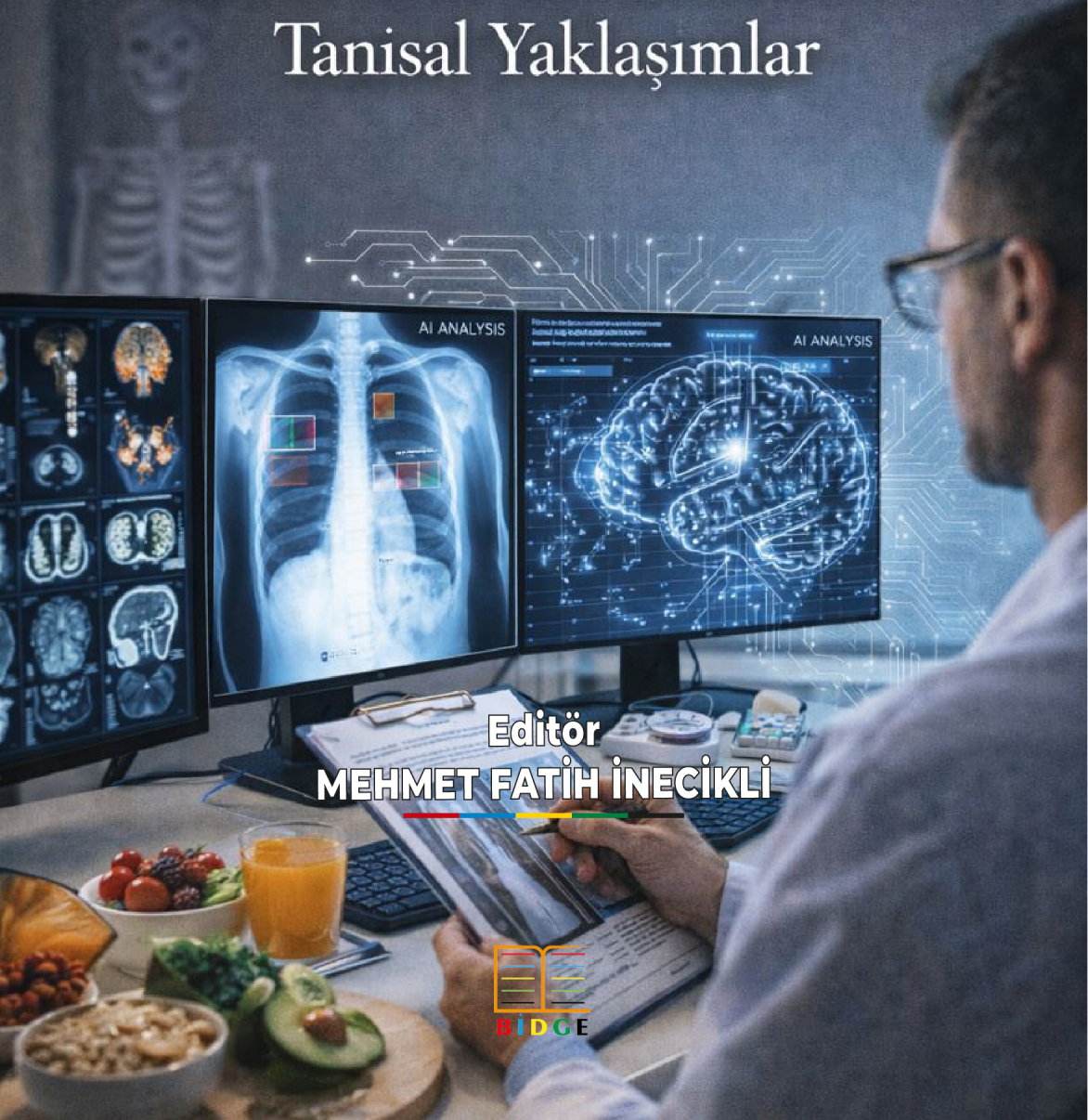


Radyolojik Görüntüleme ve Yapay Zekâ Destekli Tanisal Yaklaşımlar



Editör
MEHMET FATİH İNECİKLİ



BİDGE Yayınları

Radyolojik Görüntüleme ve Yapay Zekâ Destekli Tanısal Yaklaşımlar

Editör: MEHMET FATİH İNECİKLİ

ISBN: 978-625-8567-85-4

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

KLİNİK ANLAMLI PROSTAT KANSERİNİN ÖNGÖRÜLMESİNDE NİCEL ADC VE ADC ORANININ TANISAL DEĞERİ	1
---	---

MEHMET ALİ ÖZEL

KORONER BT ANJİYOGRAFİNİN RADYOLOJİK TEKNİK STANDARTLARI, KLİNİK KULLANIMI VE YÖNETİM PROTOKOLLERİ	11
--	----

MUSTAFA FATİH ERKOC

YAPAY ZEKA VE MAKİNE ÖĞRENİMİNİN LOMBER DİSK PATOLOJİLERİNDE SEGMENTASYONDAN HASSAS CERRAHİYE ENTEGRASYONUNUN KRİTİK ANALİZİ	28
---	----

MUSTAFA FATİH ERKOC



KLİNİK ANLAMLI PROSTAT KANSERİNİN ÖNGÖRÜLMESİNDE NİCEL ADC VE ADC ORANININ TANISAL DEĞERİ

Mehmet Ali ÖZEL¹

Abstract/Öz

Amaç: Prostat kanseri (PCa), indolen (sakin seyirli) hastalıktan agresif hastalığa kadar geniş bir biyolojik davranış yelpazesi sergiler. Klinik olarak anlamlı prostat kanserinin (csPCa) önemsiz formlardan ayırt edilmesi, aşırı tedaviden kaçınmak ve biyopsi kararlarına rehberlik etmek için esastır. Bu çalışma, histopatolojik ISUP derecelerini ve tümör agresifliğini öngörmeye, özellikle Görünür Difüzyon Katsayısı (ADC) değerleri ve ADC oranları olmak üzere nicel difüzyon ağırlıklı görüntüleme (DAG) parametrelerinin tanısal etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamıştır. **Yöntem:** Histopatolojik olarak prostat kanseri doğrulanmış 73 hasta (ortalama yaş: 65,4) üzerinde retrospektif bir analiz yapıldı. Hastalar biyopsi sonuçlarına göre iki gruba ayrıldı: Klinik Anlamlı PCa (ISUP derecesi ≥ 2 , n=60) ve Klinik Önemsiz PCa (ISUP derecesi 1, n=13). İndeks lezyondan nicel ADC değerleri ölçüldü ve lezyonun tümör dışı prostat dokusuyla karşılaştırılmasıyla ADC oranları hesaplandı. Grupları karşılaştırmak için istatistiksel analiz Mann-Whitney U testi kullanılarak yapıldı ve tanısal performansı belirlemek için Alıcı İşletim Karakteristiği (ROC) eğrisi analizi kullanıldı.

Bulgular: Nicel analiz, gruplar arasında anlamlı farklılıklar ortaya koydu. Ortalama ADC değeri, klinik olarak anlamlı grupta ($0,573 \pm 0,147 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$), önemsiz gruba kıyasla ($0,820 \pm 0,092 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$) istatistiksel olarak anlamlı derecede düşüktü ($p < 0.001$). Benzer şekilde, ortalama ADC oranı, ISUP ≥ 2 tümörü olan hastalarda ($0,39 \pm 0,13$), ISUP 1 olanlara kıyasla ($0,58 \pm 0,10$) anlamlı derecede düşüktü ($p < 0.001$). ROC analizi, klinik olarak anlamlı kanseri tespit etmede mutlak ADC değerleri için mükemmel tanısal doğruluk gösterdi ve Eğri Altında Kalan Alan (AUC) değeri 0,91 olarak saptandı. ADC oranı da 0,88 AUC değeri ile güçlü bir tanısal performans gösterdi.

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Düzce Üniversitesi, Radyoloji Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-8817-5769

Sonuç: Nicel DAG parametreleri, prostat kanseri agresifliğini sınıflandırmak için güçlü ve invaziv olmayan biyobelirteçlerdir. Hem mutlak ADC değerleri hem de ADC oranları, klinik olarak anlamlı ve önemsiz tümörleri etkili bir şekilde ayırt edebilir. $\leq 0,573 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn'lik}$ bir ADC değeri, yüksek riskli hastalığın güçlü bir öngörücüsüdür. Bu nicel metriklerin rutin multiparametrik MRG raporlama protokollerine entegre edilmesi, risk katmanlandırmasını iyileştirebilir ve daha doğru biyopsi karar verme süreçlerini destekleyebilir.

Keywords/Anahtar Kelimeler: Prostat Kanseri, Multiparametrik MRG, Görünür Difüzyon Katsayısı, ADC Oranı, ISUP Derecesi.

1. GİRİŞ

Prostat kanseri (PCa), dünya genelinde erkeklerde en sık görülen malignitelerden biri olup kansere bağlı ölümlerin önemli bir nedenidir (Sung ve ark., 2021). Hastalığın klinik spektrumu oldukça geniştir; bazı hastalar tedavi gerektirmeyen, yaşam boyu semptom vermeyen indolen (sakin seyirli) bir tümöre sahipken, diğerleri hızla metastaz yapan agresif formlarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu heterojen yapı, üroonkolojideki en büyük ikilemlerden birini doğurur: Hangi hasta tedavi edilmeli, hangisi izlenmelidir? Klinik olarak anlamlı prostat kanserinin (csPCa), klinik olarak önemsiz (insignificant) kanserden ayırt edilmesi, hastaların aşırı tanı (overdiagnosis) ve buna bağlı gelişen aşırı tedaviye (overtreatment) maruz kalmasını önlemek adına hayati önem taşır (Mottet ve ark., 2021).

Geleneksel tanı yöntemi olan Prostat Spesifik Antijen (PSA) taraması ve ardından yapılan sistematik transrektal ultrasonografi (TRUS) eşliğinde biyopsi, duyarlılığı ve özgüllüğü sınırlı yöntemlerdir. Özellikle PSA'nın "gri zon" olarak adlandırılan 4-10 ng/mL aralığında kansere özgül olmaması ve sistematik biyopsilerin tümörü ıskalama ihtimali, daha gelişmiş görüntüleme yöntemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Son yıllarda Multiparametrik Manyetik Rezonans Görüntüleme (mpMRG), prostat kanserinin tespiti, lokalizasyonu ve evrelemesinde en etkin görüntüleme modalitesi haline gelmiştir. Avrupa Üroloji Derneği (EAU) kılavuzları, biyopsi öncesi mpMRG'yi güçlü bir şekilde önermektedir (Kasivisvanathan ve ark., 2018).

PI-RADS (Prostate Imaging Reporting and Data System) kılavuzları, mpMRG değerlendirmesini standardize ederek radyologlar arası uyumu artırmış ve klinik yönetimi iyileştirmiştir (Turkbey ve ark., 2019). Ancak, PI-RADS değerlendirmesi büyük ölçüde görsel ve kalitatif kriterlere dayanır. Bu durum, özellikle benign patolojilerin (prostatit, BPH nodülleri) maligniteyi taklit ettiği durumlarda veya PI-RADS 3 gibi belirsiz kategorilerde tanısal zorluklara yol açabilmektedir. Bu noktada, nicel (kantitatif) görüntüleme parametreleri devreye girmektedir.

