



Kıkırdak görüntüleme yöntemleri

Cartilage imaging methods

Neslihan Taşdelen, Ayşegül Görmez

Yeditepe Üniversitesi Hastanesi, Radyoloji Ana Bilim Dalı, İstanbul

Osteoartrit (OA) prevalansı, popülasyonda beklenen yaşam süresinin uzaması ve artan obezite nedeniyle gittikçe artmaktadır. Mevcut klinik ve epidemiyolojik metotlarda altın standart görüntüleme, direkt grafiye dayanmaktadır. Ancak, bu alana yönelik olarak farklı cerrahi ve farmakolojik tedavi metotlarının ortaya çıkışı kıkırdağın noninvaziv olarak direkt görüntülemesinin önemini gittikçe arttırmıştır. Son yıllarda, manyetik rezonans görüntülemedeki gelişmelerle elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler sayesinde morfolojik değerlendirme çok daha yüksek kalitede yapılabilmektedir. Elde edilen verilerin yarı-kantitatif skorlama metotlarıyla değerlendirilmesi hem hastalığın patofizyolojisini ve doğal seyrini anlamada yardımcı olmakta hem de hastaların tedavi takibinde kolaylık sağlamaktadır. Son dönemde, yeni geliştirmeye başlanan kompozisyonel metotlar (T2 haritalama, T1 rho ve *delayed gadolinium enhanced MRI of cartilage* "dGEMRIC" vs) kıkırdağın fizyolojik içeriğini noninvaziv şekilde değerlendirilebilmektedir. Bu veriler özellikle kıkırdak dejenerasyonunu çok erken dönemde ortaya koyabilmekte; yeni tedavi yöntemlerini, ilaçların etkinliğini değerlendirmede ve geliştirmede yardımcı olmaktadır. Bu derlemede, kıkırdak yapısı, yaralanma tipleri veya dejenerasyon sonucu ortaya çıkan değişiklikler anlatılacak ve bunları görüntüleme kullanılan radyolojik metotlardan, son dönemde ortaya konan gelişmelerle birlikte bahsedilecektir.

Anahtar sözcükler: kıkırdak; manyetik rezonans görüntüleme; radyografi

The prevalence of osteoarthritis (OA) is increasing, due to the aging population and increasing obesity. The current gold standard for the assessment of OA in clinical and epidemiological settings is based on radiographs. However, various options of surgical or pharmacological novel treatment methods of OA motivated the importance of noninvasive direct imaging of cartilage. Over the last decades, technical developments in magnetic resonance imaging technology introduced high resolution images of the cartilage which allowed morphological evaluation in a better quality. Semi-quantitative scoring methods, has greatly added to the understanding of the pathophysiology and natural history of OA, also made easier the follow-up of the treatment methods on the patients. Recently, newly introduced compositional techniques, such as T2 mapping, T1 rho imaging and delayed gadolinium enhanced MRI of cartilage (dGEMRIC) etc, may provide information about the physiological content of the cartilage. These data has been useful in identifying cartilage degeneration at an earlier stage and may help to develop and assess strategies for prevention and treatment. In this review, cartilage structure, injury patterns and changes due to the degeneration will be described and the methods which is currently being used in imaging will be concluded with the recent novel techniques.

Key words: cartilage; magnetic resonance imaging; radiography

EKLEM KIKIRDAĞI

Eklem kıkırdağı avasküler, anöral ve alenfatik yapıyla oldukça kompleks bir yapı olup beslenmesi eklem sıvısından sadece difüzyona dayanmaktadır. Kıkırdak ağırlığının sadece %4'ünü oluşturan kondrositlerin temel görevi ekstrasellüler matriksi üretmektir. Ekstrasellüler matriksin en önemli komponenti su olup kıkırdak ağırlığının %75'ini oluşturur. Diğer önemli komponentler kollajen ve proteoglikan agregatlarıdır. Proteoglikanlar, santral kesimde protein ve buna kovalan bağlar ile

bağlı glikozaminoglikanlardan (GAG) oluşmaktadır. Negatif yüklü GAG'lar su akışını düzenleyerek kıkırdağın kompresif güçlere karşı direncini oluşturur. Hiyalin kıkırdak yapısındaki kollajen lifler ağırlıklı olarak tip 2 yapıda olup farklı tabakalarda farklı dizilim göstermektedir, bu durum da kıkırdak yapının iskeletini oluşturarak gerilme güçlerine karşı direnç oluşturur. Elektron mikroskopi verilerine göre en yüzeysel tabakada (tanjan-siyel tabaka) en ince kollajen lifler bulunurken bu lifler eklem yüzeyine paralel seyir gösterirler. Bu tabakanın

İletişim / Contact: Prof. Dr. Neslihan Taşdelen • **E-posta / E-mail:** ntsadelen@yeditepe.edu.tr

ORCID ID: Neslihan Taşdelen, 0000-0002-8919-183x • Ayşegül Görmez, 0000-0001-5620-2881

Geliş / Received: 9 Kasım 2022 • **Revizyon / Revised:** 8 Ocak 2023, 31 Ocak 2023 • **Kabul / Accepted:** 1 Şubat 2023

hemen altında bulunan transizyonel tabakada kollajen liflerde daha rastgele bir dizilim izlenmektedir. En derin tabaka en kalın tabaka olup radyal tabaka olarak isimlendirilir. En kalın kollajen liflerin bulunduğu bu tabakada lifler artiküler yüzeye dik uzanım gösterir. En derin tabaka, *tidemark* düzeyinin üstünde nonkalsifiye iken, altında kalsifiye hal alır. En derin kalsifiye tabakanın altında subkondral kemik bulunur. Kollajen lifler derindeki *tidemark* düzeyinde subkondral kemikte sabitlenir.^[1-4]

