



Lineer Hızlandırıcı Cihazları İçin Kalite Kontrol ve Kalite Güvencesi Raporu

Guide for Quality Control and Quality Assurance Tests in Medical Linear

Cemile CEYLAN,^{1,2} Zeynep ÖZEN,³ Emine Burçin İSPIR AYDINLIOĞLU,⁴ Canan KÖKSAL AKBAŞ,⁵
 Gökhan AYDIN,⁶ Emel HACİİSLAMOĞLU,⁷ Hüseyin KIVANÇ,⁸ Yücel SAĞLAM,⁹
 Öznur TAŞLIYURT,¹⁰ Emin TAVLAYAN¹¹

¹İstanbul Onkoloji Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

²Yeditepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Fiziği Programı, İstanbul-Türkiye

³Acıbadem Altunizade Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

⁴Acıbadem Ataşehir Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

⁵İstanbul Üniversitesi Onkoloji Enstitüsü, Medikal Fizik Bölümü, İstanbul-Türkiye

⁶Acıbadem Maslak Hastanesi, Radyasyon Onkolojisi Kliniği, İstanbul-Türkiye

⁷Karadeniz Teknik Üniversitesi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı, Trabzon-Türkiye

⁸Hacettepe Üniversitesi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı, Ankara-Türkiye

⁹Vehbi Koç Vakfı Sağlık Kuruluşları, Koç Üniversitesi, Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalı, İstanbul-Türkiye

¹⁰İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sağlık Fiziği Anabilim Dalı, İstanbul-Türkiye

¹¹Kopenhag Üniversitesi Hastanesi-Rigshospitalet, Radyasyon Onkolojisi Medikal Fizik, Kopenhag-Danimarka

ÖZET

Türk Medikal Fizik Derneği (TMFD) tarafından, radyoterapi tedavi uygulama ve planlama ekipmanlarında kalite kontrol ve güvencesi programı oluşturmak ve standardizasyonu sağlamak amacıyla farklı görev grupları oluşturulmuştur. MFD-GG007 görev grubu tarafından da Lineer Hızlandırıcı Kalite Kontrol ve Güvencesi raporu hazırlanmıştır. Yayınlanan bu kılavuz ile esas raporun test içerikleri ve uygulama metodları özetlenmiştir. MFD-GG007 raporunun amacı, Lineer Hızlandırıcılarda (Linak) kalite kontrol testlerinin firma içi ve uluslararası standartlara göre standardize edilmesini sağlamak ve radyasyon onkolojisi kliniklerinde Sorumlu Medikal Fizik uzmanlarının güvenli ve etkili bir kalite güvence programı oluşturmasına rehberlik yapmaktır. Linak kalite güvencesi kapsamında önerilen testlerin, klinik şartlarda kullanılan Linak model ve markası için uygun, klinik uygulamalara göre yeterli ve olası hataları tespit edebilecek kadar etkin olduğuna medikal fizik uzmanınca karar verilmelidir. Test önerileri ve değerlendirmelerin bazılarında Linak ve Tedavi Planlama Sistemi (TPS) kabul testleri referans alındığından, referans standartların doğruluğu SMF uzmanının sorumluluğunda olup, bu kılavuz kapsamı dışında tutulmuştur. Önerilen test sıklıkları ve tolerans değerleri uluslararası referanslar, firma önerileri ve MFD-GG007 grubu üyelerinin klinik deneyimleri ile oluşturulmuştur. Ancak bu değerlerin ve sıklıkların değişiminin, yeterliliğinin ve seçiminin, SMF tarafından, cihaz ve uygulanan tedavi tekniğine göre belirlenmesi gerekir. Bu kılavuzda, Linak kalite güvencesi için önerilen testler, uygulama sınıflandırması (mekanik, dozimetrik vb.) altında listelenmiş; referans standartlar belirlenmiş ve Linak mekanik, geometrik doğruluğunun sağlanması ve korunması için öneriler tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Linak; MFD-GG007; radyoterapi kalite güvencesi.



SUMMARY

The Turkish Medical Physics Society (TMPA) has established multiple task groups to create a quality control and assurance program for radiotherapy treatment applications and planning equipment with the objective of ensuring standardization in radiation oncology departments. This guideline summarizes the recommended test content and application methods discussed in the main report. The MFD-GG007 report aims to help responsible medical physicists in radiation oncology clinics create and implement a safe and effective quality assurance program by standardizing the application of the critical quality control test list and methods recommended in the company's and international standards for linear accelerators (Linac). A medical physicist needs to decide whether the proposed tests for Linac quality assurance are suitable for the specific model and manufacturer used in clinical settings, adequate for clinical applications, and sufficiently effective to identify potential errors. It is the responsibility of a medical physicist to ascertain whether the tests proposed by Linac's quality assurance in this guideline are suitable, adequate for clinical applications, and effective enough to identify potential errors in the Linac model and manufacture during clinical use. The responsible medical physicist must determine the variation, adequacy, and selection of tolerance level and frequencies based on the Linac and the applied treatment techniques. This guideline lists the tests recommended for Linac quality assurance in terms of application classification (such as mechanical and dosimetric), discusses reference standards for monthly and annual measurements, ensures Linac's mechanical and geometric accuracy, and maintains its consistency.

Keywords: Linac; MFD-GG00; radiotherapy quality assurance.

Copyright © 2024, Turkish Society for Radiation Oncology

1. GİRİŞ

Radyasyon onkolojisi bölümlerinde eksternal radyoterapi uygulamalarının çoğu konvansiyonel Lineer Hızlandırıcı (Linak) cihazları ile yapılır. Bu nedenle radyoterapinin hastaya doğru ve güvenli uygulanması için Linak cihazlarının kalite kontrolü rutin olarak test edilmeli ve güncel performansının cihaz kabul testleri sırasında doğruluğundan sapmadığı kontrol edilmelidir. Daha da önemlisi, Tedavi Planlama Sistemi (TPS) demet modellemesi için alınan ölçümlerin, güncel Linak performansında hala geçerli olduğunun doğrulanması gerekir. Linak cihazlarında kalite güvencesi programı sadece dozimetrik kontrol testlerini değil, doğru ve tekrarlanabilir geometri için optik, mekanik ve görüntüleme sistemleri için hazırlanmış ayrıntılı testleri de içermelidir.[1]