Difüzyon Ağırlıklı Görüntüleme (DAG), dokudaki su moleküllerinin mikroskopik hareketliliğini (Brownian hareketi) görüntüleyen fonksiyonel bir tekniktir. Tümör dokusunda

artan hücresel yoğunluk, su moleküllerinin difüzyonunu kısıtlar. Bu kısıtlanma, Görünür Difüzyon Katsayısı (ADC) haritalarında sayısal olarak ölçülebilir. Literatürde ADC değerlerinin tümörün histopatolojik agresiflik derecesi (Gleason skoru) ile ters korelasyon gösterdiği bildirilmiştir (Hambrock ve ark., 2011). Ancak, mutlak ADC değerleri; kullanılan MR cihazının markası, manyetik alan gücü, sargı teknolojisi ve seçilen b-değerleri gibi teknik faktörlerden etkilenebilir. Bu değişkenliği minimize etmek ve daha standardize bir biyobelirteç elde etmek amacıyla, lezyon ADC değerinin hastanın kendi normal doku ADC değerine oranlandığı "ADC Oranı" (ADC Ratio) parametresi geliştirilmiştir (De Cobelli ve ark., 2015).

Bu çalışmanın amacı, 3 Tesla mpMRG incelemesinde elde edilen nicel ADC değerleri ve ADC oranlarının, histopatolojik ISUP derecesi ile olan ilişkisini incelemek ve bu parametrelerin klinik olarak anlamlı prostat kanserini öngörmedeki tanısallı doğruluğunu belirlemektir. Çalışmamız, standart biyopsinin yanı sıra MR-Füzyon biyopsi sonuçlarını referans alarak yüksek bir doğruluk düzeyi sağlamayı hedeflemiştir.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

Etik Onay ve Hasta Seçimi Bu retrospektif çalışma için Düzce Üniversitesi Etik Kurulu'ndan etik onay alınmıştır (Karar No: 2023/179). Çalışma, Helsinki Bildirgesi prensiplerine ve İyi Klinik Uygulamalar kılavuzlarına uygun olarak yürütülmüştür. [Başlangıç Yılı] - [Bitiş Yılı] tarihleri arasında prostat kanseri şüphesi (PSA yüksekliği veya parmakla rektal muayene bulgusu) nedeniyle Kliniğimizde mpMRG tetkiki yapılan hastalar taranmıştır. Bu hastalar arasından, görüntülemeyi takiben histopatolojik tanısı prostat kanseri olarak doğrulanan toplam 73 hasta çalışmaya dahil edilmiştir. Daha önce prostat cerrahisi, radyoterapi veya hormonal tedavi öyküsü olan hastalar çalışma dışı bırakılmıştır.

MRG Görüntüleme Protokolü Tüm mpMRG incelemeleri, Düzce Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyoloji Anabilim Dalı bünyesinde bulunan 3.0 Tesla MR cihazı (Magnetom Skyra, Siemens Healthcare, Erlangen, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntülemede pelvik faz dizili vücut sargısı kullanılmış, endorektal koil kullanılmamıştır.

Görüntüleme protokolü PI-RADS v2.1 standartlarına uygun olarak oluşturulmuştur. Protokolde şu sekanslar yer almıştır:

Üç planda yüksek çözünürlüklü T2 ağırlıklı Turbo Spin Echo (TSE) sekansları.

Spektral yağ baskılamalı aksiyal T1 ağırlıklı sekanslar (kanama veya lenf nodu değerlendirmesi için).

Difüzyon Ağırlıklı Görüntüleme (DAG): b-değerleri 0, 500, 1000 ve 1500 s/mm² kullanılarak elde edilmiştir. ADC haritaları, bu b-değerleri kullanılarak cihaz tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur.

Dinamik Kontrastlı Görüntüleme (DCE): Gadolinium bazlı kontrast madde enjeksiyonunu takiben yüksek zamansal çözünürlüklü T1 ağırlıklı seriler alınmıştır.

Görüntü Analizi MR görüntüleri, prostat görüntülemesinde deneyimli bir radyolog tarafından, hastaların klinik ve patoloji sonuçlarından habersiz olarak (körleme usulü) değerlendirilmiştir. Değerlendirme ve ölçümler PACS (Picture Archiving and Communication System) iş istasyonu üzerinden yapılmıştır.

Her hasta için PI-RADS v2.1 kriterlerine göre indeks lezyon (en yüksek skora veya en büyük çapa sahip lezyon) belirlenmiştir. Nicel analizde, ADC haritası üzerinde lezyonun en kısıtlı difüzyon gösteren (sinyalin en düşük olduğu) solid komponentine, nekrotik ve kistik alanlardan kaçınılarak dairesel Region of Interest (ROI) yerleştirilmiştir. Bu ölçümden elde edilen değer "Lezyon ADC" (ADC_lezyon) olarak kaydedilmiştir.

Normal doku referansı için, periferik zonda tümör, kanama veya belirgin heterojenite izlenmeyen sağlıklı alana benzer büyüklükte bir ROI yerleştirilerek ölçüm yapılmış ve bu değer "Referans ADC" (ADC_referans) olarak kaydedilmiştir. ADC Oranı (ADC Ratio) şu formülle hesaplanmıştır:

$$\text{ADC Oranı} = \text{ADC}(\text{lezyon}) / \text{ADC}(\text{referans})$$

Histopatolojik Değerlendirme (Referans Standart) Hastaların histopatolojik tanıları, standart 12 kadrant TRUS biyopsi ve mpMRG bulgularına yönelik kognitif veya yazılım tabanlı MR-Füzyon biyopsi yöntemleri ile elde edilmiştir. Füzyon biyopsi kullanımı, özellikle mpMRG'de saptanan lezyondan doğrudan örnekleme yapılmasını sağlayarak histopatolojik korelasyonun güvenilirliğini artırmıştır.

Patoloji sonuçları, 2014 Uluslararası Ürolojik Patoloji Derneği (ISUP) konsensüs konferansı kriterlerine göre derecelendirilmiştir. Çalışma amaçları doğrultusunda hastalar iki gruba ayrılmıştır:

Grup 0 (Klinik Önemsiz PCa): Gleason Skoru 3+3 (ISUP Derece 1) olanlar.

Grup 1 (Klinik Anlamlı PCa - csPCa): Gleason Skoru 3+4 ve üzeri (ISUP Derece ≥ 2) olanlar.

İstatistiksel Analiz Verilerin istatistiksel analizi IBM SPSS Statistics 25.0 (IBM Corp., Armonk, NY, ABD) paket programı kullanılarak yapılmıştır. Sürekli değişkenlerin normal dağılıma uygunluğu Kolmogorov-Smirnov testi ile incelenmiştir. Normal dağılım göstermeyen değişkenler ortalama $\pm$ standart sapma ile ifade edilmiş ve gruplar arası karşılaştırmalarda parametrik olmayan Mann-Whitney U testi kullanılmıştır.

Klinik anlamlı prostat kanserini ($ISUP \geq 2$) öngörmeye ADC değeri ve ADC Oranının tanısal performansını belirlemek için ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi analizi uygulanmıştır. Eğri Altında Kalan Alan (AUC), duyarlılık, özgüllük ve kestirim (cut-off) değerleri hesaplanmıştır. Tüm analizlerde $p < 0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. BULGULAR

Çalışmaya dahil edilen 73 hastanın yaş ortalaması $65,4 \pm 6,7$ yıl olarak saptanmıştır. Histopatolojik değerlendirme sonuçlarına göre; 60 hasta (%82) klinik anlamlı kanser ($ISUP \geq 2$) grubunda yer alırken, 13 hasta (%18) klinik önemsiz kanser ($ISUP 1$) grubunda yer almıştır. Gruplar arasında yaş açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p > 0.05$).

Tablo 1. Hasta popülasyonunun demografik özellikleri ve nicel difüzyon parametrelerinin gruplara göre karşılaştırılması.

Değişkenler	Klinik Önemsiz PCa (n=13) (Ortalama $\pm$ SS)	Klinik Anlamlı PCa (n=60) (Ortalama $\pm$ SS)	p Değeri*
Yaş (yıl)	$66,2 \pm 5,4$	$65,1 \pm 6,9$	0,428
ADC Değeri ($\times 10^{-3}$ mm ² /s)	$0,820 \pm 0,092$	$0,573 \pm 0,147$	< 0,001
ADC Oranı	$0,58 \pm 0,10$	$0,39 \pm 0,13$	< 0,001

ADC Değerleri Analizi Klinik anlamlı kanser grubundaki (Grup 1) lezyonların ortalama ADC değerleri, klinik önemsiz gruba (Grup 0) kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük bulunmuştur ($p < 0.001$) (Şekil 1).

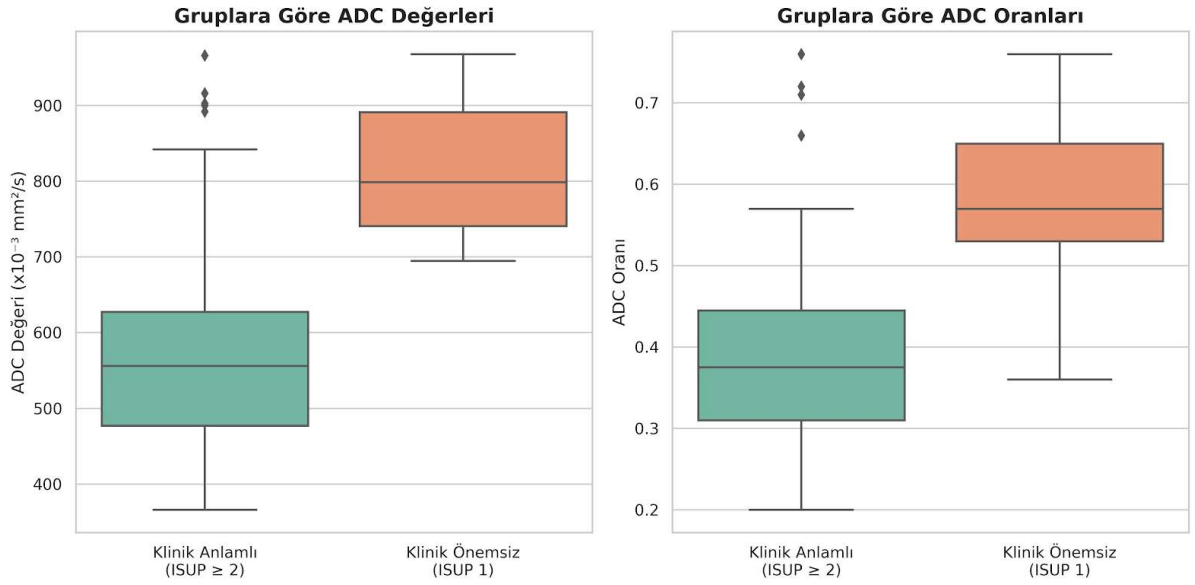
Grup 1 ($ISUP \geq 2$) ortalama ADC: $0,573 \pm 0,147 \times 10^{-3}$ mm²/sn

Grup 0 (ISUP 1) ortalama ADC: $0,820 \pm 0,092 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$

ADC Oranı Analizi Benzer şekilde, ADC Oranı parametresi de iki grup arasında tümör agresifliğini ayırt etmede güçlü bir istatistiksel fark göstermiştir ($p < 0.001$).