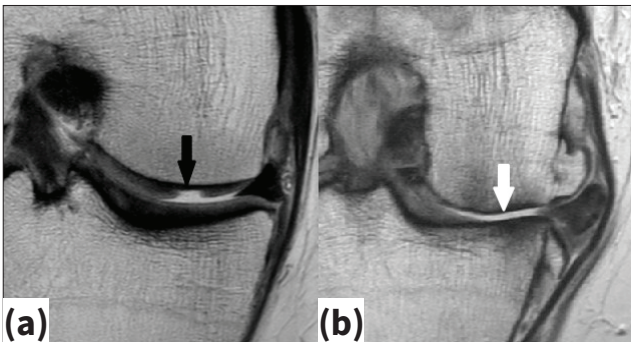
KIKIRDAĞIN MORFOLOJİK DEĞERLENDİRMESİ

Kıkırdak hasarlanması; kıkırdığın yüzeyel kısmında, orta kesiminde veya derin kısmında olabilir. Derin yerleşimli kıkırdak yaralanmalarına subkondral kemik değişiklikleri de eşlik edebilir. Akut travmatik kıkırdak lezyonları genelde geçiş zonu dar, keskin kenarlı defektler (Şekil 1a) şeklinde iken dejeneratif lezyonlar (osteartrit) daha diffüz, geçiş zonu geniş, sığ lezyonlar (Şekil 1b) şeklinde görülür. Dejeneratif lezyonlarda eşlik eden subkondral kemik bulguları görülebilir.^[5]

Kıkırdak görüntülemesi direkt veya indirekt olarak farklı radyolojik modaliteler ile yapılabilir. Bu modaliteler; direkt grafi, ultrasonografi (US), bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonans görüntüleme (MRG), MRG veya BT ile yapılan artrografiler şeklinde tanımlanabilir.

Direkt Grafi

Düz radyografiler kıkırdak değerlendirmesinde indirekt veriler verir. Ancak uygulama; erişim kolaylığı ve ucuz bir metot olması nedeniyle osteartrit (OA) tanı ve takibinde primer radyolojik metot olarak yıllardır kullanılmaktadır. Direkt grafi, osteartritte kenar osteofitlerini, subkondral skleroz ve kistleri göstermede oldukça başarılıdır. Ayrıca kıkırdak kaybı, meniskal hasar veya ekstrüzyona sekonder gelişen eklem mesafesindeki daralmayı gösterebilir. Osteofitler, eklem mesafesinde daralmanın ortaya çıkışından daha erken evrede gelişir. Direkt grafinin en



Şekil 1.a-b. Koronal planda proton dansite görüntüleri. Akut kondral yaralanmalarda keskin kenarlı kıkırdak defektleri görülürken (a, siyah ok), osteartritte diffüz kıkırdak kayıpları (b, beyaz ok) izlenir.

Tablo 1. Kellgren ve Lawrence derecelendirme sistemi^[6]

Derece 0	Normal
Derece 1	Eklem mesafesinde kuşku daralma ve kemik marjinlerde köşe sivrileşmesi
Derece 2	Belirgin osteofitler ve eklem mesafesinde olası daralma
Derece 3	Orta derece çok sayıda osteofit, eklem mesafesinde belirgin daralma ve komşu kemiklerde olası deformite
Derece 4	Geniş osteofitler, eklem mesafesinde belirgin daralma, komşu kemiklerde skleroz ve belirgin deformite

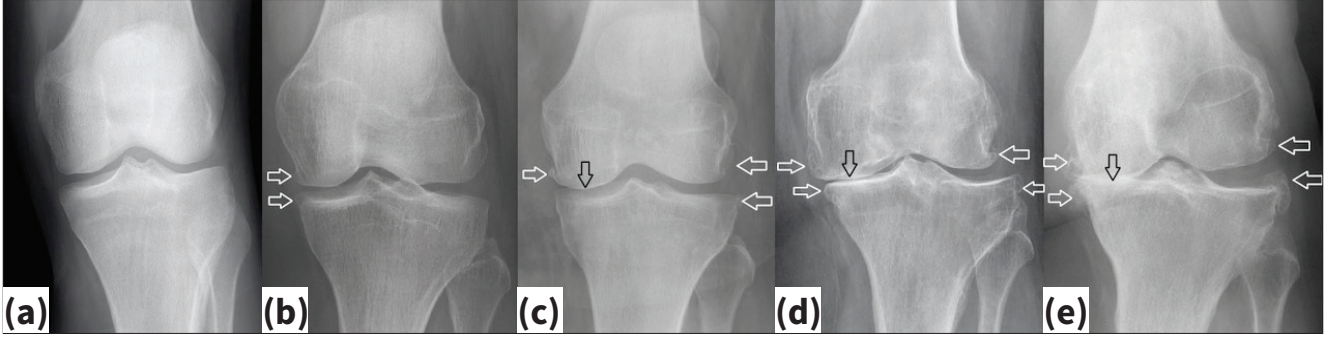
önemli dezavantajı zaman içerisinde gelişen değişikliklere olan nispeten düşük sensitivitesi ve yumuşak doku değerlendirmedeki yetersizliğidir.^[6,7] Osteoartritin direkt grafi tanısı ve derecelendirmesi yarı skorlama sistemleriyle yapılmaktadır. Bu amaçla en fazla kullanılan metot 1958'de ortaya konan Kellgren ve Lawrence derecelendirme sistemidir (Tablo 1).^[6] Bu sisteme göre derece 2 bulguların varlığı osteoartrit tanısı koydurur (Şekil 2).

Kellgren ve Lawrence derecelendirme sisteminin en önemli handikapı radyografi değişikliklerinin hastalık seyri sırasında lineer bir şekilde ortaya çıktığını kabul ederek değerlendirmesidir. Direkt radyografide, üç boyutlu bir anatomik yapı iki boyutlu olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle çekim pozisyonundan kaynaklanan problemler değerlendirmeyi etkiler. Ayrıca eklem mesafesi sadece kıkırdak miktarından değil, farklı intraartiküler patolojilerden etkilenebilir. Bu nedenle direkt grafi her ne kadar eklemde osteoartrit progresyonu hakkında bilgiler verse de eklemdeki destrüksiyona paralel değildir ve direkt kıkırdak hasarını göstermede spesifik değildir.^[8,9]

Eklem mesafesindeki daralma ve kıkırdak kaybı arasındaki ilişki Amin ve ark. tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre radyografik progresyon belirgin olmasa dahi dizlerde önemli miktarda kıkırdak kaybı görülebilmektedir. Radyografik ilerlemenin kıkırdak kaybının spesifik (%91) ama sensitif olmayan (%23) bir göstergesi olduğu gösterilmiştir.^[10]