Türk Medikal Fizik Derneği görev gruplarından biri olan MFD-GG007 grubu, radyasyon onkolojisi kliniklerinde güncel radyoterapi uygulamalarında kullanılan Linak cihazlarında kalite kontrol ve kalite güvence süreçlerinde optimizasyonun sağlanması ve ulusal bir standardın oluşturulması hedefiyle kurulmuştur. Görev grubunun hazırladığı MFD-GG007 Raporu, yeni başlayacak kliniklere ve medikal fizik uzmanlarına rehber olmasını, kendi kalite kontrol prosedürlerini hazırlama ve uygulama noktasında referans olarak alınmasını hedeflemiştir. Rapor

konvansiyonel C-kollu Linak ve 'Ring-based Gantry' olarak sınıflandırılan O-kollu Varian Halcyon™ cihazları ve bileşenleri kapsamı içine alınırken, uygulanacak testlerin nasıl ve neden yapılacağı, tolerans ve sıklık önerileri, test içerikleri de eklenerek klinik uygulamalara katkıda bulunulması amaçlanmıştır. Kapsamlı Linak kalite güvencesi programı için sadece doğru ve stabil dozimetri değil, doğru ve tekrarlanabilir geometrik doğruluğun da sağlanması gerekir. Bu nedenle her ne kadar klinik rutinde zaman sıkıntısı yaşansa da görüntüleme bileşenlerinin mekanik ve görüntü kalite uygunluk testleri de programa eklenmelidir. Bu raporda Linak görüntüleme bileşenlerine ait testler, sadece geometrik doğruluk için Linak mekanik izomerkezi ile uyumu kontrol edecek testleri kısmen kapsamaktadır. Bu nedenle raporda önerilen testlerin yanında, Linak cihazlarında Görüntü Kılavuzlu Radyoterapi (Image Guided Radiation Therapy, IGRT) uygulamaları kalite kontrol süreci için MFDGG-006 görev grubu tarafından hazırlanan rapor ve uluslararası IGRT kalite kontrol raporlarında dikkate alınmalıdır.[2–5] MFD-GG007 raporunda bazı mekanik ve dozimetrik testlerin uygulanmasında ve değerlendirilmesinde Elektronik Portal Görüntüleme Dozimetri (Electronic Portal Imaging Detector (EPID) sistemi önerilmiştir. EPID kalite güvencesi bu raporun kapsamı dışındadır ve önerilen testlerde kullanılması durumunda kalite kontrol testlerinin yapıldığı kabul edilmiştir.

MFD-GG007 raporu esas alınarak hazırlanan bu özet rapor, Linak cihazları için (SMF) uzmanı tarafından hazırlanacak ve uygulanacak olan ayrıntılı, güncel tedavi teknikleri ve klinik gereksinimleri kapsayan etkin, güvenli bir kalite güvencesi programına yardımcı olmak ve ulusal standartı oluşturmak amacıyla lineer hızlandırıcılar için Türk Medikal Fizik Derneği çatısında yayınlanacak olan esas raporun hedeflerini özetlemektedir.

2. ÖNERİLER

Linak kalite güvencesi için hazırlanan bu raporda önerilen testler ve sıklıklar, alınacak aksiyon düzeyleri uluslararası referanslar dikkate alınarak hazırlansa da uygulayıcı SMF bu testleri kendi klinik şartlarına, uygulanan tedavi tekniklere, uygulayacak personele ve ekipmanına göre değerlendirmelidir. Bu nedenle Linak kalite güvencesi programının varlığının yanında, doğru uygulanıp tolerans dışı durumlarda ya da izlemlerde uygun müdahale, analiz etme ve raporlanıp istatistiksel değerlendirme ile risk analizi süreçleri de Linak kalite güvencesi programını güçlendirecektir.[6]

2.1. Birincil Referans Standart

Kalite kontrol ve güvencesi testleri Linak cihazının firma spesifikasyonlarından ve hem Linak hem de TPS kabul testlerinden sapmanın kontrolü olduğundan, Linak güvence programının güvenilirliği kabul testlerinin doğruluğuna bağlıdır. TPS kabul ve demet modelleme ölçümleri, Linak kabul testleri sonrasında ve SMF tarafından, firma ve uluslararası raporların önerilerine göre uygun fantom ve iyon odaları, düzenek ve yöntemle yapılmalıdır.[7-9] Linak kabul testleri sırasında yapılan testlerin sonuçları ve TPS hazırlık ölçümleri, oluşturulacak kalite güvencesi programı için referans veri yani '*Birincil Referans Standart*' olarak kabul edilir.[10] Çoğunlukla su fantomu ile alınan bu veriler, cihazın kalite kontrol temini programının temelini oluşturur.

2.2. İkincil Referans Standart

Günlük ve aylık dozimetrik ya da mekanik kalite güvencesi testlerinde önerilen 2 boyutlu/düzlemsel dozimetri sistemleri kullanılacaksa, TPS kabul testleri, aylık kalibrasyon testleri ve bakım sonrasında bu dozimetrik sistemlerin referans veri olarak kullanılması için önerilen testlere ait "İkincil Referans Standart" verileri dedektör yazılımına kaydedilmelidir. İkincil Referans Standart verileri günlük ve/veya aylık testlerin ölçüm düzeneği ile aynı olmalıdır.[11]

2.3. Mekanik İzomerkez

Linak cihazının üç bağımsız ekseninin ve Linak bileşenlerinin eksenlerinin kesişme noktası cihazın mekanik izomerkezinin yerleşimidir. Mekanik izomerkezin boyutunun ve pozisyonunun belirlenmesi Linak kalite temininin programının da temelini oluşturur. Cihazın MLC, kolimatör gibi bileşenlerine ait fiziksel parametrelerinin ve bu merkezin uzaysal konumunun hiç değişmediği kabul edilir. Bu nedenle Linak kabul testlerinde belirlenen izomerkezin konumu, Linak kalite kontrol programında mekanik testlerle belirli periyotlarda doğrulanmalıdır.

2.4. Yöntem, Dozimetrik Ekipman ve Ölçüm Düzeneği

Önerilen testlerin uygulama yöntemi tek bir yöntemde ve tek bir ölçüm sistemi ile olmayabilir. Bu nedenle rapor içinde önerilen test ve değerlendirme yöntemi, gerekli durumda başka bir yöntem ve ekipman ile tekrarlanmalıdır. Kullanılacak dozimetri sistemlerinin, fantomların, termometrelerin, barometrelerin ve mekanik ekipmanların da doğru ölçümü yapabilmesi için uygun kalibrasyonların ve bakımlarının yapılması gerekmektedir.

2.5. Dozimetrik Doğruluk

MFD-GG007 raporu içinde önerilen dozimetrik testlerde, IAEA Technical Reports Series No. 398 raporu 'Referans Dozimetri' olarak kullanılmıştır.[12] Bu nedenle eğer klinikte TRS 398 dozimetri protokolü referans olacak ise suda soğurulmuş (absorbe) doza dayalı uluslararası uygulama kuralları kullanılarak kalibre edilmiş dozimetre sistemi ile ölçümler yapılmalıdır. Günlük dozimetrik ölçümlerde kullanılacak düzlemsel (2 Boyutlu) dozimetri sistemlerinde İkincil Referans Standart olarak, *temel veri 'baseline'* kabul edilecek ölçümler ve tolerans değerler ölçüm sistemi yazılımına doğru kaydedilmelidir.