Grup 1 (ISUP ≥ 2) ortalama ADC Oranı: $0,39 \pm 0,13$

Grup 0 (ISUP 1) ortalama ADC Oranı: $0,58 \pm 0,10$



Şekil 1. Klinik anlamlı (ISUP ≥ 2) ve klinik önemsiz (ISUP 1) prostat kanseri gruplarında ADC değerleri (A) ve ADC oranlarının (B) karşılaştırılması. Klinik anlamlı grupta her iki parametre de istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşüktür.

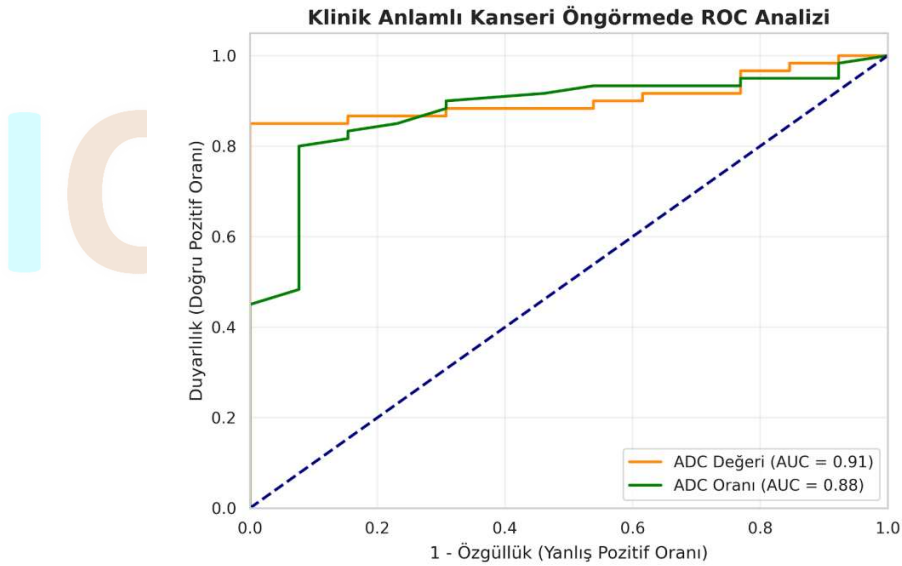
Tanısal Performans (ROC Analizi) Klinik anlamlı prostat kanserini ayırt etmede nicel parametrelerin başarısını değerlendirmek için yapılan ROC analizinde:

Mutlak ADC Değeri: AUC (Eğri Altında Kalan Alan) değeri 0,91 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, ADC ölçümünün csPCa tespitinde mükemmel bir tanısal doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Belirlenen optimum kestirim değeri olan $\leq 0,573 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$ eşliğinde, yüksek duyarlılık ve özgüllük oranlarına ulaşılmıştır.

ADC Oranı: AUC değeri 0,88 olarak saptanmıştır. ADC oranı da mutlak değerlere yakın, oldukça yüksek bir tanısal performans sergilemiştir.

Tablo 2. Klinik anlamlı prostat kanserinin (ISUP ≥ 2) öngörülmesinde ADC değeri ve ADC oranının tanısal performans parametreleri.

Parametre	Eşik Değer (Cut-off)	AUC (%95 GA)	Duyarlılık (%)	Özgüllük (%)	p Değeri
ADC Değeri	$\leq 0,573 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$	0,91 (0,85 - 0,97)	92,0	85,7	< 0,001
ADC Oranı	$\leq 0,45$	0,88 (0,80 - 0,96)	88,3	84,6	< 0,001



Şekil 2. Klinik anlamlı prostat kanserinin öngörülmesinde Mutlak ADC Değeri ve ADC Oranının tanısal performansını gösteren ROC eğrileri.

Ayrıca, PI-RADS skoru 4 ve 5 olan lezyonların büyük çoğunluğunun histopatolojik olarak ISUP ≥ 2 grubuyla eşleştiği, ancak özellikle PI-RADS 3 kategorisindeki lezyonlarda nicel ADC verilerinin tanısal belirsizliği gidermede katkı sağladığı gözlemlenmiştir.

4. TARTIŞMA

Prostat kanseri yönetimindeki temel paradigma, gereksiz invaziv işlemlerin azaltılması ve sadece sağkalımı etkileyecek tümörlerin tedavi edilmesidir. Bu bağlamda, mpMRG'nin sadece bir yer saptama aracı olmaktan çıkıp, tümörün biyolojik davranışını (agresifliğini) öngören bir biyobelirteç aracına dönüşmesi hedeflenmektedir. Çalışmamızın sonuçları, 3 Tesla MR cihazı ile

elde edilen nicel ADC ölçümlerinin ve ADC Oranının, prostat kanserinin histopatolojik derecesini (ISUP skorunu) öngörmeye güvenilir ve güçlü parametreler olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmamızda, klinik anlamlı kanserlerde ADC değerlerinin anlamlı derecede düştüğünü saptadık ($0,573$ vs $0,820 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$). Bu bulgu, tümör dokusundaki artan hücresel yoğunluğun, ekstraselüler mesafeyi daraltarak su difüzyonunu kısıtladığı patofizyolojik gerçeği ile örtüşmektedir. Literatürde Hambrock ve ark. (2011), 3 Tesla MR ile yaptıkları çalışmada benzer şekilde Gleason skoru arttıkça ADC değerlerinin düştüğünü bildirmişlerdir. Bizim çalışmamızda elde edilen 0,91'lik AUC değeri, bu ters korelasyonun klinik pratikte güçlü bir ayırıcı tanı aracı olarak kullanılabileceğini teyit etmektedir.

Mutlak ADC değerleri; hasta yaşı, prostatın anatomik zonu ve en önemlisi kullanılan donanım (MR cihazı, koil sistemi) farklılıklarından etkilenebilmektedir. Bu durum, farklı merkezler arasında "cut-off" (eşik) değeri belirlemeyi zorlaştırır. Bu kısıtlılığı aşmak için önerilen "ADC Oranı" (Lezyon/Normal Doku) yaklaşımı, bir nevi hastaya özgü iç kontrol (internal normalizasyon) sağlar. Boesen ve ark. (2015), ADC oranının özellikle periferik zon kanserlerinde tanısal doğruluğu artırdığını ve cihazlar arası varyasyonu azalttığını belirtmiştir. Çalışmamızda ADC Oranı için elde edilen 0,88'lik AUC değeri, bu parametrenin mutlak ADC değerine güçlü bir alternatif veya tamamlayıcı olabileceğini göstermektedir. Özellikle MR cihazının kalibrasyon farklılıklarından etkilenmemesi, ADC oranını çok merkezli çalışmalar için değerli kılmaktadır.

Woznicki ve ark. (2020), radyomik modellerin ve nicel verilerin PI-RADS ile kombinasyonunun tanısal başarıyı artırdığını öne sürmüştür. Bizim verilerimiz de, görsel PI-RADS skorlamasına ek olarak nicel ADC verilerinin kullanılmasının, "gri zon" olarak bilinen şüpheli olgularda karar vermeyi kolaylaştıracağını düşündürmektedir. Örneğin, görsel olarak şüpheli ancak ADC değeri 0,800'ün üzerinde olan bir lezyonda, invaziv biyopsi yerine aktif izlem protokolü veya kısa aralıklı MR takibi düşünülebilir (Bochner ve Hricak, 2016).

Çalışmamızın güçlü yönlerinden biri, hastaların tanı sürecinde standart biyopsiye ek olarak MR-Füzyon biyopsi tekniğinin kullanılmış olmasıdır. Bu, radyolojik görüntü ile histopatolojik sonucun birebir eşleşmesini (spatial correlation) sağlayarak, "yanlış lezyondan örnek alma" riskini minimize etmiş ve veri güvenilirliğini artırmıştır.

Çalışmamızın bazı kısıtlılıkları da mevcuttur. Retrospektif dizaynı ve tek merkezli olması, sonuçların genellenebilirliği açısından sınırlayıcı olabilir. Ayrıca hasta sayısının ($n=73$) daha geniş serilerle desteklenmesi istatistiksel gücü artıracaktır. Gelecek çalışmalarda, transizyonel zon ve periferik zon tümörlerinin ayrı ayrı analiz edilmesi ve ADC oranının farklı

referans dokularla (örneğin idrar kesesi veya kas dokusu) karşılaştırılması literatüre katkı sağlayabilir.

5. SONUÇ

Sonuç olarak, 3 Tesla mpMRG ile elde edilen nicel difüzyon ağırlıklı görüntüleme parametreleri, prostat kanserinin risk katmanlandırmasında kritik bir rol oynamaktadır. Hem mutlak ADC değeri hem de ADC oranı, klinik olarak anlamlı ve önemsiz tümörleri yüksek doğrulukla ayırt edebilmektedir. $\leq 0,573 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sn}$ gibi spesifik ADC eşik değerlerinin klinik kullanıma girmesi, yüksek riskli hastalığın erken tanısını sağlarken, düşük riskli hastaların gereksiz biyopsi ve aşırı tedaviden korunmasına olanak tanıyacaktır. Bu nicel metriklerin rutin radyoloji raporlarına entegre edilmesi, ürologlar için daha objektif ve güvenilir bir karar destek mekanizması oluşturacaktır.

KAYNAKÇA

Barrett, T., Turkbey, B., & Choyke, P. L. (2015). PI-RADS version 2: what you need to know. *Clinical Radiology*, 70(11), 1165-1176.

Bochner, B. H., & Hricak, H. (2016). Problem of "insignificant" prostate cancer and the role of imaging. *Journal of Clinical Oncology*, 34(36), 4309-4311.

Boesen, L., Chabanova, E., Logager, V., Balslev, I., Mikines, K., & Thomsen, H. S. (2015). Apparent diffusion coefficient ratio: a potential new biomarker for aggressive prostate cancer functional imaging. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 42(4), 1048-1055.

De Cobelli, F., Ravelli, S., Esposito, A., Belloni, M., Giganti, F., et al. (2015). Apparent diffusion coefficient value and ratio as noninvasive biomarkers for prostate cancer characterization: correlation with pathological findings. *American Journal of Roentgenology*, 204(3), 550-557.

Hambrock, T., Somford, D. M., Huisman, H. J., van Oort, I. M., Witjes, J. A., et al. (2011). Relationship between apparent diffusion coefficients at 3.0-T MR imaging and Gleason grade in peripheral zone prostate cancer. *Radiology*, 259(2), 453-461.

Kasivisvanathan, V., Rannikko, A. S., Borghi, M., Panebianco, V., Mynderse, L. A., et al. (2018). MRI-Targeted or Standard Biopsy for Prostate-Cancer Diagnosis. *New England Journal of Medicine*, 378(19), 1767-1777.