Ultrasonografi

Ultrasonografi gerçek zamanlı multiplanar görüntüleme olanağı sağlayan, nispeten ucuz bir radyolojik modalitedir. Yumuşak doku rezolüsyonu yüksek olup radyasyon kullanılmaması en önemli avantajlarından biridir. Ancak uygulama zaman ve tecrübe gerektirmektedir. Ayrıca en önemli handikapı kemik altındaki yapılar ve derin dokuları değerlendirmedeki yetersizliğidir. Ancak patellofemoral eklem gibi yüzeyel kıkırdak yapıların değerlendirilmesinde uygun hastalarda yararlı olabilir.^[7,11] Ultrasonografi izlenebilen kıkırdak ve diğer intraartiküler yapıları değerlen-



Şekil 2.a-e. Ayakta çekilmiş diz AP grafileri: Kellgren-Lawrence 0, normal eklem mesafesi, osteofit yok (a). Kellgren-Lawrence 1, normal eklem mesafesi, kemik marjinlerde köşe sivrileşmeleri (beyaz ok) (b). Kellgren-Lawrence 2, eklem mesafesi hafif dar (siyah ok), küçük osteofitler (beyaz ok) (c). Kellgren-Lawrence 3, eklem mesafesi dar (siyah ok), orta derecede medial ve lateral osteofitler (beyaz ok) (d). Kellgren-Lawrence 4, eklem mesafesi belirgin dar (siyah ok), belirgin medial ve lateral osteofitler (beyaz ok) (e).

dirmenin yanında eklem mesafesindeki efüzyon ve sinoviti gösterebilir. Çok merkezli bir çalışmada ağırlı diz OA olan 600 olguda ultrason tarafından saptanan efüzyonun, ileri OA bulgularına paralellik gösterdiği, artroplasti operasyonu gerekliliği konusunda yol gösterici olduğu görülmüştür.^[12]

Bilgisayarlı Tomografi (BT)

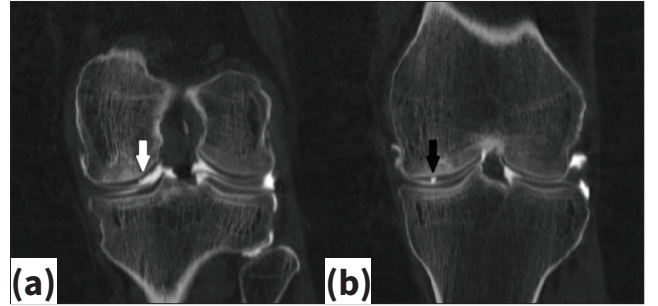
Bilgisayarlı tomografi, OA'da görülen trabeküler remodelasyon, subkondral kist ve subkondral sklerozu değerlendirmede oldukça faydalıdır. Subkondral kemik değişikliklerinin yanında kondrokalsinozis gibi yumuşak doku mineralizasyonu durumlarını değerlendirmede etkilidir.^[11]

Son dönemde dual enerji BT uygulamalarıyla farklı elemental içeriği olan ancak yakın dansitelerde yapıları ayırtmada yararlı olduğu da gösterilmiştir. Bu anlamda özellikle kristal depo hastalıklarının ayırıcı tanısında faydalı olabilir.^[13]

Bilgisayarlı tomografi-artrografi, intraartiküler iyotlu kontrast madde enjeksiyonuyla yapılır. Bu sayede, kırık, eklem sıvısı ve kemik arasında ortaya çıkan kontrast farkı ile özellikle de yüzeysel kırık lezyonlarını ortaya koymada oldukça etkilidir (Şekil 3).^[14] Kırık kalınlığını ölçmede referans metot olarak kabul edilmektedir. Bunların dışında kırık lezyonlarına eşlik eden menisküs yırtıklarını değerlendirmede özellikle menisküs tamir cerrahisi sonrasında oldukça yararlıdır. Ancak invaziv bir metottur. Kırıkta erken dejenerasyonu değerlendirmede veya eklem mesafesindeki sinoviyal varlığını ortaya koymada ve kemik iliği ödemi göstermede yetersizdir.^[15]

Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG)

Manyetik rezonans görüntüleme, eklem hastalıklarında eklem efüzyonunu, subkondral kemiği ve kırıktağı tek bir metotla gösterebilen yumuşak doku rezolüsyonu en yüksek radyolojik bir modalitedir. Görüntülerin elde edil-

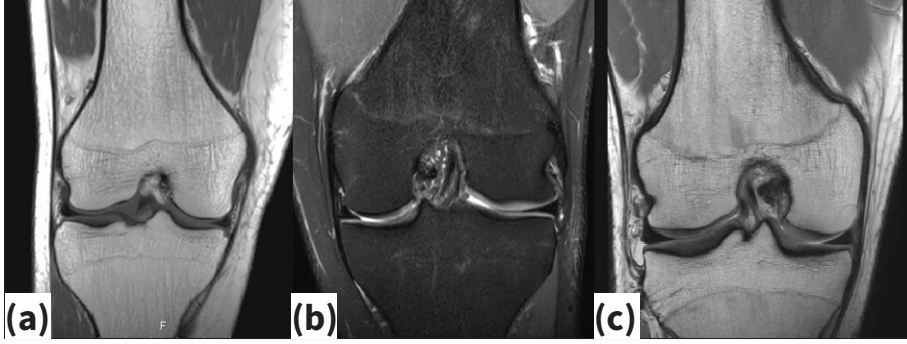


Şekil 3.a-b. Koronal planda diz BT artrografi: ICRS derece 3 kondral defekt (beyaz ok) (a). ICRS derece 4 fokal keskin kenarlı kondral defekt (siyah ok) (b).

mesinde birçok farklı sekans kullanılabilir. Bu sekansların hepsinin farklı güçlü yanları veya eksiklikleri mevcuttur.