2.6. Testlerin Sıklığı

MFD-007 raporunda önerilen test sıklıkları, AAPM TG198 raporunda önerilen sıklıklar, görev grubu üyelerinin deneyimleri, klinik yoğunluk ve uygulanan tedavi tekniklerine olası etkiler dikkate alınarak önerilmiştir. Test sıklıkları yıllık (Y), aylık (A) veya günlük (G) şeklindedir. Test sıklığı test başlığı yanında belirtilmiştir.

2.7. Tolerans Aralığı ve Eyleme Geçme Seviyesi

Raporda her bir teste ait tolerans değerleri ayrı ayrı belirtilmiş, test sonuçlarının bu değer aralıkları dışında olması durumunda 'Eyleme Geçme Seviyeleri' tariflenmiştir. Raporda bazı test sonuçları tolerans dışı olduğunda eyleme geçme seviyesi SMF'ye bırakılmıştır.

Tablo 1 Güvenlik kontrolleri

Test kodu	Ölçüm sıklığı	Test tanımı	Tolerans
G1E	Günlük	Güvenlik Kontrolleri	Fonksiyonellik
A1E	Aylık	Lazerguard/Touchguard/Bore Çarpışma sistemi (Halcyon)	Fonksiyonellik
A2E	Aylık	Solunum takibi kilitleme sistemi	Fonksiyonellik
Y1E	Yıllık	Üretici tarafından yapılması önerilen testler	Fonksiyonellik

2.7.1. Eyleme Geçme Seviyesi 1

Denetim eylem seviyesi olarak adlandırılır. Tolerans düzeyleri klinik tedavi için “kabul edilebilir” olarak belirlenir. Hatanın tekrarlanan ölçümlerle kontrol edilmesi, sürekliliğinin denetlenmesi önerilir. Raporda EGS-1 olarak kısaltılmıştır.

2.7.2. Eyleme Geçme Seviyesi 2

Planlanmış eylem seviyesi olarak adlandırılır. Eyleme Geçme Seviyesi 1’de takip edilip, SMF tarafından yapılan tekrarlanan test sonuçlarında da tolerans dışı değer ya da toleransı geçme eğilimi gözlenirse, tedavi devam kararı SMF tarafından verilir ve en kısa zamanda hata içeren testin hata sebebinin düzeltilmesi için eyleme geçilmelidir. Raporda EGS-2 olarak kısaltılmıştır.

2.7.3. Eyleme Geçme Seviyesi 3

Tedavi durdurma eylem seviyesi olarak adlandırılır. Tolerans dışı test sonucu olmasında tedavinin doğruluğunu etkileyecek durum oluşacağından SMF tarafından tedavi durdurulma ve hemen müdahale kararı verilmelidir. Raporda EGS-3 olarak kısaltılmıştır.

3. Linak Kalite Kontrol Testleri

Tablolarda, MFD-GG007 raporunda Linak cihazları için önerilen testlerin özeti, testlerle ilgili öneriler, test sıklıkları ve tolerans aralıkları özetlenmiştir. Testlerin tamamı, testlere ait ölçüm yöntem ve düzenekleri esas raporda bulunabilir. Linak cihazları kalite kontrol ve güvencesi testleri hazırlanırken, The American Association of Physicists in Medicine (AAPM),[10-13] The Canadian Organization of Medical Physicists (COMP),[4,14,15] ve Netherlands Commission on Radiation Dosimetry (NCS)[16,17] gibi uluslararası otoriteler tarafından hazırlanan raporların yanında MFD-GG007 görev grubu üyelerinin klinik deneyimleri de temel alınmıştır.

3.1. Güvenlik Kontrolü Testleri (G1E)

Güvenlik testlerinin amacı, tedavinin doğruluğuna ek olarak hastaların ve radyasyon görevlilerinin güvenliğini sağlayan, cihaza entegre veya harici çalışan sistemlerin uygunluğunun kontrol edilmesidir. Yapılması önerilen testler Tablo 1’de özetlenmiştir. Testlerin uy-

gulanmasında ve değerlendirilmesinde aksesuar veya ilgili özelliğin “fonksiyonel” olup olmadığına dikkat edilir. Linak cihazlarında günlük güvenlik testlerinde tedavi kapısı, ganrtı, kolimatör ve tedavi masası gibi hareketli bileşenlerin ve bunlara ait fren, çarpışma uyarı sistemlerinin fonksiyonelliği kontrol edilir. Hasta güvenliği adına günlük olarak tekrarlanması ve fonksiyonel olmaması durumunda hasta ve çalışan güvenliği riskine göre EGS-3 uygulanması önerilir.

3.2. Mekanik Testler

Mekanik bileşenlerinin geometrik doğruluğu ve cihaz kurulum sürecinde referans olarak kabul edilen lokalizasyondan sapmayı tespit etmek amacıyla günlük, aylık ve yıllık testlerin yapılması gerekmektedir.

- **Lazer Kontrolü (G1M/A1M):** Test klinik hasta pozisyonlamasında IGRT yöntemleri ve kullanım sıklığı göz önüne alınarak günlük ve aylık olarak tekrarlanmalıdır. Amaç tüm lazerlerin izomerkezi doğru şekilde gösterdiğini ve karşıt lazerlerin uyumlu olduğunu kontrol etmektir. Tablo 2’de tolerans değerler tedavi uygulamasına göre verilse de tolerans dışı durumlarda, cihaz IGRT yöntem ve kullanım sıklığına göre EGS SMF tarafından belirlenmelidir.
- **Optik Mesafe Göstergesi (G2M):** Testin amacı referans olarak kabul edilen bir uzaklığın ya da çoğunlukla Linak izomerkezi uzaklığının ODI göstergesindeki doğruluğu kontrol etmektir. Test günlük gantry açısı 0° pozisyonunda, aylık farklı ganrtı açısı ve farklı Cilt-Kaynak Uzaklık (Source Skin Distance, SSD) değerlerinde tekrarlanmalıdır. A3M testi sırasında kontrol gerçekleştirilebilir. Tolerans dışı durumlarda IGRT kullanım sıklığına göre EGS belirlenmelidir. Ancak kalite kontrol ölçümleri sırasında fantom pozisyonlamasında SSD kullanılıyorsa oluşacak hata gözardı edilmemelidir.
- **IGRT Bileşenleri (G3M/G4M):** IGRT bileşenlerinin ayrıntılı kalite kontrol ve güvencesi testleri bu rapor kapsamı dışındadır. Ancak günlük hasta pozisyonlamasında kullanıldığından görüntü bileşenleri izomerkezi ile cihaz mekanik izomerkez uyumu ve pozisyonlama doğruluğunun günlük kontrol edilmesi önerilmektedir. Her iki merkez de