Mottet, N., van den Bergh, R. C. N., Briers, E., Van den Broeck, T., Cumberbatch, M. G., et al. (2021). EAU-EANM-ESTRO-ESUR-SIOG Guidelines on Prostate Cancer-2020 Update. Part 1: Screening, Diagnosis, and Local Treatment with Curative Intent. *European Urology*, 79(2), 243-262.

Rosenkrantz, A. B., Ginocchio, L. A., Cornfeld, D., Froemming, A. T., Gupta, R. T., et al. (2015). Interobserver Reproducibility of the PI-RADS Version 2 Lexicon: A Multicenter Study of Six Experienced Prostate Radiologists. *Radiology*, 277(2), 479-492.

Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., et al. (2021). Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209-249.

Turkbey, B., Rosenkrantz, A. B., Haider, M. A., Padhani, A. R., Villeirs, G., et al. (2019). Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2.1: 2019 Update of Prostate Imaging Reporting and Data System Version 2. *European Urology*, 76(3), 340-351.

Woznicki, P., Westhoff, N., Huber, T., Riffel, P., Froelich, M. F., et al. (2020). Multiparametric MRI for prostate cancer characterization: combined use of radiomics model with PI-RADS and clinical parameters. *Cancers*, 12(7), 1767.

BÖLÜM 2

KORONER BT ANJİYOĞRAFİNİN RADYOLOJİK TEKNİK STANDARTLARI, KLİNİK KULLANIMI VE YÖNETİM PROTOKOLLERİ

MUSTAFA FATİH ERKOC¹

¹ Prof. Dr, Yozgat Bozok Üniversitesi Tıp Fakültesi, Radyoloji AD, Orcid: 0000-0002-6266-5177

Giriş

Kardiyak Bilgisayarlı Tomografi (KBT), Koroner Arter Hastalığının (KAH) teşhisi ve yönetiminde kritik öneme sahip, hızla gelişen non-invaziv bir görüntüleme yöntemidir. KBT'nin klinik uygulaması, temel olarak iki farklı klinik araç etrafında şekillenmiştir: Koroner Arter Kalsiyum (KAP) Skorlaması (CAC) ve Koroner BT Anjiyografi (CCTA). Bu iki modalite arasındaki teknoloji, risk profili ve klinik fayda açısından var olan temel farklılıkları kavramak, hem kaynakların uygun tahsisi hem de optimal hasta bakımı için büyük önem taşımaktadır (Abadi,2011:152).

KAP Skorlaması öncelikli olarak bir tarama aracı işlevi görür. Bu kontrastsız ve düşük dozlu inceleme, koroner arterlerdeki kalsifiye aterosklerotik plağın yoğunluğunu ve hacmini ölçer. Elde edilen Agatston skoru, gelecekteki miyokard enfarktüsü gibi kardiyovasküler olayları yüksek oranda öngören toplam kalsifiye plak yükünün kantitatif bir ölçüsünü sağlar. KAP testi, genellikle 40 yaşın üzerindeki, KAH açısından orta riskli kabul edilen asemptomatik bireyler için endikedir. Negatif bir skor, minimum plak birikimi ve takip eden yıllarda KAH gelişimi için düşük bir risk anlamına gelir.

Buna karşın CCTA, koroner arter lümeninin ve duvar morfolojisinin ayrıntılı bir şekilde görselleştirilmesi gerektiğinde başvuru keskin bir tanı aracıdır. CCTA, iyotlu kontrast maddenin damar içine uygulanmasını gerektirir ve KAP skorlamasına kıyasla daha yüksek düzeyde radyasyon kullanır. Bu gelişmiş görüntüleme detayı, sadece kalsifiye plakları değil, aynı zamanda kalsifiye olmayan (yumuşak) plakların da belirlenmesine ve karakterizasyonuna, dolayısıyla lümendeki daralmanın veya stenozun hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. KAP skorlaması hastalığın varlığını ima ederken, CCTA hastalığın kapsamlı, detaylı bir resmini sunarak klinisyenlerin arterlerdeki

tıkanıklığı kesin olarak görmelerini sağlar. Bu nedenle, KAP skorlamasını popülasyon riskini tahmin etme aracı olarak, CCTA'yı ise bireysel tanı aracı olarak konumlandıran kritik ayırım, klinik karar verme süreçlerine yön vermelidir. Yeterli olduğu durumlarda düşük riskli KAP skorlaması yerine CCTA kullanılması, hastanın gereksiz radyasyon ve kontrast ilişkili morbidite risklerine maruz bırakılması anlamına gelir (Achenbach, 2009:121).

Bölüm I: Yüksek Kaliteli CCTA Eldesi İçin Teknik Gereklilikler

Tanısal bir CCTA'nın başarıyla gerçekleştirilmesi, kontrast enjeksiyonunu takiben koroner arterlerdeki maksimum kontrastlanmaya denk getirilen, hareketsiz hacimsel bir veri setinin elde edilmesine bağlıdır. Görüntü kalitesi, teknik faktörler ve hastanın uyumu gibi birçok faktörün birleşiminden oluşan karmaşık bir parametredir.

Yüksek kalitede bir yeniden yapılandırma, mekansal çözünürlüğün X, Y ve Z yönlerinde tutarlı olduğu izotropik veri setlerinin elde edilmesini gerektirir. Günümüzde ticari olarak mevcut en iyi izotropik çözünürlük yaklaşık 0,4 x 0,4 x 0,4 mm civarındadır. Bu fiziksel mekansal çözünürlük sınırı, CCTA'nın tanısal faydası için bir bağlam sağlar: Test, hastalığı etkili bir şekilde dışlayarak yüksek Negatif Öngörü Değerine (NPV) sahip olma konusunda mükemmeldir. Ancak bu kısıtlama, orta düzeydeki darlıkların (%40–70) fizyolojik önemini kesin olarak karakterize etme yeteneğini sınırlar.

CCTA'da temel prensip, hareketsiz bir hacimsel veri setini, koroner arterin tepe kontrastlanmasıyla eş zamanlı olarak elde etmektir. Koroner arterler küçük kalibreye sahip olduğundan ve kalp döngüsü boyunca hareket ettiğinden, CCTA, diğer BT incelemelerinden daha fazla teknik zorluk içermektedir. Görüntü kalitesi, gürültü, vasküler kontrastlanma ve hareket artefaktları ile

yakından ilişkilidir. Yeterli vasküler kontrastlanmanın sağlanması (aortada 400 HU'dan fazla), görüntü yorumlanabilirliği için esastır. Görüntü gürültüsünü azaltmak için teknik parametrelerin optimize edilmesi kritik öneme sahiptir (Budoff,2008:148)

Mekansal ve Zamansal Çözünürlük: Zamansal çözünürlük, en az hareketin olduğu fazda, koroner arterlerin hareketinin dondurulması için gereken minimum süreyi ifade eder. Bu, gantry dönüş süresinin yarısı kadardır. Yüksek zamansal çözünürlük için hızlı gantry dönüş hızı zorunludur. Mekansal çözünürlük ise BT tarayıcının yüksek kontrastlı anatomik detayları ayırt etme yeteneğini tanımlar ve voksel boyutuyla yakından ilişkilidir. İzotropik veri setleri (0,4 x 0,4 x 0,4 mm gibi), çok düzlemlı rekonstrüksiyonlara olanak tanır.

Artefaktların Yönetimi: CCTA'da yaygın olarak karşılaşılan artefaktlar arasında bulanıklık (yüksek kalp hızı veya uygun olmayan faz seçimi nedeniyle hareket), merdiven basamağı artefaktları (aritmi veya kalp hızı değişkenliği nedeniyle faz kayması), parlamaya (blooming) artefaktları (kalsifikasyon veya stentler nedeniyle yüksek atenüasyonlu nesnelerin gerçek boyutundan daha büyük görünmesi) ve demet sertleşmesi artefaktları (yüksek iyot konsantrasyonu veya metalik implantlar nedeniyle koyu bantlar) bulunur. Bu artefaktlar, özellikle yoğun koroner kalsifikasyon varlığında tanısal yorumlamayı sınırlayabilir. Örneğin, koroner kalsifikasyonlar ve stentler, hem demet sertleşmesi hem de parlamaya neden olarak lümenin görünürlüğünü olumsuz etkiler.

Yazılım ve Donanım Çözümleri: Teknik çözümler arasında, özellikle in-stent lümeninin daha iyi görünürlüğünü sağlamak için yüksek uzamsal çözünürlüklü yeniden yapılandırma algoritmaları ve görüntü gürültüsünü azaltmak için iteratif yeniden yapılandırma teknikleri bulunur. Bu algoritmalar, parlamayı azaltarak stent açıklığının değerlendirilmesine yardımcı olur (Celik,2014:82)

Bölüm 2. Radyasyon Yönetimi ve Doz Azaltma Stratejileri

CCTA'da radyasyon maruziyeti protokole bağlıdır ve ALARA (Makul Ölçüde En Düşük Seviyede) ilkesi altında yönetilmelidir. Tanısal doğruluğu en üst düzeye çıkarırken, hastaya verilen dozun en aza indirilmesi esastır. Tanısal olmayan bir inceleme, hastayı yararsız radyasyona maruz bırakır.

Radyasyon Azaltma Teknikleri ve Sinerji: Radyasyon dozunda önemli tasarruflar, birden fazla tekniğin sinerjik uygulamasıyla elde edilir:

Prospective (Adım-ve-Çekim) Kapılama: Bu yöntem, veri toplamanın kalp döngüsünün önceden belirlenmiş, hareketsiz bir fazıyla (genellikle mid-diyastol) sınırlandırılmasını içerir. Bu, radyasyon dozunu geriye dönük kapılamaya kıyasla %77–80 oranında önemli ölçüde azaltır ve anatomik görselleştirme için tanısal doğruluktan ödün vermez (Cury,2016:1458). Fonksiyonel bilgi gerektirmeyen hastaların çoğunluğu için tercih edilen protokol budur.

Retrospective Kapılama: Tüm kalp döngüsü boyunca sürekli veri toplama içerir ve ejeksiyon fraksiyonu hesaplaması gibi kapsamlı fonksiyonel değerlendirmeye izin verirken, önemli ölçüde daha yüksek radyasyon maruziyetine yol açar.

Düşük Kilovolt Tepe Değeri (kVp): Tüp voltajının 120 kVp'den 100 kVp'ye düşürülmesi, radyasyon dozunu gating yönteminden bağımsız olarak %40–42 oranında azaltabilir, çünkü doz kVp'nin yaklaşık karesiyle orantılıdır. Düşük kVp (100) ile prospektif tetikleme birleştirilmesi, tahmini %90 oranında radyasyon dozu azalması sağlayabilir. Düşük kVp ayrıca iyotun daha yüksek atenüasyonuna izin verir, ancak görüntü gürültüsünü artırdığı için obez olmayan (VKİ <30 kg/m²) hastalarda öncelikli olarak düşünülmelidir.

Tüp Akımı (mA) Ölçeklendirmesi: Tüp akımı, hastanın boyutuna göre dikkatlice ayarlanmalıdır. Daha zayıf hastalar için mA'nın düşürülmesi, gereksiz radyasyondan kaçınmak için kritik öneme sahiptir.