Yağ baskılama metotları, tetkik süresini arttırmasına ve manyetik alan inhomojenitelerine duyarlı olmasına rağmen sıklıkla sekanslara eklenmektedir. Subkondral kemik ve kırıktağı kontrastını arttırmada yararlı olduğu gibi subkondral kemik iliği ödeminin gösterilmesini sağlar. Subkondral kemik ve kırıktağı arasındaki kontrastı arttırmak amacıyla hızlı su-uyarımli GRE MR sekansları (ör. WATS) kullanılmaktadır. Bu sekanslarda yağa bağlı olmayan protonlar selektif olarak uyarılmakta ve bu şekilde zaman alana spektral yağ baskılama prepulsuna ihtiyaç kalmamaktadır. *Short-tau inversion recovery* (STIR) sekansı da manyetik alan inhomojenitesinden bağımsız uniform yağ baskılama sağlayarak kırıktağı değerlendirmede faydalı olabilir.^[7]

Klinik uygulamalarda sıklıkla iki boyutlu (2D) görüntüleme metotları kullanılır (Şekil 4). T1A imajlarda, kırıktağı nispeten homojen görünümde olup, yüksek sinyalli olarak izlenen yağ, kemik iliği ve düşük sinyalli olarak izlenen kalsifiye kırıktağı/subkondral kemiğe göre ara sinyal özelliği göstermektedir. Dolayısıyla bu yapılardan kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Ancak düşük sinyalli eklem sıvısından ayrımı oldukça güç olup, bu durum T1A imajların ma-



Şekil 4.a-c. Kıkırdak değerlendirilmede kullanılan 2D sekanslar (koronal plan): T1A sekans, kıkırdak nispeten homojen görünümde olup, yüksek sinyalli olarak izlenen yağ ve kemik iliği ve düşük sinyalli olarak izlenen kalsifiye kıkırdak/subkondral kemiğe göre ara sinyal özelliği göstermektedir. Dolayısıyla bu yapılardan kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Ancak düşük sinyalli eklem sıvısından ayrımı oldukça güç olup, bu durum T1A imajların majör limitasyonunu oluşturmaktadır **(a)**. T2A sekans, eklem sıvısı-kıkırdak ayrımının en iyi yapıldığı sekanslardır. Ancak bu sekanslarda kıkırdağın iç sinyali iyi olmadığından kıkırdak görüntülemesinde tercih edilmemektedir **(b)**. Orta ağırlıklı sekans, TE değeri artırılmış PD sekansıdır. Bu sekans, sıvı sinyali daha parlak olduğundan hem internal kıkırdak sinyalinin iyi olduğu hem de kıkırdak-sıvı ve kıkırdak- subkondral kemik kontrastının arttığı gözlemlenmiştir. Sihirli açılı artefaktları da daha az görülür **(c)**.

jör limitasyonunu oluşturmaktadır. Eklem sıvısı-kıkırdak ayrımının en iyi yapıldığı sekanslar T2A sekanslardır. Ancak bu sekanslarda kıkırdağın iç sinyali iyi olmadığından kıkırdak görüntülemesinde tercih edilmemektedir.^[16] Kıkırdak görüntülemesinde tercih edilmesi gereken sekanslar proton dansite (PD) ağırlıklı sekanslardır. Proton dansite sekansında TE değeri biraz daha artırılıp 33-60 milisaniye aralığında tutularak orta-ağırlıklı sekans elde edilir. Bu sekans, sıvı sinyali daha parlak olduğundan hem internal kıkırdak sinyalinin iyi olduğu hem de kıkırdak-sıvı ve kıkırdak-subkondral kemik kontrastının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca orta-ağırlıklı sekans, sihirli açılı artefaktları da azalmaktadır.^[17] Ayrıca mevcut görüntülerle diğer intraartiküler ve ekstraartiküler patolojiler de tanınabilir. 2D sekanslarda sekans sürelerinin kısa olması önemli bir avantaj olmakla birlikte, kesit kalınlığı ve aralıklarının kalın olması ufak kıkırdak lezyonlarının parsiyel hacim artefaktlarına bağlı olarak atlanmasına neden olur.^[5,16]

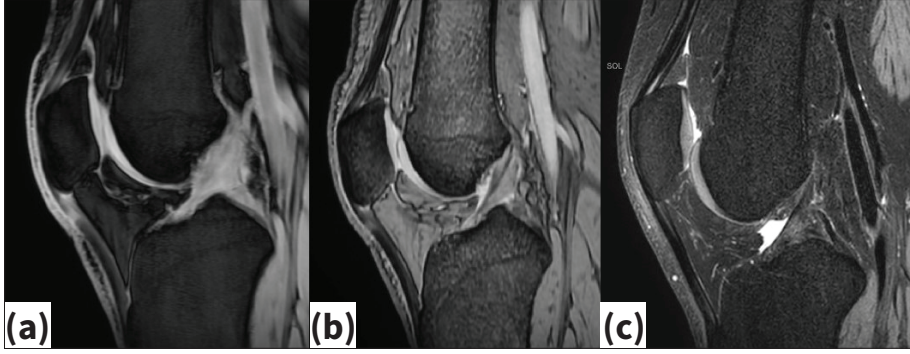
Üç boyutlu (3D) kıkırdak sekansları ince ardışık kesitler oluşturulmasını sağlayarak parsiyel hacim artefaktlarını ortadan kaldırır ve elde edilen verinin farklı planlarda reformat edilmesine olanak sağlar. Bu tip sekansların dezavantajlı tarafları uzun çekim süreleri, hareket ve kimyasal duyarlılık artefaktlarının fazla olması ve diğer intra-veya ekstraartiküler yapıların (menisküs, ligamanlar vs.) optimum değerlendirilememesidir. Bu sekanslarda da yağ baskılama metotları eklenebilir. Bu durumda kimyasal kayma artefaktları ortadan kaldırılmış olur.^[5]

Kıkırdak görüntülemesinde 3D sekanslardan özellikle gradient eko (GRE) metotlar uzun yıllar kullanılmıştır (Şekil 5a, 5b). Bu grup sekanslar iki ana grupta toplanabilir:

- Sıvı-koyu sekanslar: Bu grupta T1-ağırlıklı GRE sekanslar bulunur. Örneğin; *spoiled gradient recalled echo* (SPGR) ve *fast low-angle shot* (FLASH). Eklem sıvısı düşük sinyalli görüldüğünden kıkırdak-sıvı kontrastı düşüktür. Bu durum özellikle yüzeysel kıkırdak lezyonlarının görülmesini güçleştirir. Sekans süreleri uzundur.
- Sıvı-parlak sekanslar: Karışık T1/T2* ağırlıklı GRE sekanslardır. Örneğin; *dual-echo steady state* (DESS), *driven equilibrium Fourier transform* (DEFT), *multiple echo recombined gradient echo* (MERGE). Kıkırdak sinyali orta düzeydedir. Uzaysal rezolüsyon yüksek olup özellikle kıkırdak yumuşaması gibi durumları iyi gösterir. Yüzeysel kıkırdak lezyonları göstermede doğruluğu daha yüksektir. Sekans süreleri uzundur.