Tablo 2 Mekanik testler

Test kodu	Ölçüm sıklığı	Test tanımı	3D-konformal	IMRT/VMAT	SRS/SBRT
G1M	Günlük	Lazer Lokalizasyonu	±2 mm	±1.5mm	±1 mm
G2M	Günlük	Optik Mesafe Göstergesi Kontrolü (Optical Distance Indicator-ODI)	±2 mm		
G3M	Günlük	Görüntü bileşenleri ile fantom pozisyonlandırma ve yeniden konumlama doğruluğu	<2 mm >2 mm EGS*-2	<2 mm >2 mm EGS-3	<1 mm >1 mm EGS-3
G4M	Günlük	Görüntü bileşenleri merkezi ve izomerkez uyumu	<2 mm >2 mm EGS-2	<2 mm >2 mm EGS-3	<1 mm >1 mm EGS-3
G5M	Günlük	Kolimatör boyutu göstergesi kontrolü	±2 mm	±2 mm	±1 mm
A1M	Aylık	Lazer kontrolü	±2 mm	±1 mm	<1 mm
A2M	Aylık	Gantry-kolimatör açısı göstergesi kontrolü	±0.5°		
A3M	Aylık (SRS/SBRT)	Winston-lutz testi ile radyasyon ve mekanik izomerkez uyumu	Uygulanması SMF tarafından belirlenmelidir.	<2 mm >2 mm EGS-2	<1 mm >1 mm EGS-3
A4M	Aylık	Gantry aksesuar sistemi		Fonksiyonel	
A5M	Aylık	Işık-ışın alanı uyumu (simetrik ve asimetric)	±2 mm <3 mm EGS-2 ve >3 mm EGS-3		
A6M	Aylık	Simetrik/asimetric jaw pozisyon göstergesi kontrolü	±0.5 mm <1mm EGS-2 ve >1 mm EGS-3		
A7M	Aylık	Çapraz tel kontrolü	≤1mm		
A8M	Aylık	Tedavi masası göstergesi kontrolü	±2 mm /±10	±2 mm /±10	±1 mm/±0.50
Y1M	Yıllık	Gantry dönüşü ile mekanik izomerkez uyumu	±1 mm	±1 mm	±1mm >1 mm EGS-3
Y2M	Yıllık	Radyasyon ve mekanik izomerkez uyumu (WL)	<2 mm >2 mm EGS-2	<2 mm >2 mm EGS-3	<1 mm >1 mm EGS-3
Y3M	Yıllık	Işık-ışın alanı uyumu (simetrik ve asimetric)	±2 mm <3 mm EGS-2 ve >3 mm EGS-3		
Y4M	Yıllık	Kolimatör dönüşü ile izomerkezin uyumu	±1 mm		
Y5M	Yıllık	Tedavi masası dönüşü ile izomerkez uyumu	Çember merkezi ile işaretlenen izomerkez farkı; ±1mm Çember çapı; <2 mm		
Y6M	Yıllık	Tedavi masası esnekliği kontrolü	±2 mm		
Y7M	Yıllık	Tedavi masasının maksimum aralığı kontrolü	±2 mm		

IMRT: Yoğunluk ayarlı radyoterapi; VMAT: Volumetrik ark radyoterapi; SRS: Stereotaktik radyoterapi; SBRT: Stereotaktik vücut radyoterapisi; EGS: Eyleme geçme seviyesi

hasta tedavi merkezini doğrulamak ve hasta hizalamasında kullanılacağından testin tedavi doğruluğuna etkisi önemlidir. Daha ayrıntılı testler için MFDGG-006 IGRT Kalite Kontrol ve Güvencesi raporu SMF tarafından incelenebilir. Test, içinde opak daire ve üzerinde yalancı merkez olan IGRT fantomları ile yapılabilir. Klinikte kullanım sıklığına göre test sadece CBCT görüntüleme bileşeni için yapılabilir. Test **günlük** tekrarlanmalıdır. Tolerans dışı durumda özellikle SRS/SBRT uygulamaları için EGS-3 olarak belirlenmesi önerilir.

- **Kolimatör Göstergesi-Pozisyon Doğruluğu (G5M, A6M):** Testin amacı, kolimatör göstergesindeki alan boyutu ile ışık alanı ile oluşan fiziksel

alan boyutunun aynı olduğunu doğrulamaktır. Eğer Linak kolimatör sistemi jaw ve Çoklu Yapraklı Kolimatör sisteminin ikisini de içeriyorsa (MultiLeaf Colimator, MLC) her biri için ayrı ayrı kontrol edilmelidir. Simetrik tek bir kare alan için (10×10 veya 20×20 cm²) **günlük** dozimetrik ölçümlerde kullanılan düzlemsel 2 Boyutlu ölçüm cihazı, IGRT fantomu, lazer kontrol fantomu ya da bir şablon ile kontrol edilebilir. Test, asimetric alanlarda ve mümkünse klinikte kullanılan en küçük alan boyutu için günlük kontrolden farklı olarak sadece gösterge kontrolü yerine, radyasyon alanı kontrolü film, Elektronik Portal Dozimetri (Electronic Portal Dosimetry, EPID) ya da düzlemsel dozimetri sistemle-

ri kullanılarak **aylık** tekrarlanmalıdır. Test sonuçları Birincil Referans Standart değerleri ile karşılaştırılmalıdır. Tolerans dışı durumlarda, özellikle küçük alanlarda doz veriminde farklılıklar olacağından uygulanan tedavi tekniklerine göre EGS-3 önerilir.

