tolerans aralığı olarak  $\leq 1\text{mm}$  önerilmektedir.[17]

## 2.5. MLC (Çok yapraklı Kolimatör) Testleri

### Amaç

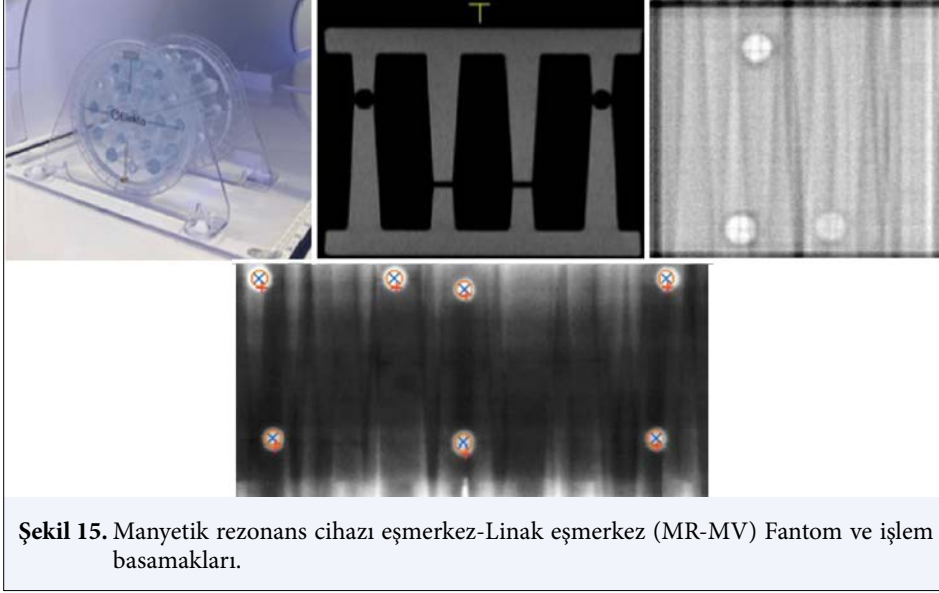
Bu test ile, MLC yaprakları tarafından tanımlanan bitişik alanların birleşim noktasındaki 2B (boyut)'lu doz dağılımını inceleyerek yaprak pozisyonu doğruluğunun ve yaprak arası sızıntı değişiminin değerlendirilmesi amaçlanmaktadır.[16] Cihazdaki MLC tasarımı, yalnızca küçük tasarım değişiklikleriyle geleneksel Elekta lineer hızlandırıcılarından uyarlanmıştır.[20]

### Yöntem ve Ekipmanlar

MLC ve jaw kalibrasyonları, MLC ve diyafram konum bilgilerinin MV paneline yansıtılmasına dayanır.[18] MV görüntüleme paneline olan mesafe ve sınırlı boyutu nedeniyle, MV görüntüleyici kullanılarak yalnızca merkezi 30 yaprak çifti değerlendirilebilir. Bu sebeple büyük alanlar için bazı klinikler film dozimetre yapmaktadırlar.[20] MR-Linak masası boş olacak şekilde, linak ekranından MLC testleri ile ilgili alanlar yüklenir. Bu programda yaprak ve diyafram konumları, beş fark-



**Şekil 14.** MLC testleri.  
MLC: Çok yapraklı kolimatör.



**Şekil 15.** Manyetik rezonans cihazı eşmerkez-Linak eşmerkez (MR-MV) Fantom ve işlem basamakları.

lı alan boyutunda mv panel referans pikseli kullanılarak analizi sağlanır (Şekil 14).[21]

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

MV panel ile yapılan testlerin haftalık olarak yapılması önerilmektedir. Aylık ve yıllık testler, daha büyük alana bakılabilmesi açısından film ve bakır levha kullanılarak yapılabilir. Film kullanıldığında analiz işlemi için film okuyucu kullanılması gerekmektedir. Film okuyucu yoksa haftalık testlerle kontrolün gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı olarak  $\pm 1\text{mm}$  önerilmektedir.[3]

### 2.6. MR-MV Eşmerkez Kontrolü

#### Amaç

Cihazın kurulma sürecinde, MR mekanik izomerkezi, linak gantri mekanik izomerkezinin 0,5mm içerisinde olacak şekilde MR, linak gantry'si içine yerleştirilir.[21]

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Bu test için; MR-MV fantomu kullanılır (Şekil 15). Fantom linak eşmerkezine yerleştirildikten sonra, MR sisteminden T1 ağırlıklı görüntü alınır. Görüntünün bitmesine yakın linaktan 10 farklı alanda MV panelle

görüntü alınır ve üretici firmanın dozimetre programına aktarılarak analiz yapılır.[17]

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin haftalık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı olarak, referans değerlerden sapmanın  $\pm 0.5\text{mm}$  içerisinde olması önerilmektedir.[17]

### 2.7. MV Görüntü Kalitesi Testi

#### Amaç

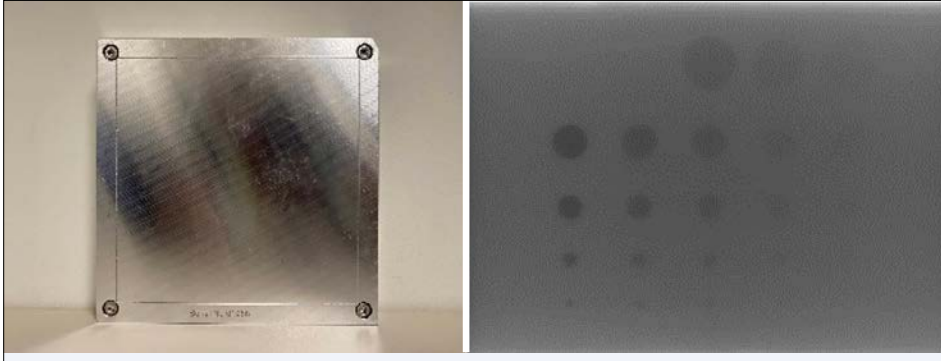
MV dedektörü, birçok kalite kontrol prosedürü, ölçüm ve/veya ekipman konumlandırma için kullanıldığından MR-linak'ın kritik bir bileşenidir.[18]

#### Yöntem ve Ekipmanlar

MV görüntüsünün kalite testi için Las Vegas görüntüleme fantomu kullanılır (Şekil 16). Fantom merkeze yerleştirilerek MV panelle görüntü alınır.