Kıkırdak görüntülemesinde kullanılan diğer bir 3D sekans grubu 3D hızlı spin eko (FSE) sekanslardır (Şekil 5c). Bu grupta yer alan sekanslar nispeten yeni metotlardan olup; farklı cihaz firmalarında farklı isimlendirilmiştir. Örneğin; CUBE, SPACE, VISTA vs. Bu sekanslara da yağ baskılama eklenebilmekte, dolayısıyla kıkırdak görüntülemesinde kullanılabilir. Bu sekanslarda kıkırdak iç sinyali iyi olmakla birlikte sıvı sinyali hafif parlak olabilmektedir. Uzaysal rezolüsyon GRE sekanslara göre nispeten daha düşük olmakla birlikte kıkırdak dışı eklem yapılarının değerlendirilmesinde GRE sekanslara göre çok daha fazla etkilidir. Sekans süreleri uzundur.^[5,7]

Kıkırdağın morfolojik değerlendirmesinde sekans seçimi kadar magnet gücü de önemli bir değişkendir. Bu konuda yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar mevcuttur. Teorik olarak, magnet gücü arttıkça sinyal-gürültü oranı



Şekil 5.a-c. Kıkırdak değerlendirilmede kullanılan 3D sekanslar (sagittal plan): 3D SPGR, T1-ağırlıklı GRE sekanslardandır. Eklem sıvısı düşük sinyalli görüldüğünden kartilaj-sıvı kontrastı düşüktür. Bu durum özellikle yüzeysel kıkırdak lezyonlarının görülmesini güçleştirir (a). 3D MERGE, T2* ağırlıklı GRE sekanslardandır. Kıkırdak sinyali orta düzeydedir. Kıkırdak yumuşaması gibi durumları ve yüzeysel kıkırdak lezyonları göstermede doğruluğu daha yüksektir (b). 3D PD VISTA, 3D FSE sekanslardandır. Kıkırdak iç sinyali iyi olmakla birlikte sıvı sinyali hafif parlak olabilmektedir. Kıkırdak dışı eklem yapılarının değerlendirilmesinde GRE sekanslara göre çok daha fazla etkilidir (c).

artacağından imaj kalitesi ve uzaysal rezolüsyonu da artacaktır. Literatürde kıkırdak lezyonlarının tespit edilmesinde 3T magnetin 1,5T magnete göre daha iyi olduğuna dair yayınlar olduğu gibi iki magnet arasında anlamlı farklılık olmadığını da gösteren çalışmalar mevcuttur.^[18,19]

KIKIRDAĞIN SEMİKANTİTATİF DEĞERLENDİRMESİ

Kıkırdak hasarlanması, tek veya tekrarlayan travmalar sonrasında, kronik dejeneratif süreçlerde, osteonekroz veya enflamatuvar süreçler sonrasında gelişebilir. Etiyolojiden bağımsız olarak bu hasarlanmaların derecelendirmesinde artroskopi kullanılmaktadır. Dolayısıyla MRG ile yapılan derecelendirmeler de artroskopi derecelendirme sistemi bazında oluşturulmuştur. Günümüzde en sık kullanılan, artroskopiye benzer şekilde kıkırdak lezyonunun derinliği esas alınarak yapılan Uluslararası Kıkırdak Tamir Derneği (ICRS) metodu kullanılmaktadır (Tablo 2).^[5]

Bunun dışında genelde çalışmalarda veya OA tedavisinde kullanılan farmakolojik ajanların etkinliğini değerlendirmede kullanılabilecek birçok skorlama sistemi mevcuttur. Tüm-organ Manyetik Rezonans Görüntüleme Skorlaması (WORMS), Diz Osteoartrit Skorlama Sistemi

(KOSS), Boston Leeds Osteoartrit Diz Skoru (BLOKS) gibi sistemler en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu skorlama sistemlerinde diz ekleminin fonksiyonel bütünlüğü ve OA fizyopatolojisi ile ilişkili birçok özellik değerlendirilmektedir. Artiküler kıkırdak bütünlüğü, subartiküler kemik iliği anormallikleri, subkondral kistler, subartiküler kemikteki etkilenme, marjinal ve santral osteofitler, meniskal bütünlük ve ekstrüzyon, ön ve arka çapraz bağ bütünlüğü, medial ve lateral kollateral ligaman bütünlüğü, sinovit ve efüzyon, intraartiküler serbest cisimler, periartiküler kistler ve bursit, vs. gibi durumlar tüm bu skorlama sistemlerinde ayrı ayrı değerlendirilmektedir.^[7]

KIKIRDAĞIN KOMPOZİSYONEL DEĞERLENDİRMESİ

Osteoartritte hyalin kıkırdakta oldukça önemli biyokimyasal değişiklikler ortaya çıkar. Glikozaminoglikan kaybı ve su içeriğinin artışı kıkırdak dejenerasyonunun en erken aşamasını meydana getirirken bu aşamada ekstrasellüler matrikste kollajen içeriği intakt kalmaktadır.^[7] İlerleyen evrelerde kollajen içeriği ve oryantasyonundaki değişikliklerle birlikte kıkırdakta makroskopik değişiklikler ortaya çıkmaktadır.^[4] Kompozisyonel MRG ağırlıklı olarak erken evredeki değişiklikleri görüntülemeye yararlı olmaktadır.^[7]