- **Gantry-Kolimatör Açık Göstergesi Kontrolü (A2M):** Gantry ve kolimatörün açık göstergesi doğruluğu mekanik olarak aynı lokalizasyona yerleştirilen su terazisi ile ana açılarda **aylık** kontrol edilmelidir. Tolerans dışı durumlarda EGS-2 önerilir.
- **Radyasyon-Mekanik İzomerkez Uyumu (A3M, Y1M, Y2M, Y4M, Y5M):** Radyasyon izomerkezi ile tüm eksenlerin (kolimatör, gantry ve tedavi masası) dönme merkezi olan mekanik izomerkezin uyumu SRS/SBRT uygulanan Linak cihazlarında **aylık**, uygulanmayan cihazlarda **yıllık** kontrol edilmelidir. Her bir eksen film veya EPID kullanılarak *starshot* tekniği ile ayrı ayrı kontrol edilebilirken, eğer uygun fantom ve yazılım varsa, tek bir testte üç eksen de ölçen bir Winston-Lutz tipi test (WL testi) yapılmalıdır. Test WL testi ile yapılıyorsa oluşan tüm eksenlerin kombinasyonu sonucu oluşan daire yarıçapı <1mm olmalıdır. Test her bir eksen için ayrı ayrı yapılıyorsa her bir dairenin çapı <2mm olmalıdır. Tolerans dışı durumda SRS/SBRT uygulamaları için EGS-3 önerilir.
- **Aksesuar Sistemi Kontrolü (A4M):** Eğer kullanılıyorsa aksesuar tepsisinin dört kardinal gantry açısında izomerkeze göre konumunun değişmediği kontrol edilir. Ayrıca, aksesuar tepsisi takıldığında kaymasını engelleyen kilit sisteminin çalışır olduğu da kontrol edilmelidir. Her iki test **aylık** tekrarlanmalıdır.
- **Işık-Işın Alanı Kontrolü (A5M, Y3M):** Klinik IGRT kullanım sıklığına göre testin sıklığı SMF tarafından belirlenebilir. Ancak G5M testinde kullanılan düzlemsel dozimetrik sistemlerin ışık alanı kenarını ölçebiliyorsa, test simetrik alan ve ganrty 0° pozisyonu için **aylık**, 4 ana ganrty açısı için **yıllık** tekrarlanmalıdır. Ancak ayna, alan ışık ampülü değişimi ya da ganrtydeki herhangi bir arıza sonrasında test sıklık aranmaksızın tekrarlanmalıdır.
- **Çapraz Tel Merkez Kontrolü (A7M):** Hasta pozisyonlamasında IGRT kullanım sıklığına göre test SMF belirleyeceği sıklıkta yapılmalıdır. Ancak kalite kontrol testleri için ölçüm düzeneklerinde çapraz tel izdüşümü kullanıldığından test **aylık** tekrarlanmalıdır. Kolimatör dönüşü ile oluşan dairenin ≤1mm olmalıdır.
- **Tedavi Masası Göstergesi Kontrolü (A8M):** Tedavi masası pozisyon doğruluğu mutlak ve göreceli konuma göre aylık kontrol edilmelidir. Testin amacı masa göstergesi ile yapılan mekanik hareket arasın-

daki uyumu kontrol etmektir. Longitudinal (boyuna), lateral (enine), vertikal (dikey) ve rotasyonel (açısal) hareketlerin kontrollerini içerir.

3.3. MLC Testleri

Linak cihazlarının MLC bileşenlerinin belirlenen/önerilen doğrulukta ve hassasiyette çalışır olması gerekir. IMRT/VMAT uygulanan Linaklarda dinamik testlerin kalite güvence programına dahil edilmesi önerilirken, yalnızca konformal tedavi uygulanan Linaklarda dinamik testlerin güvence programına dahil edilmesine SMF tarafından karar verilmelidir. Ayrıca VMAT/IMRT uygulanan hızlandırıcılarda, firma tarafından önerilen tedavilerin doğru iletilmesini ve TPS kabulü sonrasında MLC parametrelerini kontrol eden özel testler (test hasta kalite güvencesi testi, Chair ya da Strip testi,...) de MLC kalite güvencesi testlerine eklenmelidir.

Varain Linak cihazlarında MLC ve jaw kolimatörleri ayrı birer bileşen iken, Elekta Linak cihazlarında MLC sistemi X yönündeki kolimatör bileşenini oluşturur. Bu nedenle mekanik testlerde önerilen ışık-ışın alanı kontrolü ve radyasyon-mekanik izomerkez uyumu kontrolleri Varian Linak cihazlarında MLC sistemi için de tekrarlanmalıdır. Bu amaçla MLC kalite kontrol A2L, Y3L, Y4L ve Y5L testleri, mekanik testlerde jawlar için anlatıldığı şekilde tekrarlanmalıdır.

- **Lif Pozisyon Doğruluğu (A1L/A3L):** Statik ve dinamik MLC hareketi için Liflerin Linak mekanik izomerkezine ve liflerin birbirine göre pozisyon doğruluğunun belirlenmesidir. Uygun test yöntemi, klinik tedavi teknikleri dikkate alınarak **aylık** tekrarlanmalıdır. Statik kontrolde ve sadece konformal tedavi uygulayan Linak cihazlarında her lif için tolerans aralığı ±1mm, karşılıklı lifle oluşturulan alan genişliği için ±2mm olarak kabul edilebilir. Test dinamik MLC hareketleri için *Picket Fence* testi ya da firma tarafından önerilen MLC hareketliliğini içeren testler ile yapılabilir. EPID, film ve uygun yazılım kullanılarak *Picket Fence* test ışınlamasındaki lif hataları tespit edilebilir. Linak cihazının spesifikasyonları dikkate alınarak her lif için tolerans aralığı IMRT/VMAT için ±1mm, SRS/SBRT için ±0.5 mm olmalıdır.
- **MLC Hareket Hızı (A4L):** IMRT/VMAT uygulamalarında, dinamik ışınlamalarda tedavi doğruluğunu etkileyen lif hızı testi, lif hareketindeki gecikmeyi ve optimum lif hızını kontrol etmek amacıyla aylık tekrarlanmalıdır. Linak marka ve modeline göre değişen hız değeri için test sonucu, TPS kabul testlerinde ölçülen ve TPS Birincil Referans Standart değeri ile karşılaştırılmalı sapma firma önerisine göre tolerans içinde kalmalıdır (Tablo 3).