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin aylık olarak yapılması tavsiye edilir. Kabul testlerinde sırasında alınan sonuçlar referans alınır. Aylık olarak yapılan testin sonucu referans değer ile karşılaştırılmalı ve görünen daire sayısının referans değerinin altında olmamasına dikkat edilmelidir.



Şekil 16. Las Vegas fantom ve MV görüntüsü.



Şekil 17. Foton enerjisi doz verimi sabitliğinde kullanılacak ekipmanlar.

### 3. DOZİMETRİK TESTLER

#### 3.1. Foton Enerjisi Doz Verimi Sabitliği ve Monitör Birimi İzleme Sistemlerinin Kontrolü

##### Amaç

Uygulanan tedavi fraksiyonunda hastanın alacağı dozun, reçete edilen doz ile tutarlılığının kontrolü için yapılan dozimetrik ölçümdür.

##### Yöntem ve Ekipmanlar

Yıllık ve aylık testler için su fantomu (3B veya 1B) önerilir. Günlük testler için de su fantomu idealdir ancak, klinik pratikte kolaylık sağlayan ölçüm sistemleri (su eşdeğeri katı fantomlar, cihaz üstü sabit MV görüntüleyici, 2B sıralı dizi dedektör sistemleri) de kullanılabilir (Şekil 17).

Kalibrasyon derinliği, dozimetre izomerkezdeyken 5 cm'dir. Kalibrasyon sırasında cihaz, doz hızını 425 MU/dakika olarak ayarlamaktadır. Bu derinlikten uzaklaşmak, yanlış doz hızı sonuçlarına yol açabilir. Ölçüm sırasında, yazılım ekranındaki ikincil monitör birimi (MU2) değeri izlenmeli ve hedef değerle karşılaştırılmalıdır. Ayrıca, destek sayacındaki (back-up monitor) MU değeri ile yazılımda görülen birincil monitör birimi (MU1) değeri arasındaki eşleşme kontrol edilmelidir.

Su eşdeğeri katı fantomlar kullanıldığında, detektör giriş haznesi etrafındaki hava boşlukları ve fantom plakları arası olası hava boşlukları elektron dönüş etkisine (*electron return effect*, ERE) yol açar ve bu da ölçüm belirsizliğini artırır. Katı fantom kullanım durumunda detektör giriş haznesindeki hava boşluklarını su ile doldurmak ve ışın giriş aksı boyunca kullanılacak fantom plakları arasında hava boşluğu kalmayacak bir yerleşim sağlamak gereklidir. Benzer duruma 2B sıralı dizi detektör sistemlerinin kullanımında da dikkat etmek gerekmektedir.

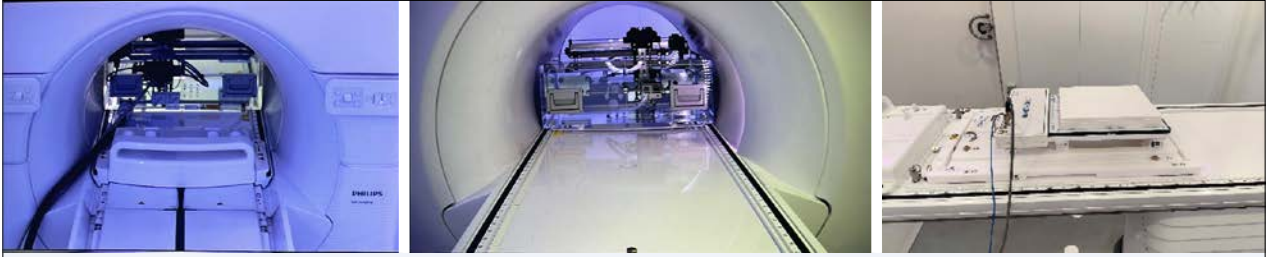
##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Foton enerjisi doz verimi sabitliği testi, günlük, aylık ve yıllık olarak yapılması önerilen dozimetrik testlerden biridir. Doz verimi için tolerans aralığı olarak  $\pm 2\%$  ve eylem düzeyi olarak  $\pm 3\%$  önerilmektedir.[17,22]

#### 3.2. Işın Profil Şeklinin Kontrolü

##### Amaç

Foton ışını profil sabitliği, enerjideki değişiklikler, servolardaki kayma nedeniyle oluşabilecek düzlük veya simetri değişikliklerini ölçmek için tasarlanmıştır. Bu değişiklikler, hastanın yetersiz veya fazla doz almasına yol açabilmektedir.[2] Işın profil şeklinin;



Şekil 18. Işın profil şekli ölçümü ekipmanları.

ışın kalitesi değişikliklerine,  $TPR_{20,10}$  veya PDD ölçümlerinden daha duyarlı olduğu bilinmektedir.

### Yöntem ve Ekipmanlar

Yöntem 1, Ölçüm 3B su fantomu kullanılarak yapılmaktadır. 1,5 T MR linak sisteminde 7 MV FFF X-ışını enerjisinde  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ve  $22 \times 22 \text{ cm}^2$  alanlarda 10 cm'de elde edilen profil düzgünlüğü ve simetrisi cihaz demet datası alınırken belirlenen temel değerler ile karşılaştırılır.[17] Yöntem 2, 2B dedektör dizini kullanarak ışın profillerini tespit etmektir. Dedektör QA platformla birlikte kullanılmaktadır. Güvenli tarafta kalmak adına cihazda su fantomu ölçümü yapıldıktan sonra hemen 2D dedektör dizinini kurup cihazın diğer günlerdeki takibi için temel oluşturmaktır (Şekil 18).

### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Haftalık ve aylık testlerde yanal profil analizleri yeterli iken, yıllık ölçümlerde PDD ölçümü alınarak  $d_{max}$  (PDD'nin %100 olduğu derinlik) ve  $D_{10cm}$  (10 cm derinlikteki) PDD değerleri de kontrol edilmesi önerilir. Yanal profil ölçümlerinde alan genişliğinin %80 en yüksek ve en düşük doz değerleri üzerinden profil simetrisi ve düzgünlüğü karşılaştırılır. Işın profil şekli için tolerans aralığı olarak  $\pm\%2$  önerilmektedir.[17]

### 3.3. Işın Kalitesi Kontrolü

#### Amaç

Cihazın enerji kalitesinin sabitliğini kontrol etmektir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

PDD ölçümleri için *gantry* pozisyonu  $0^\circ$  ve  $270^\circ$ 'de iyon odasının gidebileceği maksimum derinlik sırasıyla 12 cm ve 35 cm'dir. Bu nedenle ışın kalitesi ölçümü değerlendirmelerinde tarama derinliği ve *gantry* açısı değerleri değerlendirilmelidir.  $\%DD(10)x$  faktörünün manyetik alanın varlığına veya yokluğuna bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle, ışın kalitesini ölçmek için doku fantom oranı ( $TPR_{20,10}$ ) ölçümü tavsiye edilmektedir. Enerji kalitesini belirleyici yöntem; TRS-398 protokolünün önerileriyle ve manyetik alana duyarsızlığı nedeniyle  $TPR_{20,10}$  dur.

[23–25]  $TPR_{20,10}$  ölçümü için, su eşdeğeri katı fantom veya 1B su fantomu ve PDD ölçümlerinde 12cm derinliğe kadar 3D su fantomu kullanılabilir.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Enerji kalite testi, aylık ve yıllık olarak yapılması gereken dozimetrik testlerden biri olarak önerilmektedir.  $TPR_{20,10}$  değeri ile TPS değeri karşılaştırıldığında enerji kalitesi için tolerans aralığı  $\pm\%1$  olarak önerilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarla birlikte tolerans değeri  $\pm\%0.5$  olarak da kullanılmaktadır Bu tolerans değerleri klinikler tarafından değiştirilebilir.[23–25]

### 3.4. Output Faktör Kontrolü

#### Amaç

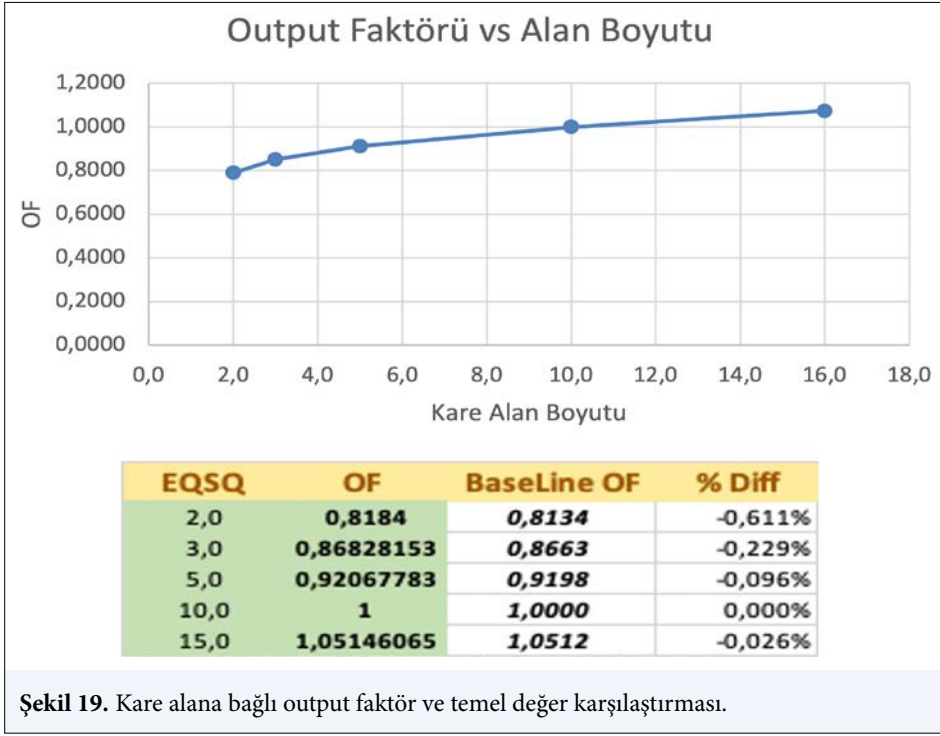
Farklı *gantry* açıları ve farklı alan boyutlarında output faktörünü tespit etmek için yapılan bir testtir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Output faktörü gantri açısı ve alan büyüklüğü bağımlılığı kontrol edilir. Ölçümler gantri açısı ve alan bağımlılığı için buildup kapağı takılı bir dedektör ile 1B veya 3B su fantomunda output faktörü ölçülür. Bu testte değerlendirilecek *gantry* açı değerleri;  $0^\circ$  ve  $270^\circ$ 'dir. Alan boyutları ise  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ,  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ,  $22 \times 22 \text{ cm}^2$ ,  $40 \times 22 \text{ cm}^2$  ve  $57 \times 22 \text{ cm}^2$ 'dir. Her biri kiryoostat karakterizasyonu ve TPS ışın modelinin output faktörü ile karşılaştırılmalıdır. Bir diğer output faktörleri AAPM task grup 74'ün tavsiyelerine uygun olarak ölçülmüştür. Toplam saçılma faktörü verileri ( $Scp$ ) 10cm derinlikte izomerkeze yerleştirilmiş bir microdiamond dedektör ile suda elde edilmiştir. Kolimatör saçılma faktörleri, sırasıyla büyük ve küçük alan boyutları için fantomlarda bir iyon odası ( $0,125 \text{ cm}^3$ ) kullanılarak ölçülmüştür. Tüm nihai output faktörleri  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  alan boyutuna göre normalize edilmiştir (Şekil 19).[26]

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilir. Output faktör için tolerans aralığı  $4 \times 4 \text{ cm}^2 < \pm\%2$ ,  $4 \times 4 \text{ cm}^2 \geq \pm\%1$  olarak önerilmektedir.[17]



### 3.5. TPS Baseline Karşılaştırma Kontrolü

#### Amaç

TPS verilerinin, aynı ekipman ve teknik ile tekrar kontrol edilmesi ve referans değer ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

3B su fantomu, en küçük hacme sahip dedektör ve iyon odası ekipmanları kullanılmaktadır. Ölçüm, TPS ve cihaz kabulünde kullanılan aynı ekipmanlarla ve aynı teknikle yapılmalıdır. Alınan ölçümler TPS verileri ile karşılaştırılır (Şekil 20).