Z-Eksen Kapsam Sınırlaması: Tarama uzunluğu, anatomik ilgi alanıyla kesin bir şekilde sınırlandırılmalıdır, genellikle karinadan kalbin alt sınırına kadar 12–14 cm'lik bir alanı kapsar (Davenport,2013:719). CCTA'dan hemen önce bir kalsiyum skoru taraması yapmak, koroner arterlerin kesin yerini belirleyerek tarama uzunluğunun daha da azaltılmasına ve böylece dozun %30'a kadar düşürülmesine olanak tanır.

Organa Özgü Modülasyon: Yeni teknolojiler, özellikle kadın memesi gibi doza duyarlı organlara verilen radyasyon dozunu azaltmak için tüp akımını organda geçiş sırasında düşürür. Bismut koruması gibi yöntemler de düşünülse de, görüntü gürültüsü üzerindeki olumsuz etkileri tartışmalıdır.

Bölüm 3. Hasta Hazırlığı ve Farmakolojik Optimizasyon Protokolleri

Optimal görüntü kalitesi, kalp hızı ve damar çapının farmakolojik kontrolüne bağlıdır. Hazırlık talimatlarına uyulmaması, yetersiz görüntülere, potansiyel olarak tekrar taramaya veya invaziv prosedürlere gereksiz risk ve maliyetle yol açabilir.

Görüntü Netliği İçin Farmakolojik Optimizasyon yöntemleri şu şekilde özetlenebilir:

Hız Kontrolü (Beta-blokerler): Kalp hızını yavaşlatmak, görüntü elde etme penceresi sırasında kardiyak hareket artefaktını azaltmak ve daha net görüntüler elde etmek amacıyla genellikle CCTA öncesinde beta-bloker (örneğin metoprolol, 5 mg'lık artışlarla toplam 15–25 mg) uygulanır. İdeal kalp hızı hedefi

genellikle dakikada 50 ila 59 atım arasındadır. Beta-blokerlere karşı yan etki yaşamış hastaların sağlık ekibine bilgi vermesi gerekir.

Vazodilatasyon (Nitroglicerine): Koroner arterlerin genişlemesini (vazodilatasyon) sağlamak için tipik olarak nitroglicerine (0,4 mg dil altı) verilir. Bu, özellikle daha küçük, distal dallarda damar lümeninin görselleştirilmesini iyileştirir ve radyoloğun arterleri daha kolay görmesine yardımcı olur.

Fosfodiesteraz-5 (PDE5) İnhibitörlerinin Kısıtlanması: Hastaların, CCTA'dan en az 72 saat önce PDE5 inhibitörlerini (örneğin Viagra, Cialis) almayı bırakmaları zorunlu bir güvenlik önlemidir. Bu, gerekli nitroglicerine uygulamasıyla birleştğinde ortaya çıkabilecek ciddi sinerjik vazodilatör etkiler ve yaşamı tehdit eden hipotansif atakları önler (Douglas,2015:372).

Kafeinden Kaçınma: Kafein, kalp hızını yükselttiği ve tanı için gerekli net görüntülerin elde edilmesini engellediği için, taramadan 12 ila 24 saat önce tüm kafeinli içecek ve yiyeceklerden (kahve, çay, enerji içecekleri, çikolata gibi) kaçınılması zorunludur.

Oruç ve Hidrasyon: Hastalardan genellikle testten en az 8 saat önce (bazı protokoller 4 saat önermektedir) yiyecek alımını kesmeleri istenir, ancak su içmelerine genellikle izin verilir. Testten önceki gün bol su içilmesi de tavsiye edilir.

Böbrek Fonksiyonunun Zorunlu Kontrolü: İyotlu kontrast maddeye bağlı nefrotoksisite riski nedeniyle, böbrek fonksiyonunu (kreatinin ve Tahmini Glomerüler Filtrasyon Hızı, eGFR) kontrol etmek için yakın zamanda yapılmış bir kan testi zorunludur.

Bölüm 4. Kontrast Madde Risk Yönetimi

CCTA'da birincil sorumluluk, hastayı iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakmayı en aza indirmek ve damar içi iyotlu kontrast maddelerle ilişkili doğal riskleri yönetmektir.

İyotlu kontrast maddeler, böbrek fonksiyonu başta olmak üzere riskler taşır. Kontrast, akut böbrek hasarına veya böbrek yetmezliğine neden olabilir. Ayrıca, kontrastın ozmotik yükü nedeniyle kardiyak yüklenmeye katkıda bulunma potansiyeli vardır, bu da konjestif kalp yetmezliği veya pulmoner hipertansiyon semptomlarını başlatabilir veya kötüleştirebilir. Bu nedenle, kapsamlı bir prosedür öncesi risk değerlendirmesi sadece renal fonksiyonu (eGFR) değil, aynı zamanda hastanın mevcut kardiyak fonksiyonel durumunu da (örneğin sol ventrikül ejeksiyon fraksiyonu) içermelidir.

Kontrast maddeye bağlı nefropatiyi (CIN) önlemek için standart klinik kılavuzlar katı eGFR eşiklerini belirler:

- $GFR > 45 \text{ mL}/\text{min}/1.73 \text{ m}^2$: Kontrast uygulaması genellikle güvenli kabul edilir.
- $GFR 30-45 \text{ mL}/\text{min}/1.73 \text{ m}^2$: Bu hastalar orta riskli olarak sınıflandırılır. Kontrast uygulaması tarama öncesinde radyolog ile konsültasyon gerektirir. Eğer $GFR < 45 \text{ mL}/\text{min}/1.73 \text{ m}^2$ altındaysa, laboratuvar sonuçları BT taramasıyla aynı gün alınmalı ve gözden geçirilmelidir.
- $GFR < 30 \text{ mL}/\text{min}/1.73 \text{ m}^2$: Akut böbrek hasarı riski yüksek olduğundan, kontrast uygulaması genellikle kontrendikedir. Kontrastın mutlak gerekli görüldüğü durumlarda (hasta diyalizde ve anürik ise veya tanısız fayda riske ağır basıyorsa), intravenöz hacim genişletme tedavisi uygulanarak ve durum belgelenerek ilerlenmelidir.

Kontrast kaynaklı renal riskin yönetimi, sevk eden klinisyen ve radyoloji ekibi arasında sorunsuz koordinasyon gerektiren disiplinler arası bir sorumluluktur.

Alerjik Reaksiyon Profilaksisi: Daha önce damar içi iyotlu kontrasta karşı alerjik tipte bir reaksiyon öyküsü, sonraki bir reaksiyon için en önemli risk faktörüdür ve premedikasyon yapılmadığı takdirde tekrarlama oranları %35'e kadar ulaşabilir.

- Önceki Hafif Reaksiyon Öyküsü: Hafif alerjik tip reaksiyon (sınırlı ürtiker, burun tıkanıklığı) öyküsü olan hastalarda, gelecekte orta veya şiddetli reaksiyon geliştirme riski çok düşüktür (<%1). Bu hastalarda ya hiç premedikasyon yapılmaması ya da sadece bir antihistamin (örneğin setirizin) verilmesi düşünülebilir.
- Önceki Orta, Şiddetli veya Bilinmeyen Şiddette Reaksiyon Öyküsü: Bir kortikosteroid (örneğin metilprednizolon) ve bir antihistamin içeren standart bir oral premedikasyon profilaksi protokolü şiddetle düşünülmelidir. Bu protokol tipik olarak, beklenen kontrast uygulamasından 12 ve 2 saat önce oral kortikosteroid verilmesini içerir. Acil vakalar için hızlandırılmış intravenöz protokoller mevcuttur. Daha önce şiddetli reaksiyon öyküsü olan hastaların, daha yüksek düzeyde bakıma hızlı erişim sağlayan tesislerde görüntülenmesi tercih edilir.

Bölüm 5. Klinik Endikasyonlar ve Tanı Yolları

CCTA, yalnızca risk değerlendirmesiyle çözülemeyecek, ayrıntılı anatomik görselleştirme gerektiren durumlar için ayrılmıştır. CCTA, tipik olarak, altta yatan KAH'yi düşündürebilecek göğüs ağrısı veya eforla nefes darlığı gibi semptomlar yaşayan bireyler için önerilir.

Ayrıca, hipertansiyon, yüksek kolesterol, diyabet, güçlü aile öyküsü veya önceki KAP skoru sonuçları yüksek riskli çıkan hastalar gibi çoklu yüksek risk faktörlerine sahip bireyler, plak varlığını, yaygınlığını ve tipini (kalsifiye veya yumuşak) belirlemek için doğrudan CCTA'ya yönlendirilebilir.

CCTA'nın tıkanıklıkları ve plak birikimini non-invaziv olarak tespit etme yeteneği, onu İnvaziv Koroner Anjiyografi (ICA) için bir kapı bekçisi olarak konumlandırır. Bu, acil revaskülarizasyon gerektirmeyen hastalarda kateter tabanlı prosedürlere olan ihtiyacı azaltır, hem prosedürel riski hem de ilişkili sağlık maliyetlerini düşürür (Driessen, 2019:161).

Non-Koroner ve Özel Uygulamalar: CCTA'nın koroner arterlere ek olarak değerdendirdiği diğer kardiyak patolojiler de mevcuttur:

- Kardiyak Morfoloji ve Fonksiyon: CCTA; kalp kapakçığı sorunları, koroner sistemin ötesindeki arter tıkanıklıkları, kalp tümörleri veya kitleleri hakkında bilgi sağlayabilir ve kalbin pompalama fonksiyonunu değerdendirmek için kullanılabilir.
- Konjenital Kalp Hastalığı (KKH): BT, hem çocuklarda hem de yetişkinlerde birçok KKH formunu doğru bir şekilde tasvir eder. Özellikle ekstrakardiyak vasküler anomalilerin değerdendirilmesi ve postoperatif komplikasyonların takibi için değerdilidir. KKH için görüntüleme protokolü, şüpheli defekte ve hastanın yaşına göre uyarlanmalıdır. Özellikle genç hastalarda, EKG ile senkronize olmayan BT, anatomik değerdendirme için yeterli kabul edilebilir, çünkü EKG ile kapılamalı BT'den elde edilen detaylı fonksiyonel bilginin faydası, ortaya çıkan artan radyasyon maruziyetini haklı çıkarmayabilir.

Bölüm 6. Yorumlama Standardizasyonu: Koroner Arter Hastalığı Raporlama ve Veri Sistemi (CAD-RADS)

CCTA sonuçlarının tutarlı yorumlanmasını sağlamak ve sevk eden klinisyenlerle iletişimi kolaylaştırmak amacıyla, Koroner Arter Hastalığı Raporlama ve Veri Sistemi (CAD-RADS)

standardizasyonu geliştirilmiştir. CAD-RADS, koroner stenoz şiddetini ve plak yükünü standart bir dille ifade etmeyi amaçlar.