Tablo 3 MLC testleri

Test kodu	Ölçüm sıklığı	Test tanımı	3D-Konformal	IMRT/VMAT	SRS/SBRT
A1L	Aylık	Lif pozisyon doğruluğu	Her lif için tolerans aralığı ± 1 mm		
A2L	Aylık	MLC ışın-ışık alanı uyumu	Karşılıklı lifle oluşturulan alan genişliği için ± 2 mm ± 2 mm <3 mm EGS*-2 ve >3 mm EGS-3		
A3L	Aylık	Dinamik lif pozisyon doğrulu-picket fence testi	Uygulanmaz	>1 mm görsel değerlendirme <2 mm Görsel hata tespitinde EGS-2 Kuantatif değerlendirme; <1 mm >1 mm EGS-3	< ± 0.5 mm
A4L	Aylık	MLC hareket hızı	$\pm 0,5$ cm/sn		
Y1L	Yıllık	Lif pozisyonu	± 1 mm		
Y2L	Yıllık	tekrarlanabilirliği	<2 mm EGS-2 ve >2 mm EGS-3		
Y2L	Yıllık	MLC geçirgenliği	$\pm \%0.5$ <%1 EGS-2 ve >%1 EGS-3		
Y3L	Yıllık	MLC kolimatör spoke/ star shot	Film merkezinde oluşan dairenin çapı <2 mm İki merkez arası uzaklık <1 mm <2 mm EGS-2		
Y4L	Yıllık	MLC gantry spoke/ star shot	<2 mm >2 mm EGS-2	<2 mm >2 mm EGS-3	<1 mm >1 mm EGS-3
Y5L	Yıllık	MLC ışın-ışık alanı uyumu	± 2 mm <3 mm EGS-2 ve >3 mm EGS-3		
Y6L	Yıllık	Hastası spesifik VMAT kalite kontrol testi	Uygulanmaz	Gamma Kriteri >%3, 2mm ve Geçiş Oranı <%90 olduğunda EGS-2	Gamma Kriteri >%3, 1mm ve Geçiş Oranı <%90 olduğunda EGS-2
Y7L	Yıllık	VMAT kesinti testi	Uygulanmaz	$\pm \%1$	$\pm \%1$

MLC: Multilif kolimatör; IMRT: Yoğunluk ayarlı radyoterapi; VMAT: Volumetrik ark radyoterapi; SRS: Stereotaktik radyoterapi; SBRT: Stereotaktik vücut radyoterapisi

- **Lif Pozisyon Tekrarlanabilirliği (Y1L):** Lif pozisyonlarının tekrarlanabilirliğini kontrol etmek amacıyla test yıllık tekrarlanmalıdır. Ancak SMF sorumluluğunda aylık test A3L düzenli yapılıyorsa bu testin yapılmasına gerek yoktur.
- **MLC Geçirgenliği (Y2L):** Lif kalınlığı boyunca ve komşu lifler arası geçirgenlik değerleri Birincil Referans Standart olarak kabul edilir ve test yıllık tekrarlanarak bu değerlerin değişmediği tüm foton enerjilerinde kontrol edilmelidir. Tolerans ve aksiyon alma seviyesi kabul testlerine ve firma önerisine göre alınmalıdır.
- **Hasta Spesifik IMRT/VMAT Kalite Kontrolü (Y6L):** Test, IMRT veya VMAT spesifik olup, yüksek modülasyon faktörlü, lif hızı değişimi, lif gap genişliği, pozisyonu ve ışın tutma (Beam Hold) özelliklerinin uç şartlarını içeren bir planla yıllık olarak tekrarlanmalıdır. VMAT spesifik planda ise tüm dinamik değişkenlerin senkronizasyonunu içeren yine yüksek modülasyonlu bir hasta planı ile tekrarlanmalıdır. Doz dağılımı haritası karşılaştırıl-

masında AAPM TG218 önerileri dikkate alınmalı, dedektör çözünürlüğü yeterli olmalıdır.[18] Seçilen Gamma İndeks kriterleri (%3/2mm, eşik doz %10 önerilen) Birincil Referans Data olarak kabul edilen ilk Gamma Geçiş Oranına göre EGS belirlenmelidir. SRS/SBRT uygulamaları için daha sıkı tolerans değerleri seçilmelidir.

- **VMAT Kesinti Testi (Y7L):** IMRT/VMAT uygulama sırasında olası bir kesinti ve yeniden tedavi başlatılması durumunda IMRT/VMAT iletiminin doğruluğu yıllık kontrol edilmelidir.

3.4. Dozimetrik Testler

Linak cihazının doğru dozda radyasyon iletimini, klinik tedavi planlarının güvenilirliğini sağlamayı, cihaz performansını sürekli izlemeyi ve hasta güvenliğini korumayı amaçlar. Testler, günlük, aylık ve yıllık olarak sınıflandırılmakta olup, yıllık kontroller genellikle su fantomunda yapılırken, günlük ve aylık testlerde yüksek kararlılığa ve tekrarlanabilirliğe sahip pratik ölçüm sistemleri kullanılmaktadır. Raporla mutlak doz kalib-

Tablo 4 Dozimetrik testler

Test kodu	Ölçüm sıklığı	Test tanımı	Tolerans	Eyleme geçme seviyesi-2	Eyleme geçme seviyesi-3
G1D	Günlük	Foton ve elektron doz verimi sabitliği ^a	<±%3	±%2 ile ±%3 arası	>±%3
G2D	Günlük	Foton ve elektron demetlerinin profil sabitliği kontrolü ^a	<±%3		>±%3
G3D	Günlük	Foton demeti enerji sabitliği ^a	<±%3		
A1D	Aylık	Foton ve elektron demetlerinin doz verimi kontrolü	<±%2	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
A2D	Aylık	Doz hızı sabitliği kontrolü	<±%2		
A3D	Aylık	Foton ve elektron demetlerinin profil sabitliği kontrolü	<±%2	±%2 ile ±%3 arası	>±%3
A4D	Aylık	Elektron enerjisinin sabitliği	<±%2	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
A5D	Aylık	Foton demeti enerji sabitliği	±2.0 mm <±%1	±1 mm ile ±2 mm arası	>±2.0 mm
Y1D	Yıllık	Foton ve elektron demetlerinde doz verimi kalibrasyonu	<±%1		>±%1
Y2D	Yıllık	Foton demetleri için homojenite (flatness) ve simetri (symmetry) kontrolü	<±%1	±%0.5 ile ±%1 arası	>±%1
Y3D	Yıllık	Elektron demetleri için homojenite (flatness) ve simetri (symmetry) kontrolü	<±%1	±%0.5 ile ±%1 arası	>±%1
Y4D	Yıllık	Foton ve elektron demetleri için alan boyutuna bağlı doz verimi faktörlerinin kontrolü	<±%2 <±%1	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
Y5D	Yıllık	Foton demet kalitesi kontrolü	<±%1	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
Y6D	Yıllık	Elektron demet kalitesi kontrolü	<±1 mm	1 mm ile ±2 mm arası	> ±2 mm
Y7D	Yıllık	Foton MU doğrusalılığı kontrolü	<±%1/1MU <±%5	±%1/1MU ile ±%2/2MU arası	> ±%2/2MU
Y8D	Yıllık	Elektron MU doğrusalılığı kontrolü	<±%2	±%2 ile ±%3 arası	>±%3
Y9D	Yıllık	Fotonlarda değişen doz hızı ile doz verimi kararlılığının kontrolü	<±%2	±%2 ile ±%3 arası	>±%3
Y10D	Yıllık	Fotonlarda gantry açısı ile doz verimi kararlılığının kontrolü	<±%1	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
Y11D	Yıllık	Foton demetlerinde gantry açısı ile off axis factor (oaf) kararlılığı kontrolü	<±%1	±%1 ile ±%2 arası	>±%2
Y12D	Yıllık	Ark modu kontrolü	<±%1 <±1 MU	±%1 ile ±%2 arası ±1 MU ile ±2 MU arası	>±%2 >±2 MU
Y13D	Yıllık	Fiziksel wedge faktörünün sabitliği kontrolü	<±%2	±%2 ile ±%3 arası	>±%3

^a: Günlük ölçümler klinikte o gün kullanılacak her enerji için yapılmalıdır. MU: Monitor unit

rasyonu için IAEA TRS 398 önerileri dikkate alınmıştır. [19] 4×4 cm² alan boyutundan küçük alanlar için dozimetri önerileri bu rapor kapsamı dışındadır (Tablo 4).

