

RADYOLOJİ

ALANINDA GÜNCEL

GELİŞMELER VE

TEMATİK

İNCELEMELER

Editör
Doç. Dr. Emre Gökçen

Radyoloji Alanında Güncel Gelişmeler ve Tematik İncelemeler

Editör

Doç. Dr. Emre Gökçen

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör

Doç. Dr. Emre Gökçen

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım

Ekim, 2026

Yayımcı Sertifika No

45813

ISBN

978-625-6971-99-8

©copyright

Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118

web: www.platanuspublishing.com

e-mail: platanuskitap@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
Karotis Arter Aterosklerotik Plaklarının Değerlendirilmesinde Shear Wave Elastografi	
İbrahim Anıl Deveci	
BÖLÜM 2.....	23
Vur ile Takipli Çocuklarda Renal Parankim Hasarının Değerlendirilmesinde Elastografinin Yeri	
Elif Senem Şahin	
BÖLÜM 3.....	35
Contrast-Enhanced Mammography Versus Breast MRI: Current Evidence and Clinical Applications in Breast Cancer	
Elif Senem Şahin	

BÖLÜM 1

Karotis Arter Aterosklerotik Plaklarının Değerlendirilmesinde Shear Wave Elastografi*

İbrahim Anıl Deveci¹

* Bu bölüm, yazarın Manisa Celal Bayar Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyoloji Anabilim Dalı'nda tamamladığı "Karotis Arter Aterosklerotik Plaklarda Shearwave Elastografi" başlıklı tıpta uzmanlık tezinden üretilmiştir.

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Uşak Üniversitesi Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0003-0507-9857

GİRİŞ

Karotis bifurkasyonu, damar yatağında aterosklerozun en sık yerleştiği bölgelerden biridir. Akımın burada yavaşlaması, ayrılması ve duvara uyguladığı kayma geriliminin düşmesi, endotel hasarını ve plak birikimini kolaylaştırır. Oluşan plak iki ayrı yoldan zarar verir: lümeni daraltıp distal perfüzyonu bozabilir ya da yüzeyi bozulup ülserle olduğunda serebral dolaşıma embolus gönderebilir. İskemik inmelerin kayda değer bir bölümü bu ikinci mekanizmayla, yani hemodinamik olarak anlamlı sayılmayan plaklardan kaynaklanır (Saba vd., 2024; Yao ve Zhang, 2023).

Klinikte kararın dayandığı ölçüt ise hemen tümüyle darlık yüzdesidir. Bu tercihin pratik gerekçeleri açıktır: darlık ölçülebilir, tekrarlanabilir ve geniş randomize çalışmalarla desteklenmiştir. Sorun, aynı yüzdeye sahip iki plağın çok farklı davranabilmesidir. Yüzde kırkılık darlık yaratan yumuşak bir plak hastayı acile getirebilirken, yüzde seksenlik kalsifik bir plak yıllarca sessiz kalabilir. Bu ayrışma, görüntülemekten lümen geometrisinin ötesinde bilgi beklentisini doğurmuştur (Globa ve Derkach, 2024; Saba vd., 2024).

Ultrasonografi, ucuz ve tekrarlanabilir olması sayesinde karotis değerlendirmesinde ilk sırada kalmayı sürdürüyor. Gri skala görüntü plağın ekojenitesini, yüzeyini ve kalsifikasyon yükünü gösterir; Doppler ise akım hızları üzerinden darlığı sınıflar. İkisi de plağın mekanik dayanıklılığı konusunda doğrudan bir ölçüm sunmaz (Grant vd., 2003). Elastografi bu boşluğa yöneliktir.

Bu bölümde shear wave elastografinin fiziksel temelleri, karotis plağındaki uygulama tekniği ve standardizasyon sorunları açıklanmakta; yöntemin plak kompozisyonu ve klinik durumla ilişkisini inceleyen alan yazın özetlenmekte; teknik tuzaklar ve yöntemin çok parametreliliği değerlendirme içindeki yeri tartışılmaktadır.

KAROTİS ATEROSKLEROZUNDA RİSK DEĞERLENDİRMESİNİN MEVCUT ÇERÇEVESİ

Ultrasonografi ile karotis darlıklarının derecelendirilmesinde Society of Radiologists in Ultrasound uzlaşısı kriterleri uzun süredir temel rehberimizdir. Bu kriterler, internal karotis arterdeki pik sistolik hızı birincil ölçüt alırken; diyastol sonu hızı ve internal karotis arterin ana karotis arterine oranını destekleyici parametreler olarak kullanır. Eşik değerler, anjiyografik ölçümde yerleşik olan North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial yöntemiyle tanımlanan darlık yüzdelere göre kalibre edilmiştir. Bu klasik yaklaşımın en büyük gücü, standardize edilmiş olması ve farklı merkezler arasında ortak bir dil kurabilmesinden gelir (Grant vd., 2003).

Sınırlılıkları da aynı ölçüde belirgindir. Akım hızı yalnızca plağa değil, hastanın genel hemodinamiğine de sıkı sıkıya bağlıdır. Düşük kardiyak debi hızları yanıltıcı biçimde düşürebilirken, karşı taraftaki yüksek dereceli bir darlık

kompansevar akım artışına yol açarak incelenen damarı olduğundan daha dar gösterebilir. Aort kapak hastalıkları, probun ölçüm açısı ve örnekleme hacminin yerleşimi de sonuca karışan diğer değişkenlerdir.

Asıl büyük kısıtlılık ise kavramsal düzeydedir. Yalnızca lümen darlığına bakmak bize plağın damar içinde ne kadar yer kapladığını söyler, neyden yapıldığını söylemez. Pozitif yeniden şekillenme sayesinde, içi lipid dolu kırılğan bir plak lümeni hiç daraltmadan sinsice büyüyebilir; buna karşın yoğun kalsifiye olmuş, görece stabil bir plak çok ciddi bir darlık yaratabilir. Özellikle orta dereceli darlık grubunda tedavi kararının bugün hâlâ tartışmalı olmasının temelinde, damarın anatomik görünümü ile plağın biyolojik riski arasındaki bu kopukluk yatar (Globa ve Derkach, 2024; Saba vd., 2024).

Son yıllarda değerlendirmeye darlık dışı özelliklerin katılması yönünde belirgin bir hareket var. Plak yükü, yüzey düzensizliği, ülserasyon, intraplak hemoraji, lipidden zengin nekrotik çekirdek ve neovaskülarizasyon artık risk sınıflamalarında yer buluyor. Yapılandırılmış raporlama sistemleri bu bulguların ortak bir dille aktarılmasını hedefler (Saba vd., 2024). Böylece soru yer değiştirir: damarın ne kadar daraldığından çok, içindeki plağın neyden yapıldığı sorulur hâle gelir.

PLAK KIRILGANLIĞININ YAPISAL VE BİYOMEKANİK TEMELİ

Kırılğan plak kavramı koroner alan yazınından gelir ve karotise sonradan uyarlanmış. Tanımın histopatolojik çekirdeği şudur: geniş bir lipidden zengin nekrotik çekirdek, onu örten ince ve enflamasyonlu fibröz kep, intraplak hemoraji, yoğun makrofaj infiltrasyonu ve adventisyadan uzanan neovaskülarizasyon. Stabil plak ise kalın kepli, görece az lipidli ve çoğu zaman kalsifiktir (Yao ve Zhang, 2023; Globa ve Derkach, 2024).

Bu tabloların her birinin mekanik bir karşılığı vardır ve ayırım görüntülemeye yansiyacak kadar keskindir. İnme riskini doğrudan artıran lipidden zengin nekrotik çekirdek ile plak içi kanama, düşük elastik modüllü yapılardır; kayma dalgalarını yavaşlatarak ölçümde yumuşak bir doku profili verirler. Buna karşılık stabil kabul edilen kalsifik ve yoğun fibröz alanlar dalgayı hızla ileten, belirgin biçimde sert değerler üreten bileşenlerdir. İnsan karotis endarterektomi materyalinde yapılan eksenel basınç ölçümleri, bileşenler arasındaki bu farkın ölçülebilir büyüklükte olduğunu göstermiştir (Chai vd., 2013). Widman ve arkadaşları (2016) ise domuz arterinde oluşturdukları sertleştirilmiş segmenti elastografiyle ayırt edebilmişlerdir. İki çalışma birlikte, yöntemin dayandığı temel varsayımı deneysel olarak destekler.

Rüptürün mekaniği de buradan okunur. Yumuşak ve geniş bir çekirdek, üstündeki ince kepte gerilim yoğunlaşmasına yol açar; gerilim kepin dayanımını aştığında yırtılma, ardından trombus ya da emboli gelişir. Hasta özelinde yapılan hesaplamalı modellemeler, gerilim dağılımının plak geometrisi, bileşen yerleşimi

ve mekanik özelliklerin birlikte işlevi olduğunu ortaya koymaktadır (Curcio vd., 2025). Sertliğin kantitatif ölçümü, bu zincirin ilk halkasına, yani kompozisyona dolaylı bir pencere açar.