CAD-RADS Çerçevesi: Raporlama, çapı 1,5 mm'yi aşan tüm koroner arterlerin değerlendirilmesini gerektirir. Nihai CAD-RADS sınıflandırması, hastanın belgelenen en şiddetli koroner bulgusu tarafından belirlenir ve CAD-RADS 0 (plak yokluğu) ile CAD-RADS 5 (tam tıkanıklık) arasında değişir.

- CAD-RADS 0: Plak veya stenoz yokluğu. Düşük risk.
- CAD-RADS 1 (Non-obstrüktif): Stenoz <%25. Plak mevcut ancak darlığa neden olmuyor. Yaşam tarzı değişikliği ve agresif risk faktörü yönetimi önerilir.
- CAD-RADS 2 (Hafif Stenoz): Stenoz %25 ila %49. Standart tıbbi yönetim ve risk faktörü kontrolü.
- CAD-RADS 3 (Orta Stenoz): Stenoz %50 ila %69. Anatomik sınıflama bu aralıkta iskemiye öngörmek için güvenilir olmadığından, revaskülarizasyona rehberlik etmek için CT-FFR gibi fonksiyonel değerlendirme gereklidir.
- CAD-RADS 4A (Ciddi Stenoz): Tek veya iki damarda %70 ila %99 ciddi darlık. Yüksek riskli hastalık; invaziv anjiyografi ve revaskülarizasyon düşünülür.
- CAD-RADS 4B (Yüksek Riskli Anatomi): Sol Ana Koroner Arterde (LM) %50'den fazla darlık VEYA üç damarda obstrüktif hastalık (%70'ten fazla darlık). Çok Yüksek Riskli durum; agresif ve sıklıkla acil invaziv yönetim gereklidir.
- CAD-RADS 5: Tam tıkanıklık (%100). Akut koroner sendrom olarak yönetilir; acil invaziv yönetim gereklidir.

CAD-RADS sistemi, özellikle orta düzey anatomik darlık (CAD-RADS 3) için klinisyenlere yol göstermede kritik bir rol

oyunar ve bu hastaların lezyonun fizyolojik önemini belirlemek için fonksiyonel değerlendirmeye yönlendirilmesini zorunlu kılar.

CAD-RADS Değiştiricileri (Modifiers)

CAD-RADS, temel sınıflandırmaya ek bilgi sağlamak için tek harfli değiştiricilerin eklenmesine izin verir.

- N (Non-diagnostik): Tüm segmentler (>1,5 mm) tanısal olarak değerlendirilemediğinde kullanılır (örneğin hareket artefaktları nedeniyle). Eğer en az bir segmentte %50 ve üzeri darlık varsa, bu durum CAD-RADS 3/N, 4/N veya 5/N olarak belirtilir; aksi takdirde, CAD-RADS N kullanılır.
- HRP (Yüksek Riskli Plak): Eskiden "V-Hassas Plak" olarak bilinen bu değiştirici, bir lezyonda düşük atenüasyonlu plak, pozitif yeniden şekillenme, benekli kalsifikasyon veya peçete halkası işareti gibi iki veya daha fazla yüksek riskli plak özelliğinin varlığını belirtir.
- S (Stent): Koroner arterde stent varlığını belirtir. Stent açıklığı ve in-stent restenoz durumu değerlendirilir.
- G (Graft): Koroner arter baypas greftlerinin varlığını belirtir. Baypas edilmiş bir stenoz, CAD-RADS stenoz sınıflandırması için dikkate alınmaz; sadece greftteki veya diğer doğal koronerlerdeki yeni lezyonlar dikkate alınır.
- I (İskemi): CT-FFR veya stres CTP sonuçlarının iskemiye gösterip göstermediğini belirtir (I+ iskemiye gösterir).

Bölüm 7. Fonksiyonel Değerlendirme: Bilgisayarlı Tomografi Kaynaklı Fraksiyonel Akış Rezervi (CT-FFR)

Saf anatomik değerlendirmenin (CCTA) sınırlamaları, özellikle orta dereceli darlıklar için fizyolojik önemi belirlemek üzere non-invaziv araçların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır.

CT-FFR, bir CCTA taramasından elde edilen anatomik verilere akışkanlar dinamiği modellemesi uygulayan hesaplamalı non-invaziv bir yöntemdir. Bu teknik, invaziv FFR ölçümleriyle yüksek korelasyon gösteren tahmini bir fraksiyonel akış rezervi değeri sağlar. CT-FFR, özellikle anatomik bulguların tek başına revaskülarizasyon kararlarına rehberlik etmek için yetersiz olduğu orta dereceli darlıkların (%40–90) değerlendirilmesi için endikedir.

FFR-CT'nin standart CCTA'ya eklenmesi, tanısal doğruluğu önemli ölçüde artırır. Klinik çalışmalar, FFR-CT'nin eklenmesiyle yanlış pozitif anatomik bulguların %68'e kadarının doğru negatif olarak yeniden sınıflandırıldığını göstermiştir. Bu yetenek, klinik güvenliği tehlikeye atmadan gereksiz invaziv anjiyografi gerektiren hasta sayısını önemli ölçüde azaltır.

Ekonomik Fayda ve Klinik Sonuçlar

FFR-CT kullanımının maliyet etkinliği ve klinik sonuçlar açısından önemli avantajları olduğu gösterilmiştir. Japonya'da yapılan bir maliyet analizi, FFR-CT stratejisinin, invaziv koroner anjiyografiye (ICA) dayalı stratejilere kıyasla, 1 yıl içinde %32 daha düşük maliyet ve %19 daha az kardiyak olay ile sonuçlanabileceğini öngörmüştür. FFR-CT, özellikle orta düzey stenozlar için kateter laboratuvarına giden kapıyı yönetme potansiyeline sahiptir, gereksiz ICA prosedürlerinin sayısını azaltarak maliyet tasarrufu sağlar ve hasta sonuçlarını iyileştirir.

FFR-CT hesaplama modeli bazı teknik ve anatomik faktörlerle sınırlıdır:

- Artefaktlar: Yoğun koroner kalsifikasyonlar ve yüksek vücut kitle indeksi ($VKİ > 35$) gibi ciddi artefaktlar, hesaplamalı akış dinamiklerini bozabilir ve FFR-CT'nin hesaplanmasını uygunsuz hale getirebilir.

•Anatomik Kısıtlamalar: FFR-CT için kontrendikasyonlar arasında küçük damar çapları (<1,8 mm), 3,0 mm veya daha küçük metalik stentlerin varlığı, daha önce geçirilmiş koroner arter baypas greft cerrahisi ve kompleks konjenital kalp hastalığı bulunur.

•Akut Olaylar: Teknik, yakın zamanda miyokard enfarktüsü geçirmiş (son 30 gün içinde) hastalar için doğrulanmamıştır.

Bölüm 8. Karşılaştırmalı Etkinlik ve Gelişen Yönelimler

CCTA, non-invaziv kardiyak görüntüleme yöntemlerinin sadece bir ayağını oluşturur. Her modalitenin benzersiz güçlü yönleri, onun klinik rolünü belirler.

- CCTA vs. İnvaziv Koroner Anjiyografi (ICA): CCTA ve CT-FFR, non-invaziv tanı yöntemleridir. ICA ise, terapötik müdahale için altın standart olmaya devam eden, kateter bazlı bir özel röntgen testidir. FFR-CT'nin bir seçim aracı olarak etkinliği, revaskülarizasyon gerektirmeyen hastaların ICA geçirme oranını önemli ölçüde düşürür.
- Kardiyak BT vs. Kardiyak Manyetik Rezonans (KMR): KMR, iyonlaştırıcı radyasyondan kaçınarak radyo dalgalarını ve mıknatısları kullanır. KMR; yumuşak dokuyu değerlendirmede mükemmeldir ve kardiyak morfoloji, ventriküler geometri, duvar hareketi ve intra-kardiyak akışın oldukça tekrarlanabilir bir şekilde kantifikasyonunu sunar. Miyokard enfarktüsü, inflamasyon ve canlılık gibi miyokardiyal hasarı değerlendirmek için ideal kabul edilir. Bu iki modalite birbirini tamamlar: CCTA anatomik kanalı (arterleri) haritalarken, KMR miyokardın fonksiyonel durumunu ve doku canlılığını karakterize eder.
- Kardiyak BT vs. Ekokardiyografi (Eko): Ekokardiyografi uygun maliyetli, taşınabilir bir yöntemdir ve kalbin pompalama eyleminin ve kan akışı dinamiklerinin

(Doppler) gerçek zamanlı fonksiyonel değerlendirmesini sağlar. Ancak, Eko'nun akustik pencerelere bağımlılığı ve operatör bağımlılığı kısıtlamalar sunar. KBT ve KMR, karmaşıık anatomik veya fonksiyonel değerlendirmelerde bu teknik kısıtlamaların üstesinden gelmek için kullanılır.

Gelişen Yönelimler: Kardiyak BT alanı, teknik protokollerin ileri fonksiyonel analizlerle entegrasyonu sayesinde kardiyovasküler tanının temel bir bileşeni haline gelmiştir. Devam eden randomize kontrollü alışmalar, FFR-CT'nin klinik algoritmalarındaki kanıt tabanını daha da sağlamlaştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimindeki ilerlemeler, otomatik plak karakterizasyonunu iyileştirmeyi ve yoğun kalsifikasyon gibi halihazırda FFR-CT'nin uygulanabilirliğini sınırlayan karmaşıık artefaktların ele alınmasını geliştirmeyi hedeflemektedir. FFR-CT'nin damarın her noktasında ölçülebilme yeteneği, lezyona özgü iskeminin anlaşılmasını iyileştirme potansiyeli sunar. Plak analizi ve FFR-CT değerlerinin birlikte değerlendirilmesi, gelecekteki akut koroner sendrom riskini daha iyi tahmin etmeye yardımcı olabilir.

Bölüm 9. Sonuç

Kardiyak BT, uzmanlaşmış bir araştırma aracından kardiyovasküler tanının temel bir bileşenine dönüşmüştür. Mevcut uygulama standardı, asemptomatik risk sınıflandırması için KAP skorlamasının seçici kullanımını ve semptomatik veya yüksek riskli hastalarda kesin tanısal değerlendirme için CCTA'yı zorunlu kılmaktadır.

Kaynakça/Referances

Abadi & ark.(2011). quantification of breast dose during coronary CT angiography and evaluation of dose reduction strategies. *AJR Am J Roentgenol*. 2011;196:W152–8.

Achenbach & ark.(2009). High-pitch spiral acquisition: a new scan mode for coronary CT angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2009;3:117–121.

Budoff MJ & ark.(2008) Substantial radiation dose reduction in 64-multidetector cardiac computed tomographic angiography by using lower X-ray energy during scanning. *J Am Coll Cardiol*. 2008;51:A148.

Celik O & ark.(2014) Comparison of different strategies of ivabradine premedication for heart rate reduction before coronary computed tomography angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2014;8:77–82.

Cury RC & ark.(2016) The American College of Radiology (ACR) and the North American Society for Cardiovascular Imaging (NASCI). Endorsed by the American College of Cardiology. *J Am Coll Radiol JACR*. 2016;13:1458–1466e9.