T2 Haritalama

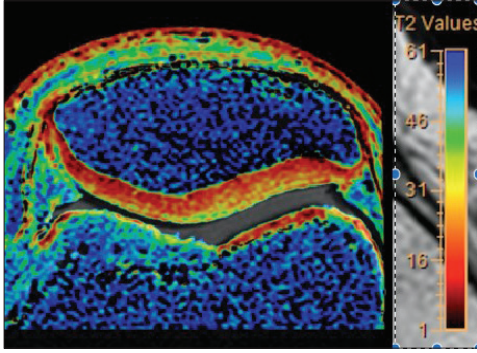
T2 relaksasyon zamanı, MRG'de RF eksitasyonu sonrasında protonların faz uyumu kaybetme hızı olarak tanımlanabilir. Herhangi bir ortamda veya dokuda serbest su varlığında transvers manyetizasyon kaybı yavaşladığında T2 relaksasyon zamanı uzar. Dolayısıyla dokunun su içeriği, T2 relaksasyon zamanı ile doğru orantılıdır. Kıkırdak T2 zamanının ölçülmesi ve ortaya konması kıkırdak dejene-

Tablo 2. Fokal kıkırdak lezyonlarının derecelendirmesinde ICRS sınıflaması^[5]

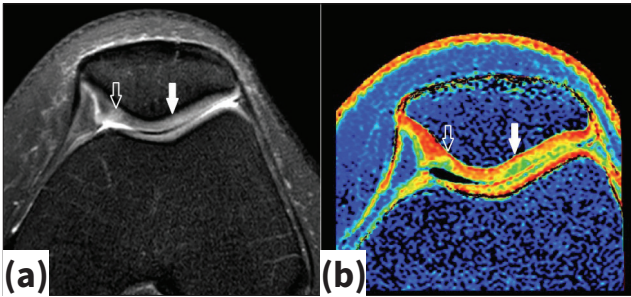
Derece 0	Normal
Derece 1	1a: Anormal intrasubstans sinyal değişikliği 1b: Yüzeysel fissür ve laserasyonlar
Derece 2	Kıkırdakta <%50 kalınlık kaybı
Derece 3	Kıkırdakta >%50 kalınlık kaybı
Derece 4	Tam kat kıkırdak kaybı + subkondral kemik değişiklikleri

rasyonu derecesini gösterir.^[20] Ancak kıkırdakta T2 zamanı su içeriğinden etkilendiği gibi, kollajen ağ diziliminden, kıkırdağa binen yükten, kıkırdağın ana magnet yönüyle olan açısından (sihirli aç etkisi) da etkilenebilir. Bu tip değişiklikler kıkırdak T2 relaksasyon zaman değerlendirmesini güçleştirmektedir.^[11]

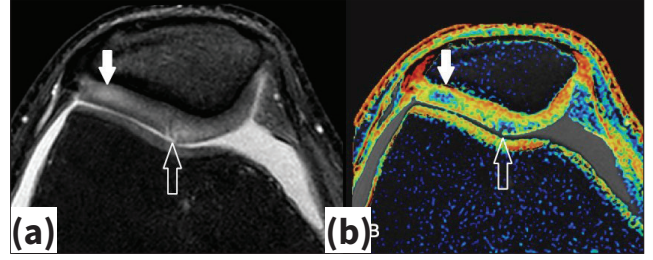
Doku T2 haritalama görüntüsünü elde edebilmek için, farklı eko zamanları kullanılarak elde edilen çok sayıda SE sekans görüntüsünün analiz edilmesi gereklidir. Sekans 2D veya 3D olabilir. Normal kıkırdakta kollajen içerik ve oryantasyon farklılığına bağlı olarak T2 relaksasyon değerleri zonal farklılık gösterir (Şekil 6). Kıkırdak yüzeyinden derine ilerlerken T2 değerleri azalır. Subkondral kemiğe en yakın alanda T2 değerleri en düşüktür.^[7] Erken dönem OA olgularında T2 değerleri artış göstermektedir (Şekil 7, 8), ancak orta ve ciddi OA olgularını ayırt etmede T2 değerleri yararlı değildir (Şekil 9, 10).^[21,22] Kijowski ve ark'nın yaptığı bir çalışmada rutin diz MRG incelemesine T2 haritalama seansının eklenmesinin kartilaj lezyon tanısında sensitiviteyi %74,6'dan %88,9'a yükselttiği belirtilmiştir.^[23]



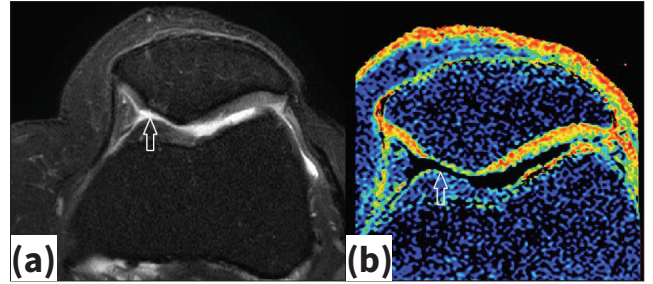
Şekil 6. Normal kıkırdakta kollajen içerik ve oryantasyon farklılığına bağlı olarak T2 relaksasyon değerleri zonal farklılık gösterir. Kıkırdak yüzeyinden derine ilerlerken T2 değerleri azalır. Subkondral kemiğe en yakın alanda T2 değerleri en düşüktür.



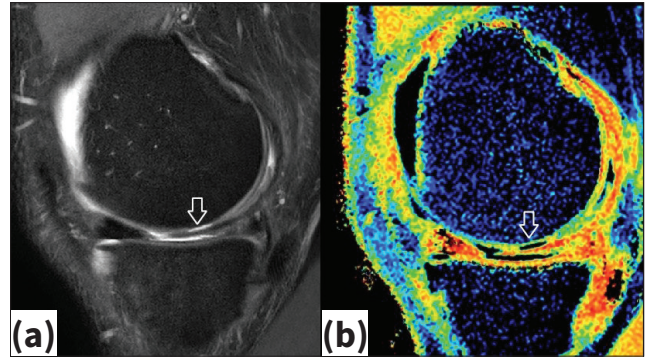
Şekil 7.a-b. Aksiyal plan yağ baskılı PD (a) ve T2 haritalama (b). Medial ve lateral patellar fasetlerde ICRS 1a kondromalazi (kıkırdak yumuşaması) alanları (beyaz oklar) ve aynı kesit T2 haritalarında yüksek T2 değerleri izlenmektedir.



Şekil 8.a-b. Aksiyal plan yağ baskılı PD (a) ve T2 haritalama (b). Medial patellar fasette ICRS 1a (dolu beyaz ok) ve patellar köşede fissürleşme şeklinde ICRS 1b kondromalazi (açık beyaz ok) izlenmektedir.