Kompozisyonun Raporlanması: Plaque-RADS Sınıflaması

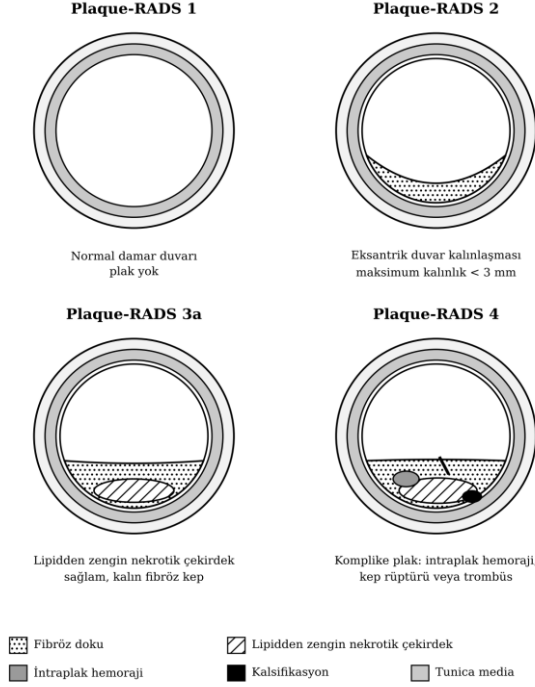
Buraya kadar anlatılanlar kırılğan plağın neye benzediğini tarif eder. O hâlde sorulması gereken soru şudur: kırılğanlığın bileşenleri bu kadar iyi tanımlanmışken, bu bulgular neden rutin karotis raporlarına girmemiştir? Cevap bilgi eksikliğinde değil, ortak dilin yokluğundadır. Akciğer, meme, prostat, karaciğer ve koroner görüntülemelerde yapılandırılmış raporlama sistemleri yerleşmişken karotis plağı için eşdeğer bir sistem bulunmuyordu. Saba ve arkadaşlarının (2024) geniş katılımlı bir uzlaş paneliyle geliştirdiği Plaque-RADS, bu boşluğu doldurmak üzere tasarlanmıştır. Sistem damar başına uygulanır, ultrasonografi, bilgisayarlı tomografi anjiyografi ve manyetik rezonans görüntüleme ile kullanılabilir ve darlık yüzdesini dışlamak yerine ona morfolojik bir değerlendirme ekler. Kategoriler ve karşılık gelen risk düzeyleri Tablo 1 içinde verilmiştir.

Tablo 1: Plaque-RADS Kategorileri, Görüntüleme Bulguları ve Atfedilen Risk (Saba vd., 2024)

Skor	Atfedilen Risk	Görüntüleme Bulgusu
1	Yok	Normal damar duvarı
2	Düşük	Maksimum duvar kalınlığı < 3 mm
3	Orta	Maksimum duvar kalınlığı $\geq$ 3 mm veya iyileşmiş ülsere plak
3a	Orta	Lipidden zengin nekrotik çekirdek, sağlam ve kalın fibröz kep
3b	Orta	Lipidden zengin nekrotik çekirdek, ince fibröz kep
3c	Orta	İyileşmiş ülsere plak
4	Yüksek	Komplike plak (duvar kalınlığından bağımsız)
4a	Yüksek	İntraplak hemoraji
4b	Yüksek	Rüptüre fibröz kep
4c	Yüksek	İntraluminal trombüs

Sınıflamaya eşlik eden yardımcı bulgular arasında enflamasyon, neovaskülarizasyon, pozitif yeniden şekillenme, plak yükü, darlığın ilerlemesi ve

kalsifikasyon sayılır. Sınırlı tanısal inceleme, stent varlığı ve geçirilmiş endarterektomi ise birer belirteç olarak rapora eklenir. Kategorilerin damar kesitindeki şematik karşılığı Şekil 1 içinde gösterilmiştir.



Şekil 1: Plaque-RADS Kategorilerinin Damar Kesitindeki Şematik Görünümü

Kategoriler 1'den 4'e doğru artan plak kırılabilirliğini yansıtır. Şekil, Plaque-RADS kategorileri temel alınarak yazar tarafından çizilmiştir (Saba vd., 2024).

Tabloya dikkatle bakıldığında bir şey göze çarpar. Plaque-RADS kategorilerini ayıran ölçütlerin tamamı morfolojiktir: duvar kalınlığı, kepin kalınlığı ince mi olduğu, hemorajinin bulunup bulunmadığı. Bunların her biri plağın mekanik durumunun bir göstergesidir, ama hiçbirisi mekanik bir ölçüm değildir. İnce kep ile kalın kep ayrımı gözle ya da sinyal özelliğiyle yapılır; kepin ne kadar gerilime dayanacağı doğrudan ölçülmez. Yani sistem, kırılabilirliği onun görünür izlerinden okur.

Buradan iki soru çıkar. Birincisi, morfolojik vekiiller yeterince güvenilir midir? Sınıflamanın kendisi bunu kabullenmiş görünüyor; sınırlı tanısal inceleme için ayrı bir belirteç tanımlanmış olması, bulguların her zaman net ayırt edilemediğinin itirafıdır. İkincisi ve daha önemlisi: kırılabilirliğin altında yatan özellik mekanikse, bu özelliği vekilleri üzerinden değil doğrudan ölçmek mümkün müdür? Elastografiye yönelen ilgi, tam da bu ikinci sorunun peşinden gitmektedir.

KONVANSİYONEL ULTRASONOGRAFI İLE PLAK KARAKTERİZASYONU

Gri Skala Değerlendirme ve Ekojenite Sınıflamaları

Gri skala görüntüde plaklar ekojenitelerine göre gruplanır. En yerleşik ölçeklerden biri Grey-Weale sınıflamasıdır; kategorileri ve yapısal karşılıkları Tablo 2 içinde verilmiştir.

Tablo 2: Grey-Weale Plak Sınıflaması ve Yapısal Karşılığı

Tip	Ultrasonografik Görünüm	Baskın İçerik	Analizde Gruplama
Tip 1	Tamamen ekolusen	Lipid, hemoraji	Hipoekoik
Tip 2	Ağırlıklı ekolusen	Lipidden zengin, kısmen fibröz	Hipoekoik
Tip 3	Ağırlıklı ekojen	Fibröz, kısmen lipid	Mikst / hiperekoik
Tip 4	Tamamen ekojen	Fibröz	Mikst / hiperekoik
Tip 5	Yoğun kalsifikasyon, akustik gölgelenme	Kalsifik	Kalsifik / sınıflandırılmayan

Yaygın kabul, hipoeoik plakların lipid ve hemorajiden zengin olup daha kırılgan davrandığı, ekojen plakların ise fibröz içerikli ve görece stabil olduğudur. Sınıflamanın zayıf noktası ölçümün kendisinde değil, görüntünün oluşturulma biçimindedir. Kazanç, dinamik aralık, prob frekansı ve odak derinliği değiştiğinde aynı plak farklı ekojenitede görünebilir. Karar görsel yargıya dayandığından gözlemciler arası uyum da sınırlı kalır. Gri skala medyanı gibi yarı kantitatif yaklaşımlar öznelliği azaltmak için geliştirildi; ancak görüntü normalizasyonunun merkezler arasında standartlaştırılamaması sorunu sürdürüyor (Globa ve Derkach, 2024).

Doppler ile Darlık Derecelendirmesi

Doppler değerlendirmesi darlık derecesini belirlemede temel yöntem olmayı sürdürür; buna karşılık plağın yapısı hakkında doğrudan bilgi vermez, yalnızca akıma yansıyan etkisini gösterir (Grant vd., 2003).

Burada bir ayrımın altını çizmek gerekir. Ekojenite akustik empedans farklarının görüntüye yansımalarıdır; sertlik ise dokunun deformasyona gösterdiği direnci ifade eder. İki özellik birbiriyle ilişkilidir, ama aynı şey değildir. Elastografinin katkısı tam da bu noktada başlar: ekojeniteden ve akım hızından bağımsız, doğrudan mekanik bir ölçüm sunar.

ELASTOGRAFİNİN FİZİKSEL TEMELLERİ VE YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Strain Elastografi

Strain elastografide dokuya dışarıdan basınç uygulanır; bu basınç prob yoluyla ya da kardiyovasküler pulsasyon gibi fizyolojik bir kaynaktan gelebilir. Görüntülenen şey, doku içindeki göreceli deformasyondur. Çıktı nitel veya yarı niceldir ve uygulanan basınca bağlıdır, dolayısıyla hastalar arasında karşılaştırılmaz. Damar duvarı gibi yüzeyel ve sürekli hareket hâlindeki bir hedefte uygulanan basıncı standartlaştırmak da ayrıca güçtür.

Shear Wave Elastografi

Shear wave elastografinin işleyişi farklıdır. Prob, odaklanmış ve çok kısa süreli bir akustik radyasyon kuvveti darbesi göndererek dokuda yerel bir itme oluşturur. Bu itme, ultrason demetine dik doğrultuda ilerleyen kayma dalgaları doğurur. Cihaz, saniyede binlerce kare alabilen bir görüntüleme moduyla bu dalgaların hızını ölçer. Sert dokuda dalga hızlı, yumuşak dokuda yavaş yayılır.

Ölçülen hız, dokunun homojen, izotropik ve lineer elastik olduğu varsayımıyla önce kayma modülüne, sonra Young modülüne çevrilir; Young modülü kabaca doku yoğunluğu ile dalga hızının karesinin çarpımının üç katıdır. Sonuç kilopaskal cinsinden bir sertlik değeri ya da doğrudan metre bölü saniye cinsinden hız olarak verilir. Strain elastografiden ayrıldığı nokta budur: değer mutlakdır, aynı cihazda tekrarlanabilir ve hastalar arasında karşılaştırılabilir (Ramnarine vd., 2014; Pruijssen vd., 2020).