Davenport & ark.(2013). Contrast material-induced nephrotoxicity and intravenous low-osmolality iodinated contrast material: risk stratification by using estimated glomerular filtration rate. *Radiology*. 2013;268(3):719-728.

Douglas PS & ark.(2015). Outcomes of anatomical versus functional testing for coronary artery disease. *N Engl J Med*. 2015;372:1291–1300.

Driessen RS & ark.(2019). Comparison of Coronary Computed Tomography Angiography, Fractional Flow Reserve, and Perfusion

Imaging for Ischemia Diagnosis. *J Am Coll Cardiol.*
2019;73(2):161-173.

BÖLÜM 3

YAPAY ZEKA VE MAKİNE ÖĞRENİMİNİN LOMBER DİSK PATOLOJİLERİNDE SEGMENTASYONDAN HASSAS CERRAHİYE ENTEGRASYONUNUN KRİTİK ANALİZİ

MUSTAFA FATİH ERKOC¹

¹ Prof. Dr, Yozgat Bozok Üniversitesi Tıp Fakültesi, Radyoloji AD, Orcid: 0000-0002-6266-5177

Giriş

Omurga bakımında Yapay Zeka (YZ) ve Makine Öğrenimi (ML) teknolojilerinin kullanımı, sadece mevcut klinik iş akışlarını otomatikleştiren bir teknolojik ilerleme olmaktan öte, hastaların tanı, prognostik değerlendirme ve cerrahi yönetimine dair köklü bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Kronik bel ağrısı (lomber ağrı), IVD dejenerasyonu ile yakından ilişkilendirilen ve bireylerin günlük yaşamlarını etkileyen yaygın bir sağlık sorunudur. Bu kapsamlı bölüm, YZ/ML uygulamalarının lomber disk patolojilerinin incelenmesindeki mevcut durumunu, teknik başarımlarını ve bu teknolojilerin klinik uygulamaya güvenli ve genellenebilir entegrasyonuna yönelik stratejik zorlukları, profesör seviyesinde akademik bir derinlikle ele almaktadır.

Omurga patolojileri, tüm tıbbi konsültasyonların önde gelen nedenlerinden biri olup, hastaların %7.6 ila %37'sini etkilemektedir. Lomber bölgedeki dejenerasyon teşhisi için tipik olarak L1/L2, L4/L5 ve L5/S1 gibi spesifik disklerin analiz edilmesi gerekmektedir. Bu manuel analiz süreci zaman alıcı ve zahmetlidir. Derin Öğrenme (DL) ve özellikle Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN'ler), tıbbi görüntülemelerde ilerlemeler sağlamış ve uzman radyologların performansına yaklaşan veya bu performansı aşan tanısal doğruluklara ulaşmıştır.

Bölüm I: Anatomik Yapıların Derin Öğrenme ile Yüksek Hassasiyetli Segmentasyonu

Segmentasyon, omurilik, IVD'ler ve spinal kanal gibi anatomik yapıların piksel düzeyinde doğru bir şekilde ayrılmasını sağlayan, bilgisayar destekli tanının (CAD) temel ön adımıdır. DL modelleri arasında U-Net ve varyantları, atlama bağlantıları (skip-connections) sayesinde düşük seviyeli ve yüksek seviyeli özellikleri birleştirmedeki etkinliği nedeniyle tıbbi görüntü

segmentasyonu için en sağlam mimariler olarak kabul edilmektedir. (Kumar R,2025:224).

1.1. Segmentasyon Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Çok sınıflı (20 etiketli) omurga MRG veri setleri üzerinde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, DeepLabv3+ gibi omurga (backbone) kullanan modeller genellikle U-Net ailesini geride bırakmıştır. DeepLabv3+, %87.55 Dice katsayısı ve %81.8 mIOU ile en iyi performansı sergilemiş, onu %87.38 Dice katsayısı ve %81.79 mIOU ile PSPNet takip etmiştir. Buna karşın, U-Net'in performansı %79.87 Dice ve %74.02 mIOU seviyesinde kalmıştır. Bu bulgular, çok sınıflı tıbbi segmentasyon görevlerinde, çok ölçekli ve zengin bağlamsal bilgiyi yakalamaya odaklanan mimarilerin üstünlüğünü göstermektedir (Baklacı Ş, 2025:18).

1.2. Spesifik Disk Segmentasyonunda Yüksek Hassasiyet Elde Etme Stratejileri

YZ modellerinin karşılaştığı temel zorluk, birbirine oldukça benzer ve önemsiz IVD hedeflerini, bir dizi benzer yapı arasından ayırt etmektir. Özellikle L1/L2 diski, komşu disklere olan yüksek benzerliği nedeniyle segmentasyonu daha zorlu bir alan olarak kabul edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda, U-Net ve MultiResUNet gibi popüler modellerin bu spesifik disk segmentasyonunda doğruluklarının sırasıyla %76.6 ve %83.4 olduğu, ortalama IoU değerinin ise %72.3'ü aşamadığı görülmüştür. Bu hatalar, komşu disklerin yanlışlıkla hedeflenen disk olarak segmente edilmesini içermektedir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, MultiResUNet modellerini ve belirginlik haritalarını (saliency maps) kullanan yenilikçi bir yaklaşım önerilmiştir. Bu metodoloji şunları içerir:

Alt Görüntü Kırpma (Sub-Image Cropping): Yöntem, hedef disklerin (L4/L5 ve L5/S1) merkez noktalarını vurgulayan

belirginlik haritalarını tahmin etmek için MultiResUNet kullanır. Orijinal görüntünün (512×512) dörtte biri boyutunda (256×256) alt görüntüler kırılır, bu da işlenen veri miktarını azaltır, hesaplama süresini hızlandırır ve potansiyel olarak tahmin doğruluğunu artırır.

Veri Zenginleştirmeli Segmentasyon (Data-Augmented Segmentation): Üst hedef disk (L1/L2) için, alt disklerden elde edilen konum bilgilerinden mesafe haritaları (distance maps) hesaplanır. Bu mesafe haritaları, veri zenginleştirme amacıyla orijinal görüntü ile birleştirilir ve MultiResUNet bu birleştirilmiş veriyi kullanarak kalan hedef diski segmente eder.

Bu entegre metodoloji, spesifik intervertebral disklerin segmentasyon doğruluğunu 97.7 ± 1.6 seviyesine (yaklaşık %98) yükseltmiştir ve ortalama IoU değerini 77.0 ± 0.4 seviyesinde tutmuştur. Bu, MultiResUNet'e kıyasla doğrulukta yaklaşık %15'lik bir artış anlamına gelmektedir (Zhou N,2022.13).

Bölüm II: YZ Destekli Nicel Tanı ve Patoloji Değerlendirmesi

YZ, segmentasyonun ötesinde, lomber disk patolojilerinin nicel teşhisini ve derecelendirilmesini otomatikleştirerek radyolojik raporlamada standartlaşmayı ve verimliliği artırmaktadır. YZ, segmentasyonun ötesinde, lomber disk patolojilerinin nicel teşhisini ve derecelendirilmesini otomatikleştirerek radyolojik raporlamada standartlaşmayı ve verimliliği artırmaktadır.

2.1. Disk Dejenerasyonunun Otomatik Derecelendirilmesi

YZ, Pfirrmann derecelendirmesi gibi subjektif skarlama sistemlerini otomatikleştirme yeteneği sunmaktadır. YOLOv8x mimarisi kullanılarak geliştirilen SpineScan adlı CNN tabanlı bir model, lomber MRG'lerin otomatik olarak notasyonunu yapmayı ve Pfirrmann derecelendirmesini eş zamanlı olarak tespit etmeyi ve sınıflandırmayı amaçlamıştır (Wang, 2024: 18). Bu model, lomber

seviyeye bağılı olarak %78 ile %82 arasında bir tahmine dayalı doğruluk skoruna ulaşmıştır. En yüksek performans, kontrastın daha belirgin olduğu Grade IV diskler için ($mAP_{50} = 0.872$) gözlemlenirken, Grade V disklerde (yüksek dejenerasyon ve düşük kontrast nedeniyle) performans daha düşüktür ($mAP_{50-95} = 0.525$).

2.2. Lomber Spinal Stenoz (LSS) Tanısında Kritik Kısıtlamalar

YZ, LSS teşhisinde genel olarak değerli bir araç olsa da, patolojinin şiddetine göre tanısal performansta önemli farklılıklar göstermektedir. Bir sistematik inceleme ve meta-analiz, YZ'nin LSS tanısındaki etkinliğini değerlendirmiştir. İkiye bölünmüş (dichotomous) görevlerde (stenoz var/yok) genel doğruluk %88.5 iken: Ciddi LSS için doğruluk %86.0 (95% CI: 0.733–0.954). Nöral foramen stenozu için genel doğruluk %89.3 (95% CI: 0.851–0.928)dir.

Ancak, YZ'nin en büyük klinik zorluğu, daha az belirgin patolojileri güvenilir bir şekilde ayırt etme yeteneğinde ortaya çıkmaktadır: Hafif LSS için doğruluk %50.3 (95% CI: 0.391–0.614), Orta LSS için doğruluk %51.2 (95% CI: 0.336–0.688) dir (Cheng,2024:24).

Bu kritik düşüş, YZ'nin erken veya orta düzeydeki ince patolojileri ayırt etme yeteneğinin kısıtlı olduğunu ve bunun harici validasyon gerekliliğini artırdığını vurgulamaktadır.

2.3. Radyomik ve Ticari Uygulamalar

YZ'nin tanısal rolünü güçlendiren bir gelişme de radyomik alanının kullanılmasıdır. Radyomik, rutin MRG'de algılanamayan ince dokusal heterojenliği nicelendirerek disk dejenerasyonu derecelendirmesini standartlaştırabilir. CNN'ler, disk herniasyonlarını ve dejenerasyonları eş zamanlı tespit edip

derecelendirerek (Cohen's kappa ≈ 0.84) insan okuyucularına rakip performans sergilemektedir.

Piyasada, radyologların iş akışını destekleyen ticari çözümler mevcuttur. CoLumbo, radyologlara MRG okuma ve raporlama süreçlerinde yardımcı olmakta, otomatik segmentasyon ve ölçümler sunarak raporlama süresini ve ihmal hatalarını azaltmayı hedeflemektedir. MSKai Spine Imaging Software da FDA 510(k) izni alarak T2 ağırlıklı lomber omurga MRG analizinde anatomiye segmente etme, ölçme ve nicel/nitel sonuçları özelleştirilebilir raporlara aktarma yeteneği sunmaktadır (Minim, 2024:24).

Bölüm III: Prognostik Modelleme ve Klinik Karar Desteği

ML, omurga cerrahisinde sadece tanıya değil, aynı zamanda hangi hastaların cerrahiye ihtiyaç duyacağını, post-operatif komplikasyon riskini ve fonksiyonel sonuçları tahmin etmeye odaklanarak prognostik modellemede güçlü bir rol üstlenmiştir.

3.1. Cerrahi Adaylığının ve Sonuçların Tahmini

ML modelleri, cerrahi triyaj sürecini optimize etmede kullanılmaktadır. Yapay Sinir Ağları (ANN) kullanan bir model, hastanın semptomları, tıbbi geçmişi ve görüntüleme bulguları dahil 55 faktörden 8'ini kullanarak cerrahi müdahale ihtiyacını AUC %0.90 doğrulukla tahmin edebilmiştir.