- **Foton ve Elektron Demeti Doz Verimi Kontrolü (G1D, A1D, Y1D):** Doz verimi doğruluğu tedavinin doğru iletilmesinde önemlidir. Bu nedenle **günlük**, **aylık** ve **yıllık** ölçümlerle kontrol edilmelidir. Günlük ölçümlerde 2 boyutlu düzlemsel dedektörler kullanılarak doz sabitliği kontrol edilebilir. Sapma doz verimi kalibrasyonu sonrasında günlük ölçümlerle aynı geometri ile elde edilen İkincil Referans

Standartlarla karşılaştırılmalı, sapma <%3 olmalıdır. Aylık ölçümlerde TRS 398 önerileri ile katı su fantomunda foton demetleri için önerilen 0.6 cc silindirlik ve elektronlar demetleri için önerilen paralel plakalı iyon odaları ve parametreleri kullanılmalıdır. Aylık sapma %2 içinde olmalıdır. Yıllık doz verimi kalibrasyonu yine TRS 398 önerileri ve TPS kalibrasyonu dikkate alınarak su fantomu ile yapılmalıdır. Sapma %1 içinde olmalıdır. Mümkünse yıllık kalibrasyon başka bir ölçüm sistemi ile de doğrulanmalıdır. Aylık ve yıllık kalibrasyonlar sonrasında günlük ölçüm sis-

- temlerine İkincil Referans Standartlar tekrar oluşturulmalıdır. Tolerans dışı durumlarda EGS-3 önerilir.
- **Foton ve Elektron Demeti Profil Kontrolü (G2D, A3D, Y2D, Y3D):** Foton ve elektron demetlerinin güncel profil eğri parametreleri ile TPS modelleme ölçümleri sırasındaki parametreleri (homojenite ve simetri) ile tutarlı olması gerekir. Profil parametre değerlerinin günlük ve aylık kontrollerde İkincil Referans Standart verilerden sapması kontrol edilir. Test, referans alan ve derinlik için aylık, farklı alan boyutu ve derinlikler için yıllık tekrarlanmalıdır. Yıllık ölçümde merkez dışı derinlikte de kontrol edilmesi önerilir. Eğer günlük dozimetrik ölçümlerde kullanılan düzlemsel dedektörlerin profil ölçme yeteneği varsa test **günlük** de tekrarlanabilir. Günlük kontrollerde tolerans %3 İkincil Referans Standartlardan sapma olarak kabul edilebilir ancak aylık ve yıllık ölçümlerde sapma Birincil Referans Standartlardan sapma ile kontrol edilecekse daha sıkı tolerans aralığı belirlenmelidir.
 - **Foton ve Elektron Demeti Enerji Kontrolü (G3D, A4D, A5D, Y5D, Y6D):** Foton ve Elektron demetlerinde enerji parametrelerinin TPS'e yüklenen Birincil Referans Standart değerlerinden sapmadığının kontrolüdür. Testin **aylık** ve **yıllık** yapılması önerilir. Ancak **günlük** dozimetrik ekipmanın enerji sabitliğini ölçme yeteneği varsa o gün tedavide kullanılacak demetlere ait enerji sabitliğinin ikincil referans standartları sağladığı kontrol edilebilir. Aylık kontrolde elektron demetleri için SMF uzmanı tarafından günlük değerler incelenerek yeni ölçüm gerekliliği belirlenebilir. Ölçüm su fantomu ile yapılacak ise Yüzde Derin Doz (Percentage Depth Dose, PDD) eğri karşılaştırması ya da R50 (dozun %50 değerindeki derinlik) derinliği karşılaştırılır. Aylık kontrollerde Doku Fantom Oranı, *Tissue Phantom Ratio* (TPR) değeri her enerji için Birincil Referans Standart ile karşılaştırılabilir. Sapma aylık ölçümlerde elektron demetlerinde doz değeri $\leq \pm 2\%$ veya beklenen derinlikten $\leq \pm 2.0$ mm, foton demetlerinde $\leq \pm 1\%$ ya da $\leq \pm 2.0$ mm içinde olmalıdır. Yıllık kontrollerde tolerans dışı durumda EGS-3 önerilir.
 - **Doz Hızı Kontrolü (A2D):** Klinikte kullanılan tüm foton enerjilerinde ve doz hızlarında, dinamik değişkenlerden biri olan doz hızının doğru iletildiği ve her doz hızında birim MU başına dozun tutarlı olduğu **aylık** kontrol edilmelidir.
 - **Doz Verimi-OutPut Faktörü Kontrolü (Y4D):** Referans alan doz verimi değerine karşın diğer alanlar için hesaplanan doz verimi faktörlerinin Birincil Referans Standart verileri ile tutarlı olduğu **yıllık** kontrol edilmelidir. Belirlenen alanlarla ve $< 4 \times 4$ cm² alan

- boyutundan küçük alanlarda kontrol edilmelidir. Küçük alan boyutlu alanlarda doz verimi ölçümü uygun iyon odası seçimi ve protokolle yapılmalıdır. Tolerans değerlerini aşma durumunda EGS-3 önerilir.
- **MU Doğrusallığı Kontrolü (Y7D, Y8D):** Farklı MU değerleri için tekrarlanan ışınlama ve ölçümlerde MU doğrusallığı ve End-Effect değerinin **yıllık** kontrolüdür. TPS'de belirlenen küçük MU değeri için ve belirlenen farklı MU değerleri için tekrarlanmalıdır. Açık ve bölünmüş (segmentli) alanlarda yıllık kontrol edilmelidir. Segmentli alan seçilirken en küçük açık alan boyutu içermesi önerilir. MU/Segment değeri İkincil Referans Standart verilerle karşılaştırılmalıdır. Açık alanda ve > 5 MU değerlerinde okuma doğrusallığı %2 içinde olmalıdır.
 - **Doz Hızı-Doz Verimi Uyumu (Y9D):** Farklı doz hızı değerlerinde doz verimi kararlılığının İkincil Referans Standart değerlerinden sapmadığı **yıllık** kontrol edilmelidir. Doz hızı, özellikle IMRT/VMAT dinamik uygulamalarında değişeceğinden bu değişimin tutarlı olduğunu kontrol etmek amacı ile dinamik alanlarda da doz hızı değişimine göre doz verimi kontrol edilmelidir.
 - **Gantry Dönüşü- Doz Verimi/Faktörü Uyumu (Y10D, Y11D):** Farklı *gantry* açılarında ölçülen doz verimi değerinin İkincil Referans Standartlarla uyumlu olduğunu yıllık olarak kontrol edilmelidir. Doz verimi açıdan bağımsız olmalı, farklı *gantry* açılarında okunan doz verimi değeri %2 içinde tutarlı olmalıdır. G:0° referans olmalı ancak İkincil Referans Standart değer ile tutarlı olmalıdır.