Raporlama biriminin seçimi de görüldüğünden önemlidir. Metre bölü saniye cinsinden hız, cihazın doğrudan ölçtüğü büyüklüktür. Kilopaskal ise bu hızdan türetilir ve türetme sırasında doku yoğunluğunun suyunkine eşit olduğu varsayılır. Kalsifikasyon içeren bir plakta bu varsayım bozulur; hesaplanan kilopaskal değeri gerçek elastik modülden sapar. Hız cinsinden raporlama, en azından bu ek varsayımı devreye sokmadığı için daha şeffaftır. Alan yazında her iki birim de kullanıldığından, çalışmalar karşılaştırılırken hangisinin bildirildiğine dikkat edilmelidir.

Yöntemin kendi içinde de türleri vardır. Nokta shear wave elastografide tek bir küçük hacimden hız okunur; iki boyutlu uygulamada ise geniş bir alanın renkli sertlik haritası çıkarılır ve ilgi alanı bu harita üzerine yerleştirilir. Küçük, heterojen ve sınırları keskin bir hedefte ölçüm yerinin gözle denetlenebilmesi önemli bir üstünlüktür; karotis plağında iki boyutlu yöntemin tercih edilmesinin sebebi budur.

Yöntemlerin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Elastografi teknikleri uyarım kaynağı, çıktının niceliksel olup olmaması, uygulayıcıya bağımlılığı ve vasküler yapıda kullanılabilirliği bakımından ayrışır. Tablo 3 bu farkları özetlemektedir.

Tablo 3: Elastografi Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem	Uyarım Kaynağı	Çıktı	Uygulayıcı Bağımlılığı	Karotis Plağında Kullanım
Strain elastografi	Dış basınç veya fizyolojik hareket	Görelî, nitel/yarı nicel	Yüksek	Sınırlı
Nokta shear wave elastografi	Akustik radyasyon kuvveti	Mutlak (kPa veya m/s), tek hacim	Orta	Kısmen uygun
İki boyutlu shear wave elastografi	Akustik radyasyon kuvveti	Mutlak, renkli sertlik haritası	Orta	Tercih edilen
Geçici (transient) elastografi	Mekanik vibratör	Mutlak, görüntü eşliği yok	Düşük	Uygun değil

Tablodan iki sonuç çıkar. Strain elastografinin ürettiği görelî değerler hastalar arası karşılaştırmaya elverişli değildir. Geçici elastografi ise görüntü eşliği olmadan çalıştığı için küçük bir hedefi seçerek örnekleyemez; zaten karaciğer gibi büyük ve homojen organlar düşünülerek geliştirilmiştir. Geriye akustik radyasyon kuvveti temelli yöntemler kalır.

Hesaplamanın dayandığı varsayımların plak için ne kadar geçerli olduğu ise ayrı bir tartışmadır. Plak homojen değildir; lipid, fibröz doku, hemoraji ve kalsifikasyonu değişen oranlarda barındırır. İzotropik de değildir, çünkü tabakalı yapısı mekanik özellikleri yöne göre farklılaştırır. Üstelik damar duvarı kardiyak siklus boyunca değişen bir ön gerilim altındadır. Elde edilen kilopaskal değerini mutlak bir doku özelliği gibi değil, belirli koşullarda alınmış görelî bir ölçüm gibi okumak gerekir (Pruijssen vd., 2020; Curcio vd., 2025).

KAROTİS PLAĞINDA UYGULAMA TEKNİĞİ VE ÖLÇÜM STANDARDİZASYONU

Elde edilen değerîn güvenilirliği, büyük ölçüde nasıl ölçüldüğüne bağlıdır. Alan yazındaki protokoller birbirinden farklıdır; yine de üzerinde görece uzlaşmış birkaç ilke sayılabilir.

Hasta Hazırlığı ve Ön Değerlendirme

Hasta sırtüstü yatırılır, boyun hafifçe ekstansiyona alınır ve baş karşı tarafa çevrilir. Yüksek frekanslı lineer prob kullanılır. Elastografiye geçmeden önce B-mod ve Doppler incelemesi tamamlanır; plağın yeri, boyutu, ekojenitesi ve akustik sınırlılıkları bu aşamada belirlenir. Elastografi bu değerlendirmenin yerine geçmez, üzerine eklenir. Birden fazla plak varsa çalışmalar genellikle en yüksek darlığı yaratanı indeks lezyon kabul eder ve hasta başına tek plak analiz ederek birey içi korelasyon sorununu önler.

Prob Basıncı ve Akuzisyon

Tek bir kural diğerlerinden önce gelir: proba basınç uygulanmaz. Basınç dokuyu önceden sıkıştırır ve ölçülen sertliği yapay olarak yükseltir. Karotis gibi yüzeyel bir damarda bu etki özellikle belirgindir. Prob plağa dik tutulmalı, yalnızca jel teması sağlanmalı ve birkaç saniye hareketsiz bekletilmelidir. Solunumun katkısını azaltmak için akuzisyonun kısa bir nefes tutma sırasında yapılması önerilir.

Kalite Kontrolü ve İlgi Alanı Yerleşimi

Ölçümden önce kalite denetimi yapılmalıdır. Pek çok cihaz, kayma dalgasının yayılımını gösteren bir propagasyon haritası sunar. Haritadaki çizgilerin düzgünleşip birbirine paralel hâle gelmesi, akuzisyonun güvenilir olduğunun göstergesi sayılır. Çizgiler düzensiz, kesik ya da hiç oluşmamışsa ölçüm tekrarlanır. Hareketli ve pulsatil bir hedefte çalışıldığı düşünülürse bu adımın atlanması doğrudan hata demektir.

İlgi alanı plağın boyutuna uygun seçilir; alan yazında sıklıkla 2 mm çapında sabit bir alan kullanılır. Alan tümüyle plağın içinde kalmalı, lümeni, komşu duvarı, gölgelenmiş bölgeleri ve hareket artefaktı olan kesimleri dışarıda bırakmalıdır. Tek noktadan alınan değer yerine, plağın farklı bölgelerinden tekrarlanan ölçümlerin ortalaması plak içi heterojenitenin yarattığı dağılımı daraltır (Ramnarine vd., 2014; Carter vd., 2022).

Görüntüleme Düzlemi ve Kardiyak Siklus

Düzlem seçimi de sonuca karışır. Longitudinal kesit plağın uzunlamasına yapısını gösterirken, aksiyel kesit kalınlığın en iyi değerlendirildiği düzlemdir. Damar duvarı anizotropik olduğundan iki düzlemden alınan değerler farklılaşabilir; bazı protokoller her ikisinden ölçüm alıp ortalamasını kullanır. Kardiyak sıklusa bağlı dalgalanmayı azaltmak için elektrokardiyografiyle eş zamanlı akuzisyon öneren çalışmalar vardır, ancak ek donanım gerektirdiği ve inceleme süresini uzattığı için rutine girmemiştir (Mbroh vd., 2023; Pruijsen vd., 2020).

Ölçümün Raporlanması

Elastografi raporunun, ölçülen sayıdan daha fazlasını içermesi gerekir. Kilopaskal değeri tek başına hiçbir şey ifade etmez; hangi koşullarda elde edildiği

bilinmeden başka bir inceleme veya başka bir merkezle karşılaştırılmaz. Rapora en azından şunlar girmelidir: cihaz ve prob modeli, kullanılan ön ayar, ilgi alanının çapı ve plak içindeki yerleşimi, ölçüm düzlemi, tekrar sayısı ve hesaplanan ortalama ile dağılım. Gölgeleme nedeniyle ölçüm dışı bırakılan bir bileşen varsa bu da belirtilmelidir, çünkü raporlanan değer o durumda plağın tamamını değil yalnızca ölçülebilen kesimini temsil eder.

Takip incelemelerinde aynı protokolün tekrarlanması ayrıca önem taşır. Aynı hastada farklı cihazla ya da farklı ilgi alanı boyutuyla alınan bir ölçümü öncekiyle kıyaslamak, zaman içindeki gerçek değişimi değil yöntem farkını ölçmek anlamına gelir.

Ölçüm Tekrarlanabilirliği

Bir görüntüleme belirtcinin klinikte kullanılabilmesi için tekrarlanabilirliğinin gösterilmiş olması şarttır. Ramnarine ve arkadaşları (2014), standart koşullarda hem gözlemci içi hem gözlemciler arası uyumun makul düzeyde olduğunu bildirmişlerdir. Sonraki serilerin önemli bir bölümünde ise ölçümleri tek bir kişi yapmış ve tekrarlanabilirlik ayrıca değerlendirilmemiştir. Alanın en belirgin metodolojik açığı budur ve bildirilen eşik değerlerin başka merkezlere taşınmasını zorlaştırır (Mbroh vd., 2023).

GÜNCEL ALAN YAZIN: SERTLİK, PLAK KOMPOZİSYONU VE KLİNİK DURUM

Alanın kurucu çalışmalarından biri, yöntemin in vivo uygulanabilir ve tekrarlanabilir olduğunu, plak sertliğinin ölçülebildiğini ve klinik bir karşılığı olabileceğini ortaya koymuştur (Ramnarine vd., 2014). Sonraki seriler sertliğin ekojenite, kompozisyon ve semptomatik durumla ilişkisini aramıştır. Başlıca çalışmalar ve katkıları Tablo 4 içinde toplanmıştır.