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Alınan ölçümler ile TPS'den alınan output, PDD ve profil bilgileri yazılım aracılığıyla uygun gama parametreleri seçilerek karşılaştırılır ve tolerans aralığı  $\pm\%1$  olarak önerilmektedir.[17]

### 3.6. MU Lineeritesi Kontrolü

#### Amaç

1,5T MR-linak sisteminin yıllık olarak MU lineeritesini kontrol etmektir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Su eşdeğeri katı fantom veya 1B su fantomu kullanılabilir. Farklı MU ışınlamaları için okumalar yapılarak, referans değer olan 100 MU okumasına oranı hesaplanır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması önerilir. Tolerans aralığı  $<5\text{MU}$  için  $\%5$ ,  $\geq 5\text{MU}$  için  $\%2$  olarak önerilmektedir.[17]

### 3.7. Foton Enerjisi Doz Verimi Sabitliğinin Doz Hızıyla Değişimi

#### Amaç

7 MV FFF X-ışını enerjisinde, kullanım imkanı olan farklı doz hızları içerisinde doz veriminin sabitliğini tespit etmek için yapılan bir testtir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Bu testin su fantomu ile yapılması tavsiye edilmektedir. En az 2 farklı doz hızı belirlenmelidir. Tavsiye edilen, mümkün olan en yüksek doz hızı ve bunun yarı değerinin test edilmesidir. Bununla birlikte, kullanıcı kendi seçtiği 2 veya daha fazla farklı doz hızı değerleri için de testi tekrar edebilir. Her doz hızı için en az 2 okumanın ortalamasının alınması önerilmektedir.

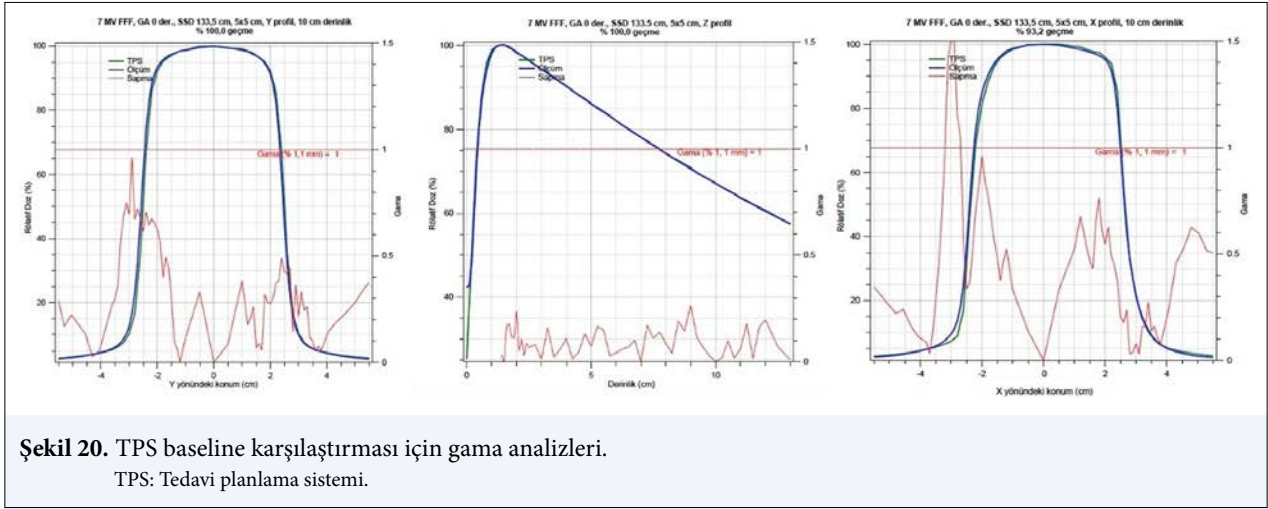
#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Doz verimi sabitliğinin doz hızı ile değişimi için tolerans aralığı  $\pm\%2$  olarak önerilmektedir.[17]

### 3.8. Foton Enerjisi Doz Verimi Sabitliğinin Gantri Açısı ile Değişimi

#### Amaç

Farklı gantri açıları için doz veriminin sabitliğini tespit etmek için yapılan bir testtir.



### Yöntem ve Ekipmanlar

Bu testin su fantomunda yapılması önerilir. Katı-su fantom seti kullanılması durumunda olası hava boşluklarının farklı gantri açılarında farklı *electron return effect* (ERE) katkısı getirebileceği düşünülerek, tolerans dışı durumlarda su fantomu ile yeniden ölçüm ve değerlendirme yapılması yerinde olacaktır.[17] Tavsiye edilen, testin  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  ve  $270^\circ$  açılarında tekrarlanmasıdır. *Gantry*  $180^\circ$ 'deki yüksek masa soğurması nedeniyle, bu açının kullanılması önerilmez. Her bir gantri açısı için belirlenen sabit bir doz hızı değerinde, en az 2 okumanın ortalamasının alınması tavsiye edilir.