Post-operatif sonuç tahmininde, ML yüksek başarılar göstermiştir: Yeniden Yatış Riski: ML modelleri, posterior lomber füzyon sonrası 30 günlük yeniden yatışları %78.5 ortalama Pozitif Tahmin Değeri (PPV) ve 0.812 ortalama AUC ile tahmin edebilmiştir. Lomber laminektomi sonrası yeniden yatışların sadece preoperatif girdi değişkenleri kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Fonksiyonel İyileşme: Servikal dejeneratif miyelopatili (DCM) hastaların cerrahi sonrası fonksiyonel durumunu (mJOA skoru) tahmin eden polinom SVM modelleri, %74.3 doğruluk ve 0.834 AUC ile başarılı sonuçlar vermiştir.

3.2. Genomik ve Çoklu-Omik Entegrasyonu

Prognostik modellemenin geleceği, DL sistemlerinin saf görüntüleme verilerinin ötesine geçerek hastaya özgü biyolojik ve genetik verileri entegre eden çoklu-omik platformlara bağlıdır.

Genomik Risk Stratifikasyonu: Büyük ölçekli Genom Çapında İlişkilendirme Çalışmaları (GWAS) ve poligenik risk skorları (PRS), hastaların spinal hastalıklara (örneğin lomber disk herniasyonu için 41 yeni lokus bildirilmiştir) ve cerrahi risklere genetik yatkınlıklarını belirlemekte kullanılmaktadır. Bu genetik veriler, cerrahi veya konservatif tedaviye başlama zamanlamasını değiştirebilecek kişiselleştirilmiş omurga bakımını mümkün kılmaktadır (Yang,2025.26).

Hassas Farmakogenomik: YZ sistemleri, Cytochrome P450 enzimleri (CYP2D6 ve CYP3A4) gibi alelik varyasyonları analiz ederek, opioid farmakokinetiği üzerindeki etkileri belirleyebilir ve ameliyat sonrası analjezi için kişiselleştirilmiş ilaç seçimi veya dozajı konusunda klinik karar desteği sağlayabilir.

Bölüm IV: YZ Güdümlü Cerrahi Uygulamalar ve Robotik Entegrasyon

YZ'nin omurga cerrahisindeki en çarpıcı uygulaması, cerrahi hassasiyeti artıran robotik navigasyon platformlarına entegrasyonudur.

4.1. Robotik Kılavuzluk ve Karma Gerçeklik

Globus **ExcelsiusGPS** gibi robotik sistemler, Dönüşümsel Lomber İnterbody Füzyon (TLIF) ve Skolyoz Sonrası Düzeltme

gibi kritik omurga prosedürlerini gerçekleştirmek için kullanılan devrim niteliğinde bir navigasyon platformudur. Bu sistemler, minimal invaziv yaklaşımları maksimize ederken cerrahi doğruluğu güvence altına almaktadır.

YZ destekli yeni nesil navigasyon sistemleri, Brainlab Spine Mixed Reality Navigation gibi, optik navigasyonun güvenilirliğini gelişmiş karma gerçeklik (Mixed Reality) ile birleştirerek, cerrahların vital bilgileri (örneğin vida yörüngesi) doğrudan görüş alanlarına almalarını sağlamaktadır. Bu çözüm, klinik uygulamaya girmek için FDA 510(k) izni almıştır.

4.2. YZ Destekli Görüntü Kalitesi İyileştirmesi

DL, görüntüleme verilerinin kalitesini artırarak cerrahi planlamayı destekler. DL rekonstrüksiyon teknikleri, lomber omurga MRG çekim sürelerini %45'e kadar kısaltabilirken görüntü kalitesini korur veya iyileştirir. Daha da önemlisi, DL denoising (gürültü azaltma) algoritmalarıyla işlenen BT taramaları, disk hernisi gibi yumuşak doku bulgularının tespitinde standarda kıyasla hassasiyeti %60'a kadar artırabilir (standart BT için %44'e kıyasla). Bu, YZ'nin daha düşük radyasyon dozuyla daha iyi teşhis performansı sunma potansiyelini göstermektedir.

Bölüm V: Zorluklar, Kısıtlamalar ve Gelecek Stratejileri

YZ'nin omurga bakımına entegrasyonu, güvenilirlik, genellenebilirlik ve etik dağıtım sorunları nedeniyle zorluklarla doludur.

5.1. Genellenebilirlik, Veri Kalitesi ve Alan Kayması

Modellerin eğitildiği ortam dışında (farklı popülasyonlar veya cihazlar) tutarlı performans sergilemekte zorlanması (alan kayması/domain shift), en büyük kısıtlamadır. Bir YZ algoritmasının Danimarka'daki yaklaşık 10.000 BT taraması üzerinde test edilmesi, hassasiyetin 0.68 (68%) olarak

raporlanmasına ve test edilen sürümün "Danimarka popülasyonuna genellenebilir olmadığı" sonucuna yol açmıştır. Bu durum, çok merkezli, prospektif harici validasyonun önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, DL'nin performansı, eğitim verilerinin kalitesine ve miktarına sıkı sıkıya bağlıdır. Mislabeled (yanlış etiketlenmiş) vakalar veya ince görüntü artefaktları, CNN'lerin öğrenme süreçlerini doğrudan etkileyerek hataları artırabilir (Wellington,2023:61).

5.2. Algoritmik Opaklık ve Donanım Kaynaklı Gizli Riskler

Algoritmik Opaklık (Kara Kutu Problemi): YZ'nin karmaşık karar verme süreçlerinin yorumlanmasının zor olması, hekimlerin YZ çıktılarına olan güvenini azaltmaktadır. Bu opaklık, aynı zamanda yasal sorumluluk tartışmalarını da karmaşıktırmaktadır.

Donanım Kusurlarından Kaynaklanan Sessiz Sabotaj: YZ sistemlerinin altında yatan fiziksel donanımlardaki kusurlar, göz ardı edilen kritik bir tehdittir. İşlemcilerdeki, bellek yongalarındaki (bit hataları) veya sensörlerdeki en ufak bir arıza, YZ'nin üzerinde çalıştığı veriyi veya ara hesaplamaları bozarak sistemi zehirleyebilir.

Sonuçları: Yanlış okunan bir MRG sensör değeri, YZ'nin hatalı girdi verileriyle çalışmasına ve yanlış pozitif/negatif tanımlara yol açabilir. Örneğin, dozaj hesaplamalarında meydana gelen bir bit hatası, dar terapötik aralığa sahip ilaçlar için kritik sonuçlar doğurabilir. Ameliyathanede veya yoğun bakımda, veri iletişim yolundaki bir kusur (bus error) kritik uyarıların gecikmesine veya atlanmasına neden olarak hasta güvenliğini doğrudan riske atabilir.

Bu tür aralıklı ve tekrarlanamaz kusurlar, tespit edilmesi zor olduğu için sorumluluk zincirini karmaşıktırmaktadır; YZ'nin güvenilirliği için sadece yazılım güvenliği değil, aynı zamanda

donanım katmanındaki bütünlük (örneğin ECC bellekler, hata toleranslı tasarımlar) de kritik öneme sahiptir.

5.3. Stratejik Yönelimler

YZ'nin omurga bakımındaki tam potansiyelini gerçekleştirmesi için, genellenebilirlik sorununu aşmayı ve gizliliği koruyarak büyük veri setlerinden öğrenim sağlamayı hedefleyen Federe Öğrenme (Federated Learning) çerçevelerinin benimsenmesi kritik bir adımdır. Ayrıca, modellerin klinik uygulanabilirliğini artırmak için klinisyenler ve DL uzmanları arasında daha yakın işbirliği zorunludur. YZ'nin gelecekteki rolü, insan uzmanlığının yerini almak yerine, ortak zeka (augmented intelligence) sağlayarak insan muhakemesini standardize edilmiş analiz, hız ve nicel iç görülerle desteklemektir.

Sonuç

YZ, lomber disk patolojilerinin tanı ve tedavisinde yüksek doğruluk ve verimlilik getirme potansiyeline sahiptir. Spesifik IVD segmentasyonunda ulaşılan yaklaşık %98'lik doğruluk ve cerrahi prognostik modellemedeki yüksek başarılar, teknolojinin teknik yeterliliğini kanıtlamaktadır. Ancak YZ'nin klinik alanda tam olarak benimsenmesi, hafif LSS gibi erken evre patolojilerdeki tanısal zafiyet (%50 civarında doğruluk), genellenebilirlik kısıtlamaları (Danimarka örneği) ve donanım kusurlarından kaynaklanan sistemik kırılmalıklar gibi çözülmesi gereken derin zorluklara bağlıdır. Bu zorlukların üstesinden gelmek, sadece algoritmik optimizasyondan değil, aynı zamanda etik, regülatif ve donanımsal güvenliğe yapılan proaktif ve sürekli yatırımlardan geçmektedir.

Kaynakça/Referances

Kumar R & ark.(2025). Intelligence Architectures and Machine Learning Applications in Contemporary Spine Care (2025). *Intelligence Architectures and Machine Learning Applications in Contemporary Spine Care*. Bioengineering 69(2), 224.

Baklacı Ş & ark.(2025). Radyolojide Yapay Zeka ile Hata ve Risk Yönetimi: Daha Güvenli ve Hızlı Tanı. *Radyolojide Yapay Zeka ile Hata ve Risk Yönetimi: Daha Güvenli ve Hızlı Tanı*. CranioCatch Blog 72(10),18. .

Zhou N & ark.(2022). Review of Deep Learning Models for Spine Segmentation. *Review of Deep Learning Models for Spine Segmentation*. Proceedings of the 2022. International Conference on Multimedia Retrieval 24(2),13.

Wang, A & ark.(2024). Deep learning assisted segmentation of the lumbar intervertebral disc: a systematic review and meta-analysis). *Deep learning assisted segmentation of the lumbar intervertebral disc: a systematic review and meta-analysis*. BMC Musculoskelet Disord 26,18.

Cheng, Y & ark.(2024).K (Accurate Intervertebral Disc Segmentation Approach Based on Deep Learning). *Accurate Intervertebral Disc Segmentation Approach Based on Deep Learning*. Diagnostics (Basel). 22(1),24.

Mininm & ark.(2024). SpineScan: a deep learning model for lumbar spine MRI annotation and Pfirrmann grading assessment. *SpineScan: a deep learning model for lumbar spine MRI annotation and Pfirrmann grading assessment*. Eur Spine J. 14(1),24.

Yang, X & ark.(2025). Performance of Artificial Intelligence in Diagnosing Lumbar Spinal Stenosis *Performance of Artificial Intelligence in Diagnosing Lumbar Spinal Stenosis: A Systematic Review and Meta-Analysis*. Spine 14(1),26.

Wellington & ark.(2023). The use of machine learning for predicting candidates for outpatient spine surgery. *The use of machine learning for predicting candidates for outpatient spine surgery: a review*. J Spine Surg.19(9),61.

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*