Tablo 4: Karotis Plağı Shear Wave Elastografisine İlişkin Başlıca Çalışmalar ve Temel Katkıları

Çalışma	Odak	Temel Katkı
Chai vd. (2013)	Ex vivo mekanik ölçüm	Plak bileşenlerinin eksenel mekanik özelliklerinin geniş bir aralıkta değiştiğini göstermiştir
Ramnarine vd. (2014)	Fizibilite ve tekrarlanabilirlik	Yöntemin in vivo uygulanabilir ve tekrarlanabilir olduğunu ortaya koymuştur
Widman vd. (2016)	Deneysel damar modeli	Sertleştirilmiş arter segmentlerinin elastografiyle ayırt edilebildiğini göstermiştir
Lou vd. (2017)	Semptomatik plak özellikleri	Semptomatik plaklarda daha düşük sertlik değerleri bildirmiştir

Shang vd. (2018)	Biyokimyasal belirteç ilişkisi	Plak sertliği ile serum homosistein düzeyi arasında ilişki bildirmiştir
Di Leo vd. (2018)	Çok parametrelili değerlendirme	Kontrastlı ultrasonografiyle birlikte kullanımın risk sınıflamasına katkısını göstermiştir
Sivasankar vd. (2019)	Plak kırılabilirliği	Karşılaştırmalı gözlemsel tasarımda kırılabilirlik ile sertlik ilişkisini incelemiştir
Marlevi vd. (2020)	MRG ile doğrulama	Frekansa bağlı elastografinin kırılabilir plakları saptadığını MRG ile doğrulamıştır
Skoloudik vd. (2021)	Stabil olmayan plak	Yöntemin stabil olmayan plakların tanımlanmasına katkı sağladığını bildirmiştir
Carter vd. (2022)	Kantitatif karakterizasyon	Pilot tasarımda ölçüm protokolünün uygulanabilirliğini değerlendirmiştir
Alzahrani vd. (2025)	Kardiyak cerrahi hastaları	Koroner baypas planlanan hastalarda ölçümün uygulanabilirliğini göstermiştir

Lou ve arkadaşları (2017) semptomatik plaklarda asemptomatiklere kıyasla daha düşük sertlik değerleri saptamış; Skoloudik ve arkadaşları (2021) yöntemin stabil olmayan plakların tanımlanmasına katkı verdiğini bildirmiştir. Shang ve arkadaşlarının (2018) iskemik inme hastalarında yürüttüğü çalışma, sertliğin serum homosistein düzeyiyle de ilişkilenebileceğine işaret etmiştir. Kantitatif karakterizasyonu konu alan pilot seriler ve karşılaştırmalı gözlemsel çalışmalar da aynı yönü göstermektedir (Sivasankar vd., 2019; Carter vd., 2022).

Yöntemin tek başına değil, başka parametrelerle birlikte daha güçlü olduğuna dair veriler de birikmiştir. Kontrastlı ultrasonografi ile elastografinin birlikte kullanıldığı çok parametrelili değerlendirme, risk sınıflamasına katkı sağlamıştır (Di Leo vd., 2018). Koroner baypas planlanan hastalarda yapılan güncel bir çalışma ise ölçümün bu özel grupta da uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Alzahrani vd., 2025).

Alanın en ikna edici kanıtı ise bağımsız bir referans yöntemle yapılan doğrulamadan gelmektedir. Marlevi ve arkadaşları (2020), uzaysal-zamansal ve frekansa bağlı elastografi yaklaşımının kırılabilir plakları saptadığını manyetik rezonans görüntülemeyle doğrulamışlardır. Bu bulgu, elastografinin ölçtüğü mekanik bilginin biyolojik olarak anlamlı olduğunu destekler.

Sistemik derlemeler yine de temkinli konuşuyor. Karotis plak kırılabilirliğine odaklanan bir derleme, çalışmalar arasında belirgin metodolojik heterojenite bulunduğunu ve bildirilen sertlik değerlerinin geniş bir aralığa yayıldığını saptamıştır (Mbroh vd., 2023). Aterosklerotik arterlerde vasküler elastografiyi tarayan bir diğeri, akuzisyon protokolleri, cihaz özellikleri ve analiz yöntemlerindeki farklılıkların doğrudan karşılaştırmayı engellediğini vurgulamıştır (Pruijssen vd., 2020). Tek tek çalışmalarda bildirilen eşik değerlerin başka bir merkezde aynen kullanılması, bu yüzden güvenli değildir.

TEKNİK KISITLILIKLAR VE TUZAKLAR

Kalsifikasyon ve Akustik Gölgeleme

Kalsifikasyon, yöntemin en can sıkıcı sorunudur. Yoğun kalsifiye alanlar kayma dalgasının yayılmasını engeller ve gölgeleme bölgesinde güvenilir ölçüm yapılamaz. Sorun çift yönlüdür: en sert bileşen ölçümün dışında kalır, buna ek olarak gölge alanından okunan hatalı değerler sonucu bozar. Pratikte tam gölgeleme gösteren plaklar değerlendirmeye alınmamalı; kısmi kalsifikasyon varsa yalnızca gölgelememiş bileşenden ölçüm yapılmalıdır. Böyle bir seçim kaçınılmaz olarak seçim yanlılığı doğurur ve çalışma sonuçlarında açıkça belirtilmelidir.

Plak Heterojenitesi ve Anizotropi

Aynı plağın lipid çekirdeği ile fibröz kepi arasında belirgin sertlik farkı bulunabilir. Tek bir ilgi alanından okunan değer plağın tamamını temsil etmeyebilir; ölçümü birkaç noktadan tekrarlamak bu sorunu ortadan kaldırmaz, yalnızca hafifletir. Duvarın tabakalı ve yönelimli yapısından doğan anizotropi ise dalga hızını ölçüm düzlemine göre değiştirerek hesaplamadaki izotropi varsayımını zayıflatır (Curcio vd., 2025).

Pulsatilité, Prob Basıncı ve Derinlik

Damar duvarının gerilimi kardiyak siklus boyunca değişir. Sistolde gerilmiş bir duvar diyastoldekinden daha yüksek sertlik verebilir; akuzisyon zamanı siklusa göre sabitlenmediğinde bu dalgalanma ölçüm hatasına eklenir. Prob basıncı daha önce vurgulandı; deneyimsiz ellerde değerleri sistemik olarak yükseltir. Lezyon derinleştikçe akustik radyasyon kuvveti zayıflar ve sinyal gürültü oranı düşer.

Cihazlar Arası Farklılık

Alan yazının bütünleştirilmesinin önündeki en temel engel, cihazlar arası uyumsuzluktur. İtme darbesinin özellikleri, kare hızı, rekonstrüksiyon algoritmaları ve üreticinin tanımladığı ön ayarlar üreticiden üreticiye değişir. Bir cihazda okunan kilopaskal değerini başka bir cihaza taşımak güvenilir değildir. Karaciğer elastografisinde yaşanan ve ancak uzun uzlaş çalışmalarıyla kısmen

aşılabilen sorunun vasküler karşılığı budur (Pruijssen vd., 2020; Mbroh vd., 2023).

Öğrenme Eğrisi ve Uygulayıcı Deneyimi

Karotis elastografisi, karaciğer elastografisinden belirgin biçimde daha fazla el becerisi ister. Hedef küçüktür, yüzeyeldir, sürekli hareket hâlinindedir ve hemen yanından kan akmaktadır. Uygulayıcının prob basıncını sıfıra yakın tutması, probu birkaç saniye sabit tutabilmesi, propagasyon haritasını doğru okuması ve ilgi alanını milimetrik hassasiyetle yerleştirmesi gerekir. Vasküler ultrasonografide deneyimli bir hekimde bile bu beceriler belirli sayıda uygulamadan sonra oturur. Serilerin çoğunda ölçümleri tek ve deneyimli bir kişinin yapmış olması, sonuçların günlük pratiğe aktarılabilirliği açısından akılda tutulmalıdır (Ramnarine vd., 2014; Mbroh vd., 2023).

Yöntemi kullanıma almayı düşünen bir merkeze önerilebilecek pratik yol şudur: önce belirli sayıda eğitim incelemesi yapmak, ardından aynı hastada farklı günlerde tekrarlanan ölçümlerle merkez içi değişkenliği belirlemek. Böyle bir iç kalibrasyon yapılmadan dışarıdan alınan eşik değerleri uygulamak yanıltıcı olur.

Yanlış Yüksek ve Yanlış Düşük Değerlerin Kaynakları

Günlük pratikte karşılaşılan hataları iki grupta toplamak işi kolaylaştırır. Yanlış yüksek değer çoğunlukla prob basıncından, gölgelenmiş bir alanın ilgi alanına girmesinden, sistolde yapılan akuzisyonun ya da ilgi alanının plak sınırını aşp komşu kalsifik odağı içine almasından kaynaklanır. Yanlış düşük değer ise genellikle ilgi alanının kısmen lümene taşması, derin yerleşimli bir plakta sinyalin zayıflaması veya hareket artefaktı nedeniyle dalga yayılımının bozulmasıyla ortaya çıkar.