### Tolerans aralığı ve Eylem Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı  $\pm 2\%$  olarak önerilmektedir.

### 3.9. Foton Enerjisi Off-Axis Faktörünün Gantri Açısı ile Değişimi

#### Amaç

Farklı gantri açıları içerisinde off-axiste gözlenen dozun merkezdeki doza oranını veren faktörün sabitliğini tespit etmek için yapılan bir testtir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Test için gafkromik film ve filmi pozisyonlamak için su eşdeğeri katı fantom ortamı veya 2B sıralı dizi detektör sistemleri ve cihaz üstü sabit MV görüntüleyici sistemleri kullanılabilir. Film kullanımı durumunda, filmin üzerine manyetik alan etkisi sebebiyle bakır levha konulmalıdır. Belirlenen alanın "açık MLC radyasyon alanı" testinde de kullanılacak alanla aynı olması özellikle film kullanımı durumunda tek seferde pozlama açısından avantaj sağlayacaktır. En az 3 farklı gantri açısı belirlenmelidir ( $0^\circ$ – $90^\circ$ – $270^\circ$ ). Her bir *gantry* açısında kullanılan film veya detektör sisteminin ışın geliş aksına dik yerleştirilmiş ol-

ması gerekmektedir. Işınlama sonrasında merkezden X ve Y (Jaw ve MLC) yönlerinde belirlenen sabit uzaklıklar için okumalar alınır ve karşılaştırma yapılır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı  $\pm 2\%$  olarak önerilmektedir.[17,22]

### 3.10. Açık MLC için Radyasyon Alanı Kontrolü

#### Amaç

Açık MLC ile belirlenen radyasyon alanlarının dozimetrik olarak doğruluğunu amaçlar.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

3.9 testinde kullanılan ekipmanlar kullanılabilir. Tavsiye edilen alan boyutları  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ve  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 'dir. Belirlenen alanın test 3.9'da kullanılan alanla aynı olması özellikle film kullanımı durumunda tek seferde pozlama açısından avantaj sağlayabilir.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Foton enerjisi açık MLC radyasyon alanı kontrolünün aylık ve yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Tolerans aralığı  $\pm 2 \text{ mm}$  olarak önerilmektedir.[17,22]

### 3.11. MLC Radyasyon Geçirgenliği Kontrolü (Sızıntı Testi)

#### Amaç

MLC kapalıyken radyasyon geçirgenliğini tespit etmek için yapılan bir testtir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

Test için su/katı fantom veya 2B sıralı dizi detektör sistemleri kullanılabilir. Açık MLC ve kapalı MLC'lerle okuma alınarak test gerçekleştirilir (Şekil 21). Ölçülen değerlerin yüzde oranı MLC radyasyon geçirgenliğini verir. Yüzde geçirgenlik değeri, tedavi planlama sistemindeki değer ile karşılaştırılır.



Şekil 21. Açık ve kapalı MLC alanlarının oluşturulması.

MLC: Çift odaklı çok yapraklı kolimatör



Şekil 22. 200mmlik kafa fantomu ve MRKoil.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Bu testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Planlama sistemindeki referansa göre bulunan farkın  $\pm\%0.5$  aralığında olması önerilmektedir.[6]

### 4. MR GÖRÜNTÜLEME TESTLERİ

#### 4.1. Periyodik Görüntü Kalitesi Testleri (PIQT)

##### Amaç

PIQT testlerinde beş önemli parameter test edilir: Sinyal-Gürültü oranı, Flood Field Uniformity, Uzaysal Doğrusallık, Uzaysal Çözünürlük, Kesit Profili ve Kalınlığı.

##### Yöntem ve Ekipmanlar

Bu test için 200mm'lik bir kafa fantomu kullanılır ve üzerine MR koili yerleştirilir (Şekil 22). Üretici firmanın programıyla MR görüntüsü alınır ve aynı programla analizi sağlanır.

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin haftalık olarak yapılması tavsiye edilmektedir. Sistem performans raporlarında testin geçip geçmediği kırmızı renkle belli edilir.[27]

#### 4.2. Sinyal – Gürültü, Enine ve Koronal Ölçekleme Testi

##### Amaç

Sinyal-gürültü belirleme oranı MR cihazlarında görüntü kalitesini belirleyen önemli bir faktördür. MR-Linak

cihazında MR üzerinden adaptif görüntüleme yapıldığı için bu testte MR kalitesi ve bu kaliteyi belirleyen parametrelerin kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

##### Yöntem ve Ekipmanlar

PIQT testlerinde yazılan durumların aynısı bu testler içinde geçerlidir. Şekil 14'deki fantom ya da radyolojik görüntüleme için kullanılan fantomlar kullanılabilir. Koronal ölçekleme testi için Şekil 22'deki fantom yatay konulur.

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin günlük olarak yapılması tavsiye edilmektedir. PIQT testlerinin yapıldığı günlerde, hemen hemen aynı testler olduğu için ayrıca bu testin yapılmasına gerek yoktur.[27]

#### 4.3. Geometrik Bozunma Testi

##### Amaç

Geometrik distorsiyon testi prosedürü, 1.5T tarayıcısı ile elde edilen MR görüntülerinin geometrik doğruluğunu değerlendirmek için tasarlanmıştır.

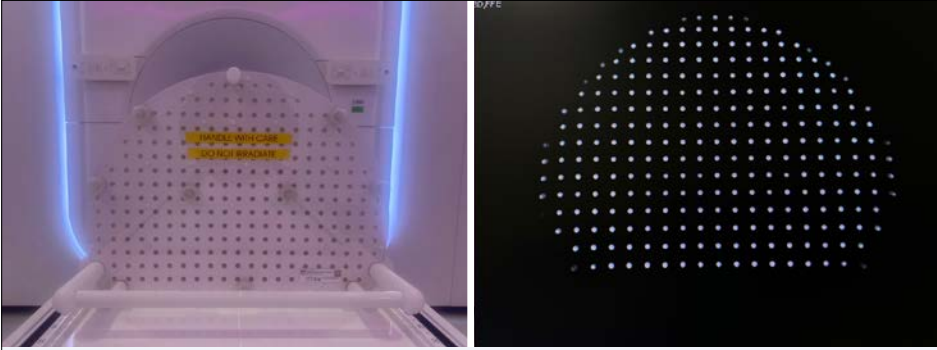
##### Yöntem ve Ekipmanlar

Şekil 23'deki fantom masaya yerleştirilir ve görüntüsü alınır.