Şekil 9.a-b. Aksiyal plan yağ baskılı PD (a) ve T2 haritalama (b). Medial patellar faset ve patellar köşe düzeyinde ICRS 3-4 kondromalazi ve eşlik eden subkondral ödem izlenmektedir.



Şekil 10.a-b. Aksiyal plan yağ baskılı PD (a) ve T2 haritalama (b). Medial femoral kondil inferior kesimde ICRS 4 kondromalazi izlenmektedir.

dGEMRIC (Delayed Gadolinium Enhanced MRI of Cartilage)

Kontrast madde uygulaması sonrası alınan bir T1 haritalama metodudur. Osteoartritte kıkırdak yapısının bozulmasının en önemli bileşeni (-) yüklü proteoglikanların kaybı olup bu kıkırdakta (+) yüklenmeye neden olur. Eğer (-) yüklü bir ajan verilirse (gadolinium şelatları) bu GAG kaybı olan alanlarda birikerek T1 relaksasyon zamanında kısalmaya neden olur. Dolayısıyla GAG içeriği T1 relaksasyon zamanına paralellik göstermektedir. En önemli dezavantajı intravenöz kontrast madde kullanımı ve uygulanan kontrast maddenin eklem aralığına ulaşımı ve optimum dağılımı için süre ve egzersiz yapılması gerek-

liliğidir. Tüm bu gereklilikler çekim süresini oldukça uzatmaktadır.^[24]

T1 rho Haritalama

T1 rho zamanı, dokunun rotasyonel proton-ortam relaksasyon zamanını ölçen bir değerdir. Kıkırdakta su molekülleriyle lokal makromoleküller (GAG) arasındaki etkileşim ile belirlenir. Ekstrasellüler matrikste GAG kaybı T1 rho zamanında uzamaya neden olmaktadır. Glikozaminoglikan kaybı dışında kıkırdak liflerinin miktarı ve oryantasyonu da bu değeri etkilemektedir. Dolayısıyla yaş artışı ile T1 rho zamanının uzadığı veya koşma zıplama gibi anlık aktivitelerin hemen sonrasında T1 rho zamanının kısaltıldığı gösterilmiştir.^[7,11,23] En önemli dezavantajı dokuda ısı artışı ve spesifik absorpsiyon hızında (SAR) artışına neden olmasıdır.^[7,23]

Sodyum Görüntüleme

Kıkırdakta (-) yüklü GAG moleküllerine bağlı Na katyonlarının ölçümüne dayanır. Kıkırdaktaki GAG içeriğinin indirekt göstergesi kabul edilmektedir. Ancak vücutta sodyum konsantrasyonu az olduğu için sinyali nispeten düşük bir metottur. Bu nedenle yüksek manyetik güçlü cihaz ve özel sarmal kullanımı gerektirir.^[4]

Ultra-Kısa TE Görüntüleme (UTE)

Kısa TE zamanı olan dokuların (örneğin; menisküs, tendon, ligaman vs.) iç yapısı düşük sinyal oluşturmaları nedeniyle konvansiyonel sekanslarla değerlendirilmeleri güçtür. Ultra-kısa TE görüntüleme sekansında aşırı düşük TE zamanı kullanılarak görüntü elde edilebilmekte, bu nedenle bu tip anatomik yapıların hafif patolojilerinde de optimum değerlendirme yapılabilmektedir. Ultra-kısa TE görüntüleme kıkırdak değerlendirmesinde klinik uygulamaya henüz geçmiş bir metot değildir. Ancak OA patogenezinde özellikle düşük TE değeri olan derin radyal ve kalsifiye kıkırdak tabakanın önemi ortaya konmaktadır. Ultra-kısa TE görüntüleme, osteokondral bileşke görüntülemesini sağlayabilmektedir. Ancak bu sekans oldukça uzun görüntüleme süresi ve özel ekipman gerektirmektedir.^[25]

KIKIRDAK GÖRÜNTÜLEMESİNDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

Osteoartritte yapay zekâ kullanımı ile ilgili çalışmalar gittikçe artmaktadır. Özellikle derin öğrenme metodu kullanılarak OA'nın derecelendirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur.^[26,27] Başka bir çalışmada da direkt grafi bulguları ve hasta demografik verileri birlikte değerlendirilerek OA progresyonunun öngörülebilir olduğu ortaya konmuştur.^[28] Ayrıca T2 haritalama metodu verileri ile yapılmış

derin öğrenme metodu kullanılan bir yapay zekâ çalışmasında erken ve geç evre osteoartrit tanı ve ayırımında oldukça iyi tanısall performans sağlandığı görülmüştür.^[29]

SONUÇ

Kıkırdak görüntüleme, son dönemin oldukça popüler konularından biridir. Gerek akut kıkırdak yaralanması gerek kıkırdak dejenerasyonu değerlendirmesinde oldukça yararlı bilgiler vermektedir. Son dönemdeki yeni kompozisyonel metotlarla OA'nın en erken bulgularının ortaya konması özellikle yeni tedavi metotlarının değerlendirilmesinde yol gösterici olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Van Breuseghem I. Ultrastructural MR imaging techniques of the knee articular cartilage: Problems for routine clinical application. *Eur Radiol* 2004;14(2):184-92. [Crossref](#)
2. Jeffery AK, Blunn GW, Archer CW, Bentley G. Three-dimensional collagen architecture in bovine articular cartilage. *J Bone Joint Surg Br* 1991;73(5):795-801. [Crossref](#)
3. İmren Y, Yüce A. Eklem fizyolojisi ve eklem hastalıklarının patofizyolojik temelleri. *TOTBİD Dergisi* 2022;21:487-91. [Crossref](#)
4. Matzat SJ, van Tiel J, Gold GE, Oei EH. Quantitative MRI techniques of cartilage composition. *Quant Imaging Med Surg* 2013;3(3):162-74.
5. Shah AJ, Patel D. Imaging update on cartilage. *J Clin Orthop Trauma* 2021;22:101610. [Crossref](#)
6. Roemer FW, Demehri S, Omoumi P, Link TM, Kijowski R, Saarakkala S, et al. State of the art: Imaging of osteoarthritis-revisited 2020. *Radiology* 2020;296(1):5-21. [Crossref](#)
7. Roemer FW, Crema MD, Trattng S, Guermazi A. Advances in imaging of osteoarthritis and cartilage. *Radiology* 2011;260(2):332-54. [Crossref](#)
8. Hunter DJ, Guermazi A. Imaging techniques in osteoarthritis. *PM R* 2012;4(5 Suppl):S68-74. [Crossref](#)
9. Hunter DJ, Zhang YQ, Tu X, Lavalley M, Niu JB, Amin S, et al. Change in joint space width: Hyaline articular cartilage loss or alteration in meniscus? *Arthritis Rheum* 2006;54(8):2488-95. [Crossref](#)
10. Amin S, LaValley MP, Guermazi A, Grigoryan M, Hunter DJ, Clancy M, et al. The relationship between cartilage loss on magnetic resonance imaging and radiographic progression in men and women with knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum* 2005;52(10):3152-9. [Crossref](#)
11. Roemer FW, Guermazi A, Demehri S, Wirth W, Kijowski R. Imaging in osteoarthritis. *Osteoarthr Cartil* 2022;30(7):913-34. [Crossref](#)
12. Conaghan PG, D'Agostino MA, Le Bars M, Baron G, Schmidely N, Wakefield R, et al. Clinical and ultrasonographic predictors of joint replacement for knee osteoarthritis: Results from a large, 3-year, prospective EULAR study. *Ann Rheum Dis* 2010;69(4):644-7. [Crossref](#)