Her iki durumda da ortak uyarı işareti aynıdır: propagasyon haritasındaki düzensizlik. Elde edilen değer beklenenden belirgin biçimde sapmışsa, önce haritaya dönüp akuzisyonun kalitesini sorgulamak gerekir. Aykırı bir sayıyı olduğu gibi rapora taşımak yerine ölçümü yinelemek, hem bireysel incelemede hem de çalışma verisinde en etkili düzeltme yöntemidir.

İlgi Alanı ve Plak Boyutu Uyumsuzluğu

İnce plaklarda standart boyuttaki bir ilgi alanının tümüyle plak içinde kalması her zaman mümkün olmaz; komşu dokudan gelen kirlenme ölçümü bozar. Çalışmalarda ölçülebilir plak için asgari bir kalınlık eşiği tanımlanması bu yüzden yaygınlaşmıştır. Çok küçük plaklarda ayrıca kayma dalgası yeterli mesafe kat edemediğinden hız hesabının güvenilirliği düşer.

ÇOK PARAMETRELİ DEĞERLENDİRME VE GELECEK YÖNELİMLERİ

Alan yazındaki yönelim, tek bir belirteç aramaktan vazgeçip birden fazla parametreyi birlikte okumaya doğrudur. Yapılandırılmış raporlama sistemleri plak morfolojisini, kırılabilirlik bulgularını ve klinik bağlamı ortak bir çerçevede toplamayı amaçlar (Saba vd., 2024). Elastografi bu çerçevede erişilebilir ve gerçek zamanlı bir mekanik parametre olarak yer bulabilir; B-mod ve Doppler değerlendirmesinin yerine geçmesi ise söz konusu değildir.

Hafif darlığı olan hastalarda yüksek kare hızlı vektör akım görüntüleme ile elastografi belirteçlerini birlikte değerlendiren çalışmalar, hemodinamik ve mekanik bilginin birleştirilmesinden ek değer çıkabileceğini göstermektedir (Zhao vd., 2025). Ultrasonografi temelli risk skorları da benzer bir mantığı izler (Li vd., 2021). Histolojik kanıttan hasta özelinde modellemeye uzanan biyomekanik çalışmalar ise mekanik, morfolojik ve hemodinamik biyobelirteçlerin birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Curcio vd., 2025).

Alanın önündeki asıl iş standardizasyondur. Akuzisyon protokolünün, ilgi alanı yerleşiminin, kalite kontrol ölçütlerinin ve raporlama biçiminin uzlaşısıyla tanımlanması, çalışmaları karşılaştırılabilir kılacaktır. Buna ek olarak gözlemciler arası tekrarlanabilirliği bağımsız ve tekrarlı akuzisyonlarla ölçen çalışmalara, histopatolojik doğrulama içeren serilere ve klinik sonlanımı prospektif izleyen çok merkezli kohortlara ihtiyaç vardır. Mevcut alan yazının ağırlığı küçük örneklemli, tek merkezli ve kesitsel çalışmalardadır; bildirilen ilişkilerin nedensel okunamamasının sebebi de budur (Pruijssen vd., 2020; Mbroh vd., 2023; Zhao vd., 2025).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Shear wave elastografi, karotis plağının sertliğini non-invaziv ve kantitatif biçimde ölçebilen, pratikte uygulanabilir bir yöntemdir. Elde edilen değerler plak ekojenitesi ve kompozisyonuyla tutarlı davranır: hipoekoik ve lipidden zengin plaklarda düşük, fibröz ve kalsifik plaklarda yüksek sertlik ölçülür. Semptomatik plaklarda daha düşük değerler bildiren çalışmalar vardır, ancak bu ilişkinin gücü ve ayırt edici değeri yeterince gösterilmiş değildir.

Klinik kullanıma geçişi geciktiren etkenler sıralanabilir: kalsifikasyona bağlı teknik kısıtlılıklar, plak heterojenitesi ve anizotropisi, arteriyel pulsatilitenin etkisi ve cihazlar arası standardizasyon eksikliği. Bugünkü kanıt düzeyinde elastografinin bireysel hasta düzeyinde tedavi kararına esas alınması uygun olmaz. Yöntemin yeri, bağımsız bir risk belirteci olmak değil, konvansiyonel ultrasonografiye kompozisyon bilgisi ekleyen tamamlayıcı bir parametre olmaktır.

Uygulamaya Yönelik Öneriler

Elastografi uygulayacak hekim için en önemli öneri, ölçümü standart bir protokole bağlamaktır. Proba basınç uygulanmamalı, akuzisyon öncesinde

propagasyon haritası üzerinden kalite denetimi yapılmalı, ilgi alanı tümüyle plak içinde ve gölgelenmesiz bölgeye yerleştirilmeli, ölçüm birkaç noktadan tekrarlanarak ortalananmalıdır. Kullanılan cihaz, prob, ön ayar, ilgi alanı boyutu, ölçüm düzlemi ve tekrar sayısı rapor ve yayınlarda mutlaka belirtilmelidir; bu bilgiler olmadan verilen kilopaskal değeri yorumlanamaz. Tam kalsifiye plaklarda ölçüm yapılmamalı, kısmi kalsifikasyonda yalnızca ölçülebilir bileşen değerlendirilmeli ve bu durum raporda not edilmelidir.

Araştırmaya Yönelik Öneriler

Alanda öncelik taşıyan araştırma başlıkları şunlardır: bağımsız ve tekrarlı akuzisyonlarla gözlemciler arası tekrarlanabilirliğin ölçülmesi; endarterektomi materyali üzerinden histopatolojik doğrulama yapılması; aynı hasta grubunda farklı cihazlarla eş zamanlı ölçüm alınarak cihazlar arası uyumun belirlenmesi; elastografinin ekojenite, kontrastlı ultrasonografi bulguları ve akım belirteçleriyle birlikte okunduğu çok parametrelili modellerin kurulması. Hepsinin ötesinde, klinik sonlanımı prospektif izleyen çok merkezli kohortlara ihtiyaç vardır. Bu adımlar tamamlandığında yöntemin karotis hastalığının risk sınıflamasına anlamlı katkı vermesi beklenebilir.

KAYNAKÇA

- Alzahrani, A., Alharbi, A. A., Alharbi, A. K. vd. (2025). Evaluating Carotid Plaque Stiffness with Ultrasound 2D Shear-Wave Elastography in Patients Undergoing Coronary Artery Bypass Grafting. *Diagnostics*, 15(3), 338.
- Carter, M., Hall, T. ve Baun, J. (2022). Carotid Plaque Characterization Using Quantitative Shear Wave Elastography: A Pilot Study. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 38(3), 257-262.
- Chai, C. K., Akyildiz, A. C., Speelman, L. vd. (2013). Local Axial Compressive Mechanical Properties of Human Carotid Atherosclerotic Plaques. *Journal of Biomechanics*, 46(10), 1759-1766.
- Curcio, N., Conti, M., Cardani, R. vd. (2025). Biomechanical Assessment of Vulnerable Plaque: From Histological Evidence to Ultrasound Elastography and Image-Based Computational Patient-Specific Modelling. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1478408.
- Di Leo, N., Venturini, L., de Soccio, V. vd. (2018). Multiparametric Ultrasound Evaluation with CEUS and Shear Wave Elastography for Carotid Plaque Risk Stratification. *Journal of Ultrasound*, 21(4), 293-300.
- Globa, M. V. ve Derkach, B. V. (2024). Modern Approaches to Ultrasonographic Assessment of Carotid Plaque in Terms of Its Potential Instability. *Wiadomosci Lekarskie*, 77(5), 919-925.
- Grant, E. G., Benson, C. B., Moneta, G. L. vd. (2003). Carotid Artery Stenosis: Gray-Scale and Doppler US Diagnosis - Society of Radiologists in Ultrasound Consensus Conference. *Radiology*, 229(2), 340-346.
- Li, Y., Zheng, S., Zhang, J., Wang, F., Liu, X. ve He, W. (2021). An Ultrasound-Derived Stroke Risk Score to Identify Patients at High Risk of Stroke. *Annals of Translational Medicine*, 9(10), 863.
- Lou, Z., Yang, J., Tang, L. vd. (2017). Shear Wave Elastography Imaging for the Features of Symptomatic Carotid Plaques: A Feasibility Study. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 36(6), 1213-1223.
- Marlevi, D., Mulvagh, S. L., Huang, R. vd. (2020). Combined Spatiotemporal and Frequency-Dependent Shear Wave Elastography Enables Detection of Vulnerable Carotid Plaques as Validated by MRI. *Scientific Reports*, 10, 403.
- Mbroh, J., Tunnerhoff, J., Poli, K. vd. (2023). Shear Wave Elastography for the Assessment of Carotid Plaque Vulnerability: A Systematic Review. *Acta Neurologica Scandinavica*, 2023, 5084699.
- Pruijssen, J. T., de Korte, C. L., Voss, I. ve Hansen, H. H. G. (2020). Vascular Shear Wave Elastography in Atherosclerotic Arteries: A Systematic Review. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 46(9), 2145-2163.