4. SONUÇ

MFD-GG007 Lineer Hızlandırıcılarda Kalite Kontrol ve Güvencesi esas raporunun özeti olarak hazırlanan bu rapor ile, medikal fizik uzmanlarına raporda **günlük**, **aylık** ve **yıllık** sıklıklarla önerilen bazı testlerin klinik pratiklerinde kendi kliniklerinde oluşturacakları kalite güvencesi programı için rehber olması amaçlanmıştır. Testler, tolerans aralıkları ve eyleme geçme seviyeleri uluslararası standartlar ve MFD-GG007 üyelerinin tecrübelerine dayanmaktadır. Bu nedenle SMF uzmanı bu raporun önerilerini bireysel klinik şartlarına, sahip olduğu dozimetrik ekipmana ve ölçüm yapacak medikal fizik uzmanının tecrübesine göre düzenlemelidir. SMF uzmanı, radyoterapide risk analizi önerilerine göre testleri değerlendirmeli ve gerekirse raporda önerilen sıklıkları ve tolerans değerlerini kendi klinik uygulamalarına göre değiştirerek, etkin ve başarılı bir kalite güvencesi programı oluşturmalıdır.[6]

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

Çıkar Çatışması: Bildirilmemiştir.

Finansal Destek: Maddi destek alınmamıştır.

Hakem Değerlendirmesi: Dış bağımsız.

KAYNAKLAR

- Purdy JA, Klein E, Vijayakumar S, Perez CA, Levitt SH, Purdy JA, et al. Quality assurance in radiation oncology. In Levitt SH, Purdy JA (eds), *Technical Basis of Radiation Therapy*. Medical Radiology. Springer.
- Bissonnette JP, Balter PA, Dong L, Langen KM, Lovelock DM, Miften M, et al. Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technologies: A report of the AAPM TG-179. *Med Phys* 2012;39:1946–63.
- Chang DS, Lasley FD, Das IJ, Mendonca MS, Dynlacht JR. *Linac Quality Assurance*. In *Basic Radiotherapy Physics and Biology*. Springer International Publishing, 2014. p. 151–4.
- Canadian Partnership for Quality Radiotherapy Technical Quality Control Guidelines for Accelerator-Integrated Cone-Beam Systems for Verification Imaging. Available at: https://comp-ocpm.ca/_uploads/63b4771aa56ec.pdf. Accessed Jan 29, 2025.
- Remeijer P, Deurloo K, Eenink M, Geleijns K, Hermans J, Van Herpt H, et al. NCS Report 32: Quality assurance of cone-beam CT. Available at: <https://radiationdosimetry.org/ncs/documents/ncs-32-quality-assurance-of-cone-beam-ct>. Accessed Jan 29, 2025.
- Huq MS, Fraass BA, Dunscombe PB, Gibbons JP, Ibbott GS, Mundt AJ, et al. The report of Task Group 100 of the AAPM: Application of risk analysis methods to radiation therapy quality management. *Med Phys* 2016;43:4209–62.
- Geurts MW, Jacqmin DJ, Jones LE, Kry SF, Mihailidis DN, Ohrt JD, et al. AAPM Medical Physics Practice Guideline 5b: Commissioning and QA of treatment planning dose calculations—Megavoltage photon and electron beams. *J Appl Clin Med Phys* 2022;23(9):e13641.
- Smilowitz JB, Das IJ, Feygelman V, Fraass BA, Kry SF, Marshall IR, et al. AAPM Medical Physics Practice Guideline 5a: Commissioning and QA of Treatment Planning Dose Calculations - Megavoltage Photon and Electron Beams. *J Appl Clin Med Phys* 2015;16(5):14–34.
- Palta JR. Treatment delivery system 4: Acceptance testing, commissioning and quality assurance of medical linear accelerators. Available at: <https://www.aapm.org/meetings/02AM/pdf/8351-37037.pdf>. Accessed Jan 29, 2025.
- Krauss RF, Balik S, Cirino ET, Hadley A, Hariharan N, Holmes SM, et al. AAPM Medical Physics Practice Guideline 8b: Linear accelerator performance tests. *J Appl Clin Med Phys* 2023;24(11):e14160.
- 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;36:4197–212.
- 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.
- Smith K, Balter P, Duhon J, White GA, Vassy DL, Miller RA, et al. AAPM medical physics practice guideline 8a: Linear accelerator performance tests. *J Appl Clin Med Phys* 2017;18(4):23–39.
- Canadian Partnership for Quality Radiotherapy. Available at: www.cpqr.ca. Accessed Jan 29, 2025.
- Kirkby C, Ghasroddashti E, Angers CP, Zeng G, Barnett E. COMP report: CPQR technical quality control guideline for medical linear accelerators and multileaf collimators. *J Appl Clin Med Phys* 2018;19(2):22–8.
- Meijer GJ, Van Kleffens HJ, Mijnheer BJ. NCS Report 9: Quality control of medical linear accelerators: Current practice and minimum requirements. Available at: <https://radiationdosimetry.org/ncs/documents/ncs-9-quality-control-of-medical-linear-accelerators>. Accessed Jan 29, 2025.
- Seravalli E, Van Battum L, Van Gellekom M, Houweling A, Kaas J, Kuik M, et al. NCS Report 28: National Audit of Quality Assurance for Intensity Modulated Radiotherapy and Volumetric Modulated Arc Therapy. Available at: <https://radiationdosimetry.org/ncs/documents/ncs-28-qa-audit-imrt-vmat>. Accessed Jan 29, 2025.
- Miften M, Olch A, Mihailidis D, Moran J, Pawlicki T, Molineu A, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys* 2018;45(4):e53–83.
- Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS398_scr.pdf. Accessed Jan 29, 2025.