13. Bongartz T, Glazebrook KN, Kavros SJ, Murthy NS, Merry SP, Franz WB 3rd, et al. Dual-energy CT for the diagnosis of gout: An accuracy and diagnostic yield study. *Ann Rheum Dis* 2015;74(6):1072-7. [Crossref](#)
14. Vande Berg BC, Lecouvet FE, Poilvache P, Jamart J, Materne R, Lengele B, Maldague B, Malghem J. Assessment of knee cartilage in cadavers with dual-detector spiral CT arthrography and MR imaging. *Radiology* 2002;222(2):430-6. [Crossref](#)
15. De Filippo M, Bertellini A, Pogliacomì F, Sverzellati N, Corradi D, Garlaschi G, et al. Multidetector computed tomography arthrography of the knee: diagnostic accuracy and indications. *Eur J Radiol* 2009;70(2):342-51. [Crossref](#)
16. Crema MD, Roemer FW, Marra MD, Burstein D, Gold GE, Eckstein F, et al. Articular cartilage in the knee: Current MR imaging techniques and applications in clinical practice and research. *Radiographics* 2011;31(1):37-61. [Crossref](#)
17. Link TM, Stahl R, Woertler K. Cartilage imaging: Motivation, techniques, current and future significance. *Eur Radiol* 2007;17(5):1135-46. [Crossref](#)
18. Van Dyck P, Kenis C, Vanhoenacker FM, Lambrecht V, Wouters K, Gielen JL, et al. Comparison of 1.5- and 3-T MR imaging for evaluating the articular cartilage of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2014;22(6):1376-84. [Crossref](#)
19. Mandell JC, Rhodes JA, Shah N, Gaviola GC, Gomoll AH, Smith SE. Routine clinical knee MR reports: Comparison of diagnostic performance at 1.5 T and 3.0 T for assessment of the articular cartilage. *Skeletal Radiol* 2017;46(11):1487-98. [Crossref](#)
20. Gold GE, McCauley TR, Gray ML, Disler DG. What's new in cartilage? *Radiographics* 2003;23(5):1227-42. [Crossref](#)
21. Dunn TC, Lu Y, Jin H, Ries MD, Majumdar S. T2 relaxation time of cartilage at MR imaging: Comparison with severity of knee osteoarthritis. *Radiology* 2004;232(2):592-8. [Crossref](#)
22. Li X, Benjamin Ma C, Link TM, Castillo DD, Blumenkrantz G, Lozano J, et al. In vivo T(1rho) and T(2) mapping of articular cartilage in osteoarthritis of the knee using 3 T MRI. *Osteoarthr Cartil* 2007;15(7):789-97. [Crossref](#)
23. Kijowski R, Blankenbaker DG, Munoz Del Rio A, Baer GS, Graf BK. Evaluation of the articular cartilage of the knee joint: Value of adding a T2 mapping sequence to a routine MR imaging protocol. *Radiology* 2013;267(2):503-13. [Crossref](#)
24. Burstein D, Velyvis J, Scott KT, Stock KW, Kim YJ, Jaramillo D, Boutin RD, Gray ML. Protocol issues for delayed Gd(DTPA) (2-)-enhanced MRI (dGEMRIC) for clinical evaluation of articular cartilage. *Magn Reson Med* 2001;45(1):36-41. [Crossref](#)
25. Bae WC, Dwek JR, Znamirovski R, Statum SM, Hermida JC, D'Lima DD, et al. Ultrashort echo time MR imaging of osteochondral junction of the knee at 3 T: Identification of anatomic structures contributing to signal intensity. *Radiology* 2010;254(3):837-45. [Crossref](#)
26. Thomas KA, Kidziński Ł, Halilaj E, Fleming SL, Venkataraman GR, Oei EHG, et al. Automated classification of radiographic knee osteoarthritis severity using deep neural networks. *Radiol Artif Intell* 2020;2(2):e190065. [Crossref](#)
27. Üreten K, Arslan T, Gültekin KE, Demir AND, Özer HF, Bilgili Y. Detection of hip osteoarthritis by using plain pelvic radiographs with deep learning methods. *Skeletal Radiol* 2020;49(9):1369-74. [Crossref](#)
28. Guan B, Liu F, Haj-Mirzaian A, Demehri S, Samsonov A, Neogi T, et al. Deep learning risk assessment models for predicting progression of radiographic medial joint space loss over a 48-MONTH follow-up period. *Osteoarthr Cartil* 2020;28(4):428-37. [Crossref](#)
29. Padoia V, Lee J, Norman B, Link TM, Majumdar S. Diagnosing osteoarthritis from T2 maps using deep learning: An analysis of the entire osteoarthritis initiative baseline cohort. *Osteoarthr Cartil* 2019;27(7):1002-10. [Crossref](#)