- Ramnarine, K. V., Garrard, J. W., Kanber, B., Nduwayo, S., Hartshorne, T. C. ve Robinson, T. G. (2014). Shear Wave Elastography Imaging of Carotid Plaques: Feasible, Reproducible and of Clinical Potential. *Cardiovascular Ultrasound*, 12, 49.
- Saba, L., Cau, R., Murgia, A. vd. (2024). Carotid Plaque-RADS: A Novel Stroke Risk Classification System. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 17(1), 62-75.
- Shang, J., Wang, W., Feng, J. vd. (2018). Carotid Plaque Stiffness Measured with Supersonic Shear Imaging and Its Correlation with Serum Homocysteine Level in Ischemic Stroke Patients. *Korean Journal of Radiology*, 19(1), 15-22.
- Sivasankar, R., Singh, R., Hashim, P. I., Soni, B. K., Patel, R. K. ve Bajpai, A. (2019). Evaluation of Carotid Plaque Vulnerability Using Shear-Wave Elastography: An Observational Comparative Study. *Journal of Marine Medical Society*, 21(2), 134-137.
- Skoloudik, D., Kesnerova, P., Vomacka, J. vd. (2021). Shear-Wave Elastography Enables Identification of Unstable Carotid Plaque. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 47(7), 1704-1710.
- Widman, E., Maksuti, E., Amador, C., Urban, M. W., Caidahl, K. ve Larsson, M. (2016). Shear Wave Elastography Quantifies Stiffness in Ex Vivo Porcine Artery with Stiffened Arterial Region. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 42(10), 2423-2435.
- Yao, Y. ve Zhang, P. (2023). Novel Ultrasound Techniques in the Identification of Vulnerable Plaques: An Updated Review of the Literature. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 10, 1069745.
- Zhao, M., Chen, J., Gu, S. vd. (2025). Plaque Biomarkers from High-Frame-Rate Vector Flow Imaging and Shear Wave Elastography in Mild Carotid Stenosis. *Ultrasonography*, 44(3), 274-284.

BÖLÜM 2

**Vur ile Takipli Çocuklarda
Renal Parankim Hasarının
Değerlendirilmesinde
Elastografinin Yeri**

Elif Senem Şahin¹

¹ Uzm. Dr., T.C. Kahta Devlet Hastanesi, ORCID: 0000-0002-6510-4391

1. Giriş

Vezikoüreteral reflü (VUR), mesaneden üreterlere ve böbreklere doğru idrarın anormal retrograd akışıdır ve çocukluk çağıının en sık konjenital üriner sistem anomalilerinden biridir. İdrar yolu enfeksiyonu (İYE) geçiren bebek ve çocukların yaklaşık %30-40'ında VUR bulunduğunu belirtiyor (1). VUR; tekrarlayan febril İYE ataklarına, akut pyelonefrite ve zamanla renal parankimde skar gelişimine zemin hazırlamaktadır. Renal skarlaşma; uzun dönemde hipertansiyon, proteinüri ve kronik böbrek hastalığı gibi ciddi sonuçlarla ilişkilendirildiğinden, VUR'lu çocukların izleminde parankimal hasarın erken, güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde saptanması klinik açıdan büyük önem taşımaktadır (2).

Reflü derecelendirmesinde altın standart, Voiding sistoüretrografisi (VCUG) olup uluslararası derecelendirme sistemine göre evre I-V arasında sınıflandırılır. Ancak parankimal hasarın gösterilmesinde uzun yıllardır kabul gören referans yöntem, 99mTc-dimerkaptosüksinik asit (DMSA) sintigrafisidir. DMSA, kortikal fonksiyonel dokuyu ve fokal/diffüz skar alanlarını yüksek duyarlılıkla ortaya koyabilse de iyonizan radyasyon içermesi, maliyeti, erişim güçlüğü ve tekrarlayan incelemelerde kümülatif radyasyon riski nedeniyle özellikle pediatrik popülasyonda alternatif veya tamamlayıcı görüntüleme arayışını gündeme getirmiştir. Ultrasonografi tabanlı elastografi teknikleri özellikle shear wave elastography (SWE) son yıllarda böbrek parankiminin özelliklerini non-invaziv ve radyasyonsuz biçimde değerlendirme potansiyeli sebebiyle araştırma konusu olmuştur (3).

Bu bölümde, VUR ile takip edilen çocuklarda renal parankim hasarının değerlendirilmesinde SWE'nin (ve ilişkili tekniklerin) fizyolojik temelleri, teknik uygulama ilkeleri, literatürdeki güncel bulgular, karşılaşılan çelişkiler ve klinik pratiğe olası katkıları radyolojik bakış açısıyla ele alınacaktır.

2. VUR ve Renal Parankim Hasarının Patofizyolojisi

VUR, primer (üreterovezikal bileşke disfonksiyonuna bağlı izole anomali) veya sekonder (nörojenik mesane, posterior üretral valv gibi mesane çıkım obstrüksiyonlarına bağlı) olarak ortaya çıkabilir. Her iki formda da ortak sonuç, mesane basıncının üst üriner sisteme aktarılması ve enfekte idrarın böbrek parankimine ulaşmasıdır. Tekrarlayan pyelonefrit atakları, akut inflamasyon, tübüler hasar ve nihayetinde fokal veya diffüz interstisyel fibrozis ile karakterize kalıcı skar dokusu oluşumuna yol açar. Reflü nefropatisi olarak adlandırılan bu sürecin şiddeti genellikle reflü derecesi, enfeksiyon sıklığı ve tanı yaşı ile ilişkilidir; yüksek dereceli reflü olgularında skar oranı belirgin olarak artmaktadır (4,5).

Patofizyolojik açıdan önemli bir nokta, renal parankimde gelişen dokusal değişikliklerin yalnızca fibrozis ile sınırlı olmamasıdır. İnflamasyon, ödem,

kortikal kan akımındaki değişiklikler, tübüler atrofi ve kompensatuar hipertrofi bir arada bulunabilir. Bu heterojen doku yanıtı, ilerleyen bölümlerde tartışılacağı üzere, elastografik ölçümlerin yorumlanmasını karmaşık hale getiren temel unsurlardan biridir.

3. Renal Parankim Hasarının Değerlendirilmesinde Güncel Görüntüleme Yöntemleri

DMSA sintigrafisi, kortikal tübüler hücreler tarafından tutulan radyofarmasötüğün dağılımını görüntüleyerek fokal veya jeneralize kortikal defektleri, böbrek konturunda incelmeyi ve diferansiyel fonksiyon kaybını gösterir; bu özellikleriyle günümüzde hâlâ referans yöntem konumundadır. Ancak DMSA'nın radyasyon maruziyeti içermesi, akut dönemde (enfeksiyondan sonraki ilk 3-6 ay içinde) geçici fonksiyonel defektlerle kalıcı skarı ayırt etmede zaman kısıtlaması getirmesi ve tüm skar derecelerini eşit duyarlılıkla saptayamaması, alternatif yöntem arayışını haklı kılmaktadır (1,3).

Gri skala ve renkli Doppler ultrasonografi, böbrek boyutu, korteks kalınlığı, ekojenite ve vasküler direnç indeksleri hakkında bilgi verse de parankimal skarlaşmayı DMSA kadar duyarlı biçimde ayırt edememektedir. Kontrastlı voiding ürosonografi (ceVUS), VCUG'ye radyasyonsuz bir alternatif olarak reflü tanısında öne çıkarken, renal fonksiyonu doğrudan değerlendirmemektedir. Dokunun mekanik/elastik özelliklerini ölçen elastografi teknikleri, parankimal doku özellikleri hakkında dolaylı ama nicel bilgi sunma potansiyeliyle gündeme gelmiştir.

4. Elastografinin Temel İlkeleri

Elastografi, dokuların mekanik uyarana verdiği yanıtı (deformasyon, shear dalgası yayılım hızı) ölçerek doku sertliği hakkında nicel veya yarı nicel bilgi elde etmeyi amaçlayan bir görüntüleme yöntemidir. Karaciğer fibrozisinin değerlendirilmesinde yaygın klinik kullanım kazanmış olup meme, tiroid, prostat gibi organlarda da yerleşik uygulama alanları bulunmaktadır. Böbrek parankiminde kullanılan başlıca elastografi teknikleri şunlardır:

- Akustik radiation force impulsu (ARFI) / nokta shear wave elastografisi (pSWE): Odaklanmış akustik itme darbesiyle dokuda mikroskopik deformasyon oluşturulur ve kayma dalgasının belirlenen bir ROİ alanından geçiş hızı (m/sn) ölçülür.
- İki boyutlu shear wave elastografisi (2D-SWE): Gerçek zamanlı, renkli elastogram haritası üzerinden geniş bir alanda çoklu ölçüm noktası sağlar; sonuçlar hız (m/sn) veya Young modülü (kPa) cinsinden ifade edilebilir.

- Transient elastography (TE): Öncelikle karaciğerde kullanılan, tek boyutlu mekanik dalga temelli bir yöntemdir; böbrekte uygulama alanı yaygın değildir.
- Shear wave dispersiyon görüntüleme (SWD): Doku viskozitesini yansıtan dispersiyon eğimini ölçerek elastisiteye ek bilgi sunar; glomerüler hastalıklarda araştırma aşamasındadır (6,7).
- Manyetik rezonans elastografi (MRE): Harici bir mekanik vibratör ile oluşturulan dalgaların MRG ile görüntülenmesi esasına dayanır; derin yerleşimli veya obez hastalarda ultrasona göre avantaj sağlayabilir, ancak pediatrik popülasyondaki hasta uyumu ve maliyeti sınırlayıcı faktörlerdir (8).