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin haftalık olarak yapılması önerilmektedir. TG 284'de, eşmerkez etrafında sırasıyla 200 mm ve 400





Şekil 23. Geometrik bozunma fantomu.

mm çaplı küresel hacimler için toplam bozulmanın  $\leq 1$  mm ve  $\leq 2$  mm olması öneriliyor.[28] Bu sebeple 200mm çaplı küresel hacimler için eylem düzeyi 1mm, 400mm çaplı küresel hacimler için eylem düzeyi 3mm olarak belirlenirken, tolerans değeri 2mm olarak önerilir.[17]

#### 4.4. Helyum Kontrolü

##### Amaç

Helyum seviyesindeki azalma, cihaz demet ölçümlerini etkileyebileceğinden düzenli olarak kontrolü yapılmalıdır.

##### Yöntem ve Ekipmanlar

MR programından helyum seviyesine haftalık olarak bakılması önerilmektedir.

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Helyum seviyesi alt limiti %66 olarak önerilmektedir.

### 5. CMM (KAPSAMLI HAREKET YÖNETİMİ) TESTLERİ

#### 5.1. Hareket Yörüngesini Saptama Doğruluğu

##### Amaç

Bu test, hedefin gerçek hareketinin faz ve pozisyonunu saptamada hareket yönetimi sisteminin (CMM) Anatomik pozisyon izleme (APM) doğruluğunun kontrol edilmesi amacıyla yapılır.

##### Yöntem ve Ekipmanlar

MR 'da görünür hedef içeren ve MR uyumlu 4 boyutlu hareket fantomu ve Unity DPPC bilgisayarına yüklü fantom yazılımı kullanılır (Şekil 24).

Fantomun statik olarak alınan simülasyon görüntüsü üzerine, planlama sisteminde bir QA planı hazırlanır. Tedavi masasındaki fantom, sinüsoidal dalga formunda hareket ettirilir. CMM ile alınan "template" sonrası ofset değerleri 3 boyutta 0.5mm' nin altında

olmalıdır. APM başlatıldıktan sonra, 5 dakika boyunca fantom hareketi izlenir ve APM sonlandırılır. APM doğruluk testi, CMM'de kaydedilen fantom hareketi ile hareketli fantomun log dosyaları karşılaştırılarak gerçekleştirilir (Şekil 25).

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

X, Y ve Z eksenleri için pozisyonel hata toleransı konvansiyonel tedaviler için  $< 2$ mm, SRS-SBRT tedavileri için  $< 1$  mm olarak önerilmektedir. Testin aylık olarak yapılması tavsiye edilmektedir.[22]

#### 5.2. Sistem Gecikme Testi

##### Amaç

Bu testte, Hedefin gating penceresine girmesi ve çıkması ile ışının açılıp kapatılması arasındaki zamansal farkın tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

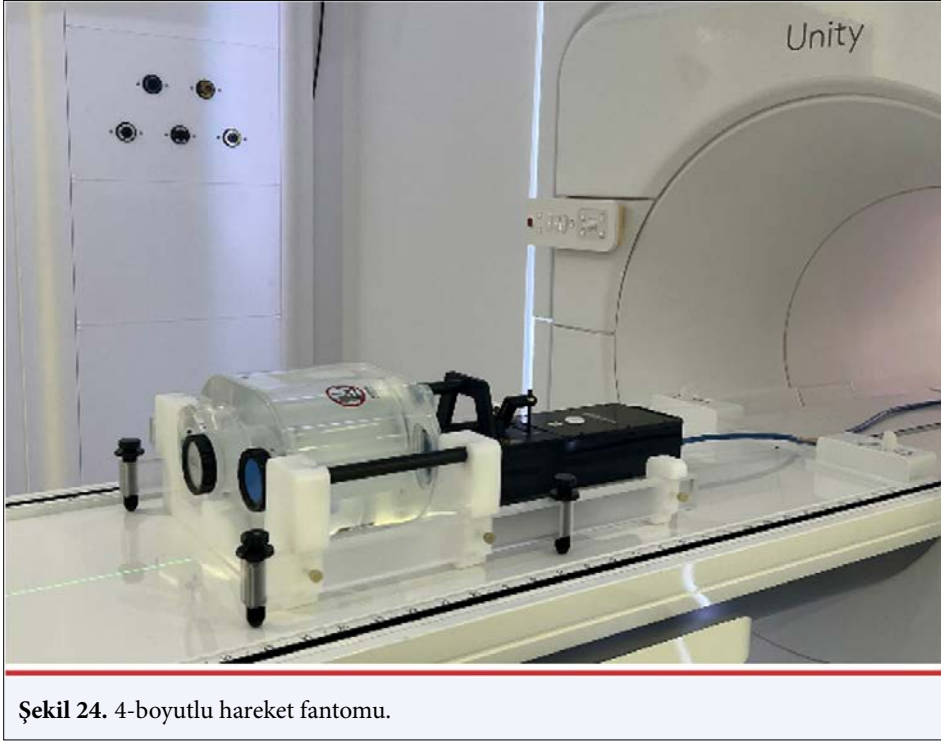
##### Yöntem ve Ekipmanlar

4D hareket fantomu ve bir BNC sinyal çıkış bağlantısı kullanılır. Bu sinyal bağlantısı cihazdaki BGC (Işın üretme kontrolörü) den sağlanmaktadır. Gecikme testi, fantom ve linakın tetikleme sinyaline erişimini gerektirir. BNC donanım çıkışıyla, elektron tabancası tetiklendiğinde sinyal 5 volt, radyasyon durdurulduğunda 0 volt durumundadır. Fantom, belirli bir hareket yolunu takip edecek şekilde programlanır ve gerçek konumu ile tetikleme sinyali eş zamanlı kaydedilir.

Fantomun kapama sınırını geçtiği an ile tetikleme sinyalinin verildiği an arasındaki süre gecikme olarak tanımlanır. Bu iki an karşılaştırılarak her solunum döngüsü için gecikme belirlenir. Bir dizi kapama açma/kapama döngüsü (örneğin  $> 20$  döngü) çalıştırılması sonrasında gecikme belirlenmelidir (Şekil 26).

##### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Gecikme değeri  $< 100$  milisaniye olması önerilmektedir. Testin aylık olarak yapılması önerilmektedir.[22]



Şekil 24. 4-boyutlu hareket fantomu.

### 5.3. Linak Doz Verimi Kontrolü

#### Amaç

Bu testte, *gating* koşulları altında linak doz verimi farklılığı kontrol edilir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

1 boyutlu su fantomu veya katı-su fantomu, iyon odası ve elektrometre kullanılır. Cihazının servis ekranında *gating* ışınlama modu ayarlanır. *Gating* modunda ışınlanan cihaza ait doz verimi okuma değerleri cihazın referans şartlardaki doz verimi okuma değerleriyle karşılaştırılır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin aylık olarak yapılması önerilmektedir. Doz verimi okuma değeri farklılığı için tolerans değer  $< \%2$  olarak önerilmektedir.[22]

### 5.4. Işın Enerji Kontrolü

#### Amaç

Bu testte, *gating* koşulları altında ışın enerjisi farklılığı kontrol edilir.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

1 boyutlu su fantomu veya katı-su fantomu, iyon odası ve elektrometre kullanılır. Cihazda,  $TPR_{20,10}$  ölçüm şartlarına uygun olarak tedavi masası üzerinde su/katı-su fantomu kurulur. *Gating* ile ölçüm sonrasında  $TPR_{20,10}$  hesaplanarak bu değer, cihaza ait referans  $TPR_{20,10}$  değeriyle karşılaştırılır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Testin yıllık olarak yapılması tavsiye edilir. *Gating* koşullarında ışın enerjisi farklılığının  $< \%2$  olması önerilmektedir.[22]

### 5.5. Işın Profili Simetri ve Düzgünlük Kontrolü

#### Amaç

Bu test ile, *gating* koşulları altında ışın profillerinin kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

#### Yöntem ve Ekipmanlar

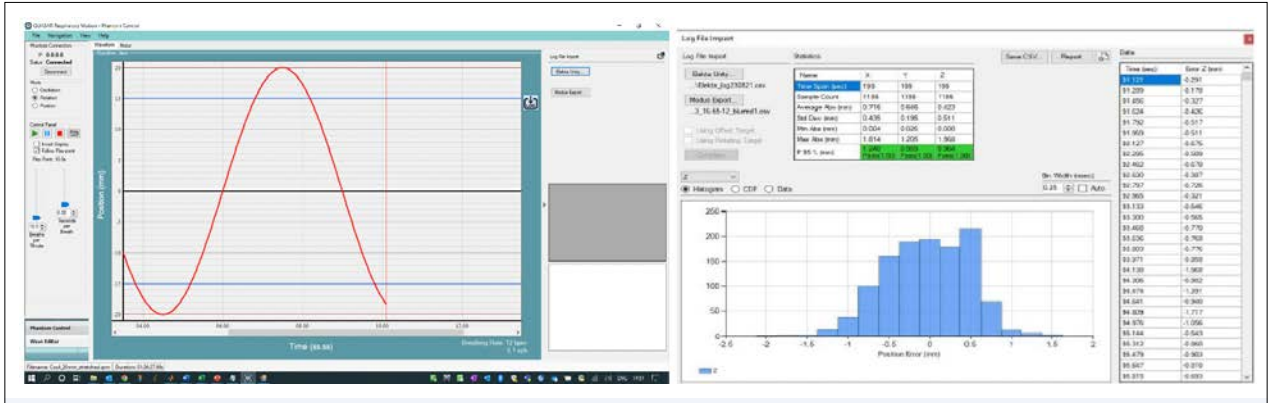
2B dizin dedektör veya Gafkromik film kullanılabilir. Dedektör kurulumu gerçekleştirilir ve *gating* modunda ışınlama yapılır. Elde edilen ışın profili *gating* yapılmadan alınan ışın profili ile karşılaştırılır.

#### Test Sıklığı ve Tolerans Düzeyi

Yıllık olarak yapılması tavsiye edilir. *Gating* koşullarında elde edilen profillere ait simetri ve düzgünlük değerleri ve *gating*siz koşullarındaki referans değerler arasındaki fark  $\pm \%1$  içerisinde bulunmalıdır.[22]

## 6. SONUÇ

Manyetik rezonans tabanlı lineer hızlandırıcı teknolojisi ve klinik uygulamaları son yıllardan beri yaygınlaşmış olup konvansiyonel ve hipo-fraksiyone tedavilerde başarı ile kullanılmaktadır. Bu tedaviler için uygulanacak kalite temini programının bu



**Şekil 25.** 4-Boyutlu hareket fantomu yazılımında elde edilen hareket döngüsüne ait faz-pozisyon grafiği ve 4-boyutlu hareket fantomunda APM doğruluk testi analizi.  
APM: Anatmik pozisyon izleme.



**Şekil 26.** Fantom tetikleme sinyali (kahverengi) ve BGC cihazından gelen elektron tabancası tetikleme sinyali (sarı) örnek gösterimi.  
BGC: Işın üretme kontrolürü.

cihazların dinamiklerine göre hazırlanmış olması gerekmektedir. MFD-GG005 raporunda Viewray MR-Linac ve Elekta Unity cihazlarına özgü mekanik, dozimetrik ve MR kalite temin testlerine ilişkin günlük, haftalık, aylık, yıllık yapılması gereken testler ve tolerans seviyeleri yazarların tecrübeleri ve uluslararası referanslara dayanarak önerilmiştir. Klinikler de bu rapordan faydalanıp aynı zamanda uluslararası referanslardan ve üretici firmanın tavsiyelerini de dikkate alarak kendi kalite kontrol programlarını oluşturmaları tavsiye olunur.

**Yazma Yardımı İçin Yapay Zeka Kullanımı:** Hiçbir yapay zeka teknolojisi kullanılmadı.

**Çıkar Çatışması:** Bildirilmemiştir.

**Finansal Destek:** Maddi destek alınmamıştır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

## KAYNAKLAR

- Whelan B, Liney GP, Oborn B, Keall P. MRI linac systems. In Liney GP, van der Heide U, eds. MRI for Radiotherapy. Springer; 2019. p. 155–68.