Bu teknikler arasında, erişilebilirliği, düşük maliyeti, gerçek zamanlı uygulanabilirliği ve sedasyon gerektirmemesi nedeniyle pediatrik VUR popülasyonunda en sık araştırılan yöntem ARFI tabanlı pSWE ve 2D-SWE olmuştur. Benzer teknikler, VUR dışında nefrotik sendrom gibi diğer pediatrik böbrek hastalıklarında da renal sertliği değerlendirmek amacıyla araştırılmaktadır (9).

5. Böbrek Elastografisini Etkileyen Teknik ve Fizyolojik Faktörler

Karaciğerin aksine böbreğin elastografik ölçüm açısından kendine özgü zorlukları vardır. Öncelikle böbrek, anizotropik bir yapıya sahiptir; korteks, medulla ve toplayıcı sistem farklı elastik özellikler gösterir ve ölçümün kapsül altına, kortikomedüller sınırdan uzağa yerleştirilmesi önerilir. İkinci olarak, renal perfüzyon shear wave hızını doğrudan etkiler; artmış renal kan akımı ve intraparakimal basınç, dokunun gerçek fibrotik durumundan bağımsız olarak ölçülen sertlik değerini yükseltebilir. Literatürde bir çalışmada, venöz konjesyonun Young modülünü belirgin biçimde artırdığı, buna karşılık ilerleyici arteriyel stenozun ise azalttığı gösterilmiştir; bu bulgu, perfüzyonun fibrozisten bağımsız bir karıştırıcı faktör olabileceğine işaret etmektedir (10).

Hidrasyon durumu da benzer şekilde önemli bir değişkendir; intravenöz veya oral sıvı alımı sonrası böbrek sertliğinde artış gözlenmiştir, bu da ölçümlerin standardize edilmiş hidrasyon koşullarında yapılmasını gerektirir (11). Ölçüm derinliği ve prob seçimi teknik başarıyı doğrudan etkiler: konveks problemlerle native böbrekte ölçüm başarıları yüksekken, lineer problemlerle yapılan ölçümlerde başarı oranı belirgin biçimde düşmektedir (12). Ayrıca ölçüm derinliğinin 4-6 cm aralığında olduğu durumlarda gözlemciler arası uyumun en yüksek düzeyde olduğu, çok yüzeysel veya çok derin ölçümlerde güvenilirliğin azaldığı bildirilmiştir. Vücut kitle indeksi, yaş (SWE değerlerinin yaşla birlikte artma eğilimi göstermesi), solunum hareketleri, mesane doluluğu ve inceleyen kişinin deneyimi de sonuçları etkileyen diğer faktörler arasındadır (13).

6. VUR'lu Çocuklarda SWE Bulguları: Güncel Literatür

VUR'lu çocuklarda renal parankim hasarının SWE ile değerlendirilmesine yönelik çalışmalar, metodolojik çeşitlilik ve zaman zaman birbiriyle çelişen sonuçlar içermektedir. Aşağıdaki tabloda konuyla ilgili başlıca çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1: VUR'lu Çocuklarda SWE Bulguları: Güncel Literatür

Yazar / Yıl [Kaynak]	Yöntem	Örneklem	Temel Bulgu
Bruno ve ark., 2013 (14)	ARFI (pSWE)	28 VUR + 16 kontrol	ARFI değerleri sekonder VUR < primer VUR < etkilenmemiş kontralateral < normal kontrol sırasıyla azalıyor; skarlı dokuda beklenenin aksine düşük hız.
Göya ve ark., 2015 (15)	ARFI (pSWE)	88 çocuk (176 böbrek) + 20 kontrol	DMSA'da hasar derecesi arttıkça kayma dalgası hızının azaldığı; sertlik artışı beklenirken ters yönde ilişki.
Kalyoncu Uçar ve ark., 2019 (16)	2D-SWE	49 tek taraflı VUR (evre ≥2)	Skarsız VUR böbrekleri ile kontralateral normal böbrek arasında anlamlı SWH farkı saptanmadı; skar oluşumunu güvenilir öngörmedi.
Dillman ve ark. (teknik çalışma) (12)	2D-SWE	Pediyatrik native + transplante böbrek	Konveks proba ölçüm başarı oranı %100 iken lineer proba native böbrekte yalnızca %20; teknik uygulanabilirlik sınırlı.
Kocaoglan ve ark., 2025 (17)	2D-SWE	VUR + kontrol	DMSA ile kanıtlanmış skarlı böbreklerde SWH anlamlı yüksek ($p<0,05$); ROC eğrisinde 2,06 m/s eşiğinde duyarlılık %83,7, özgüllük %76,5 (AUC 0,795).
Burgazdere ve ark., 2025 (18)	SWE + SMI	40 VUR + 31 kontrol	Normal parankim ile skar dokusu arasında ortalama SWE ve SMI değerlerinde anlamlı fark; iki yöntem birbirini tamamlayıcı olarak önerildi.

Yazar / Yıl [Kaynak]	Yöntem	Örneklem	Temel Bulgu
Chroustová ve ark., 2023 (19)	2D-SWE	VUR grubu + kontrol	Skarsız VUR böbreklerinde SWE değerleri kontrol grubuna göre anlamlı düşük; skarlı VUR ile kontrol arasında fark yok — erken/subklinik tutulumu işaret ediyor.
Tacyildiz ve ark. 2025 (20)	2D-SWE	52 VUR + 54 kontrol	SWE, skar oluşmadan önceki erken parankimal tutulumu saptamada yardımcı olabilir; SWE değerleri yaşla birlikte artış gösteriyor.

6.1. Skarlı Dokuda Artmış Sertlik Bulguları

Bazı çalışmalarda beklenen fizyopatolojik model doğrulanmış, yani DMSA ile kanıtlanmış skar alanlarında shear wave hızının anlamlı biçimde arttığı gösterilmiştir. Bu çalışmalarda skarlı ve skarsız böbrekleri ayırt etmede belirli eşik değerlerinin makul duyarlılık ve özgüllük sağladığı bildirilmiştir (17)

Benzer biçimde, SWE'nin süperb mikrovasküler görüntüleme (SMI) ile birlikte kullanıldığı bir çalışmada, normal parankim ile skar dokusu arasında her iki parametrede de anlamlı farklılık saptanmış ve iki yöntemin birbirini tamamlayıcı biçimde kullanılabileceği öne sürülmüştür (18).

6.2. Paradoksal Bulgular: Azalmış Sertlik

Buna karşın, özellikle erken dönem ARFI çalışmalarında beklenenin tam tersi yönde bir ilişki bildirilmiştir. Göya ve arkadaşlarının geniş serisinde, DMSA'da hasar derecesi arttıkça kayma dalgası hızının azaldığı gösterilmiş; bu bulgu, Great Ormond Street Hastanesi'nden Olsen tarafından kaleme alınan bir editoryal yorumda 'şaşırtıcı' olarak nitelendirilmiştir (15,21).

Benzer şekilde Bruno ve arkadaşları, ARFI değerlerinin sekonder VUR'dan primer VUR'a, etkilenmemiş kontralateral böbrekten normal kontrol böbreğe doğru kademeli olarak azaldığını, yani hasar arttıkça dokunun fibrozisin aksine daha yumuşak göründüğünü bildirmiştir. Bu bulgular, 'DMSA anormalliği = skar = fibrozis = sertlik = hızlı shear wave' şeklindeki varsayımla doğrudan ilişkilendirilmektedir (14).

Bu paradoksun olası açıklamaları arasında; skarlı alanlarda azalmış kortikal perfüzyonun fibroze bağlı sertlik artışını dengelemesi veya onu aşması, kronik hasarlı dokuda parankim incilmesi ve yağlı/kistik dejenerasyon gibi heterojen doku bileşiminin ölçüm güvenilirliğini etkilemesi ve akut inflamatuvar ödemin (kronik fibrozisin aksine) dokuyu paradoksal olarak yumuşatması sayılabilir.

Nitekim renal perfüzyon ile elastisite arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar, arteriyel akımın azalmasının doku sertliğini düşürdüğünü, venöz konjesyonun ise artırdığını göstererek perfüzyonun fibrozisten bağımsız güçlü bir konfauder olduğunu desteklemektedir (10).

6.3. Erken/Subklinik Tutulumu Yakalama Potansiyeli

Bir grup çalışma ise SWE'nin asıl değerinin, henüz DMSA'da belirgin skar oluşmamış ancak fonksiyonel olarak etkilenmiş böbreklerde ortaya çıkabileceğini öne sürmektedir. Bu çalışmalarda, DMSA'da skar saptanmayan VUR böbreklerinde bile SWE değerlerinin sağlıklı kontrol grubuna göre anlamlı farklılık gösterdiği, buna karşın skarlı VUR böbrekleri ile kontrol grubu arasında anlamlı fark bulunmadığı bildirilmiştir. Bu bulgu, SWE'nin sintigrafik olarak henüz 'sessiz' kalan erken parankimal değişiklikleri yakalayabilecek bir biyobelirteç olarak değerlendirilebileceğini, ancak yerleşmiş skar dokusunda beklenen doğrusal ilişkinin her zaman gözlenmeyebileceğini düşündürmektedir (19,20).