2. Dempsey JF, Benoit D, Fitzsimmons JR, Haghghat A, Li JG, Low D, et al. A device for realtime 3D image-guided IMRT. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2005;63(2):S202.
3. Klüter S. Technical design and concept of a 0.35 T MR-Linac. *Clin Transl Radiat Oncol* 2019;18:98–101.
4. McRobbie DW, Moore EA, Graves MJ, Prince MR. *MRI from Picture to Proton*. Cambridge University Press.
5. American College of Radiology. Phantom test guidance for the ACR MRI accreditation program. Available at: <https://www.acraccreditation.org/-/media/acraccreditation/documents/mri/largephantomguidance.pdf>. Accessed Jan 28, 2025.
6. Jackson EF, Bronskill MJ, Drost DJ, Och J, Pooley RA, Sobol WT. Acceptance testing and quality assurance procedures for magnetic resonance imaging facilities. Report of MR Subcommittee Task Group I. AAPM report no. 100.
7. Kanal E, Barkovich AJ, Bell C, Borgstede JP, Bradley WG, Froelich JW, et al. ACR guidance document for safe MR practices. *AJR Am J Roentgenol* 2007;188(6):1447–74.
8. Mittauer KE, Dunkerley DAP, Yadav P, Bayouth JE. Characterization and longitudinal assessment of daily quality assurance for an MR-guided radiotherapy (MRgRT) linac. *Med Phys* 2019;20(11):27–36.
9. Das IJ, Cheng CW, Watts RJ, Ahnesjö A, Gibbons J, Li XA, et al. Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *Med Phys* 2008;35(9):3825–81.
10. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin FF, Simon W, Dresser S, et al. Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators. *Med Phys* 2009;36(9 Pt 1):4197–212.
11. Hao Y, Cai B, Green O, Knutson N, Yaddanapudi S, Zhao T, et al. Technical note: An alternative approach to verify 6FFF beam dosimetry for Ethos and MR Linac without using a 3D water tank. *Med Phys* 2021;48(4):1533–53.
12. Riis HL, Christiansen RL, Tilly N, Tilly D. Dosimetric validation of the couch and coil model for high-field MR-linac treatment planning. *Z Med Phys* 2023;33(4):567–77.
13. Lang ST, Budgell G, Gungor G. An ESTRO-ACROP guideline on quality assurance and medical physics commissioning of online MRI-guided radiotherapy systems based on a consensus expert opinion. *Radiother Oncol*. 2023;181:109504.
14. Glide-Hurst CK, Paulson ES, McGee K, Tyagi N, Hu Y, Balter J, et al. Task Group 284 report: Magnetic resonance imaging simulation in radiotherapy: Considerations for clinical implementation, optimization, and quality assurance. *Med Phys* 2021;48(7):e636–e670.
15. Keall PJ, Carri K, Cao M, Lee P, Murray B, Raaymakers BW, et al. ICRU Report 97, MRI-guided radiation therapy using MRI-linear accelerators. *J ICRU* 2022;22(1):1–100.
16. Hanley J, Dresser S, Simon W, Flynn R, Klein EE, Letourneau D, et al. AAPM Task Group 198 report: An implementation guide for TG 142 quality assurance of medical accelerators. *Med Phys* 2021;48:e830–85.
17. Roberts DA, Sandin C, Vesanen PT, Lee H, Hanson IM, Nill S, et al. Machine QA for the Elekta Unity system: A report from the Elekta MR-linac consortium. *Med Phys* 2021;48(5):e67–e85.
18. Riss Lynggaard H, Chick J, Dunlop A, Tilly D. The quality assurance of a 1.5 T MR-Linac. *Radiat Oncol* 2023;34:120–8.
19. Snyder JE, St-Aubin J, Yaddanapudi S, Boczkowski A, Dunkerley DAP, Graves SA, et al. Analysis of patient-specific quality assurance for Elekta Unity adaptive plans using statistical process control methodology. *Med Phys* 2021;22(4):99–107.
20. Snyder JE, St-Aubin J, Yaddanapudi S, Boczkowski A, Dunkerley DAP, Graves SA, et al. Commissioning of a 1.5 T Elekta Unity MR-linac: A single institution experience. *Appl Clin Med Phys* 2020;21(7):160–72.
21. Tsunada M, Abe K, Fujita Y, Ikeda Y, Furuyama Y, Uno T. Elekta Unity MR-linac commissioning: Mechanical and dosimetry tests. *J Radiat Res* 2023;64(1):73–84.
22. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, Yin FF, Simon W, Dresser S, et al. AAPM Task Group 142 report: QA of medical accelerators. *Med Phys* 2009;36:4197–212.
23. Woodings SJ, Bluemink JJ, de Vries JHW, Niatetski Y, van Veelen B, Schillings J, et al. Beam characterisation of the 1.5 T MRI-linac. *Phys Med Biol* 2018;63:085015.
24. Van Asselen B, Woodings S, Hackett S, van Soest T, Kok J, Raaymakers B, et al. A formalism for reference dosimetry in photon beams in the presence of a magnetic field. *Phys Med Biol* 2018;63:125008.
25. O'Brien D, Roberts D, Ibbott G, Sawakuchi G. Reference dosimetry in magnetic fields: Formalism and ionization chamber correction factors. *Med Phys* 2016;43(8):4915–27.
26. Graves SA, Snyder JE, Boczkowski A, St-Aubin J, Wang D, Yaddanapudi S, et al. Commissioning and performance evaluation of RadCalc for the Elekta Unity MRI-linac. *J Appl Clin Med Phys* 2019;20(12):54–62.
27. Tijssen R, Philippens M, Paulson E, Gltzner M, Chugh B, Wetscherek A, et al. MRI Commissioning of 1.5T MR-Linac systems a multi institutional study. *Radiotherap Oncol* 2019;132:114–20.
28. Damyanovich AZ, Tadic T, Foltz WD, Jelveh S, Bissonnette JP. Time-course assessment of 3D-image distortion on the 1.5 T Marlin/Elekta Unity MR-Linac. *Physica Medica* 2022;100:90–98.