6.4. Tanısal Uygulanabilirlik Çalışmaları

Teknik uygulanabilirliği inceleyen çalışmalar, native pediatrik böbreklerde konveks problemlerle ölçümün neredeyse tüm olgularda mümkün olduğunu, ancak lineer prob kullanımının başarı oranını belirgin biçimde düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgu, klinik pratikte prob seçiminin standardizasyonunun önemine dikkat çekmektedir (12).

Küçük çocuklarda işlemin başarısını sınırlayan bir diğer önemli etken de hasta uyumudur. Nefesini istenildiği gibi tutamayan veya inceleyen kişinin talimatlarına uyum sağlayamayan hastalarda ölçüm kalitesi düşmekte, bazı çalışmalarda bu hastalar analiz dışı bırakılmaktadır. Bu bulgular, klinik pratikte prob seçiminin standardizasyonu kadar, sedasyon gerektirmeyen ama işbirliğine dayalı bu yöntemde çocuk yaş grubuna uygun hazırlık ve motivasyon stratejilerinin de önemine dikkat çekmektedir.

7. SWE'nin DMSA'ya Kıyasla Rolü, Avantaj ve Sınırlılıkları

7.1. Potansiyel Avantajlar

- İyonizan radyasyon içermemesi; tekrarlanabilir, seri takip incelemelerine uygun olması.
- Gerçek zamanlı uygulanabilir olması, sedasyon veya intravenöz kateter gerektirmemesi.
- Rutin gri skala ve Doppler inceleme ile aynı seansta, ek maliyet ve süre yükü nispeten sınırlı biçimde uygulanabilmesi.
- Nicel veriler (m/sn veya kPa) üretmesi, böylece zaman içinde karşılaştırmaya olanak tanınması.

7.2. Sınırlılıklar

- Literatürde skar dokusunda sertlik artışı ile azalışını bildiren çalışmaların bir arada bulunması; standart bir eşik değer ve yön konusunda fikir birliği eksikliği.
- Ölçümlerin perfüzyon, hidrasyon, solunum, yaş, vücut kitle indeksi ve inceleyen deneyimi gibi çok sayıda karıştırıcı faktörden etkilenmesi.
- Anatomik olarak küçük ve derin yerleşimli pediatrik böbreklerde, özellikle küçük yaş grubunda teknik başarı oranının düşebilmesi.
- Fokal küçük skar alanlarının, global veya bölgesel ölçüm stratejileriyle gözden kaçabilmesi; SWE'nin DMSA'daki gibi yüksek uzaysal çözünürlükte fokal defekt haritalaması sunmaması.
- Prospektif, çok merkezli, standardize protokollere dayalı büyük örneklemli çalışmaların sınırlı sayıda olması.

Bu veriler ışığında, mevcut literatür SWE'nin DMSA'nın yerini tamamen alacak bir yöntem olmaktan çok, seçilmiş klinik senaryolarda -örneğin tekrarlayan takip gerektiren düşük-orta dereceli VUR olgularında, radyasyon maruziyetinin sınırlandırılmasının öncelikli olduğu durumlarda veya DMSA'ya ek tamamlayıcı bilgi istenen olgularda- tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

8. Gelecek Yönelimler

Shear wave dispersiyon görüntüleme gibi viskoelastik parametreleri de içeren yeni nesil teknikler, yalnızca elastisiteyi değil doku viskozitesini de ölçerek fibrozis ile inflamasyonu ayırt etme potansiyeli sunmaktadır; bu yaklaşımın glomerüler hastalıklarda umut verici sonuçlar verdiği bildirilmektedir (6).

Süperb mikrovasküler görüntüleme gibi kontrastsız vasküler tekniklerle SWE'nin kombine kullanımı, perfüzyon karıştırıcısının kısmen kontrol altına alınmasına yardımcı olabilir (18).

Manyetik rezonans elastografi, özellikle derin yerleşimli veya obez hastalarda ultrasona alternatif sunabilecek olsa da pediatrik popülasyonda maliyet, erişim ve sedasyon ihtiyacı gibi kısıtlamalar nedeniyle yaygın kullanımdan uzaktır; yine de teknik uygulanabilirliğini gösteren pediatrik çalışmalar mevcuttur (8).

Gelecekte, standardize ölçüm protokolleri (prob tipi, derinlik, ROI yerleşimi, hidrasyon durumu), yapay zekâ destekli otomatik ölçüm algoritmaları ve histopatolojik korelasyonu içeren prospektif çok merkezli çalışmalar, SWE'nin VUR'lu çocuklarda renal parankim hasarının izleminde standart bir yardımcı yöntem haline gelip gelemeyeceğini netleştirecektir.

9. Sonuç

VUR ile takipli çocuklarda renal parankim hasarının değerlendirilmesi, hastalığın uzun dönem böbrek sağlığı üzerindeki etkileri göz önüne alındığında klinik açıdan kritik bir konudur. DMSA sintigrafisi halen referans yöntem konumunu korumakla birlikte, radyasyon içermemesi ve tekrarlanabilirliği nedeniyle elastografi -özellikle SWE- radyoloji pratiğinde giderek daha fazla araştırılan bir tamamlayıcı yöntem haline gelmiştir. Ancak mevcut literatür, skar dokusunda sertlik artışı bildiren çalışmalar kadar, tam tersi yönde ya da erken subklinik tutulumu işaret eden bulgular da içermektedir; bu heterojenlik, büyük ölçüde renal perfüzyon, hidrasyon, teknik faktörler ve doku heterojenliği gibi karıştırıcılardan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle SWE'nin günümüzde VUR takibinde DMSA'nın yerini tanı aracından çok, standardize protokollerle uygulandığında tamamlayıcı, radyasyonsuz bir izlem parametresi olarak değerlendirilmesi daha uygun bir yaklaşım olacaktır.

Kaynaklar

1. Hoberman, A., Charron, M., Hickey, R. W., Baskin, M., Kearney, D. H., & Wald, E. R. (2003). Imaging studies after a first febrile urinary tract infection in young children. *The New England Journal of Medicine*, 348(3), 195–202.
2. Brakeman, P. (2008). Vesicoureteral reflux, reflux nephropathy, and end-stage renal disease. *Advances in Urology*, 2008, 508949. doi:10.1155/2008/508949
3. Putri, U. M. A., Raharja, P. A. R., Situmorang, G. R., Wahyudi, I., Rodjani, A., Puspitasari, H. A., Imam, A., Saraiva, L. R., Vallasciani, S., & Abbas, T. O. (2025). Biomarker for renal scarring screening in children with vesicoureteral reflux: A systematic review. *Frontiers in Pediatrics*, 13, 1621716. doi:10.3389/fped.2025.1621716
4. Mathias, S., Greenbaum, L. A., Shubha, A. M., Raj, J. A. M., Das, K., & Pais, P. (2022). Risk factors for renal scarring and clinical morbidity in children with high-grade and low-grade primary vesicoureteral reflux. *Journal of Pediatric Urology*, 18(2), 225.e1–225.e8. doi:10.1016/j.jpuro.2021.12.017
5. Yılmaz, İ., Peru, H., Yılmaz, F. H., Sekmenli, T., Çiftçi, İ., & Kara, F. (2018). Association of vesicoureteral reflux and renal scarring in urinary tract infections. *Archivos Argentinos de Pediatría*, 116(4), e542–e547. doi:10.5546/aap.2018.eng.e542
6. Yao, S., Cai, Y., Hu, S., Liu, X., Gao, X., Li, G., et al. (2023). The value of shear wave elasticity and shear wave dispersion imaging to evaluate the viscoelasticity of renal parenchyma in children with glomerular diseases. *BMC Nephrology*, 24, 306.
7. Xu, B., Jiang, G., Ye, J., He, J., & Xie, W. (2016). Research on pediatric glomerular disease and normal kidney with shear wave based elastography point quantification. *Japanese Journal of Radiology*, 34, 738–746.
8. Serai, S. D. (2026). Magnetic resonance elastography of the pediatric kidney: Technical considerations and emerging clinical applications. *Pediatric Radiology*. Advance online publication.
9. Yang, J., Yu, F., Wang, D., Xu, M., & Luo, H. (2025). Shear wave elastography for assessing kidneys in pediatric patients with primary nephrotic syndrome. *Insights into Imaging*, 16, 183.
10. Liu, X., Li, N., Xu, T., Sun, F., Li, R., Gao, Q., et al. (2017). Effect of renal perfusion and structural heterogeneity on shear wave elastography of the kidney: An in vivo and ex vivo study. *BMC Nephrology*, 18, 265.
11. Gao, J., Thai, A., Lee, J., & Fowlkes, J. B. (2020). Ultrasound shear wave elastography and Doppler sonography to assess the effect of hydration on

- human kidneys: A preliminary observation. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 46(5), 1179–1188.
12. Desvignes, C., Dabadie, A., Aschero, A., Ruocco, A., Garaix, F., Daniel, L., et al. (2021). Technical feasibility and correlations between shear-wave elastography and histology in kidney fibrosis in children. *Pediatric Radiology*, 51(10), 1879–1888.
 13. Bob, F., Bota, S., Sporea, I., Sirli, R., Petrica, L., & Schiller, A. (2014). Kidney shear wave speed values in subjects with and without renal pathology and inter-operator reproducibility of acoustic radiation force impulse elastography (ARFI)—Preliminary results. *PLoS ONE*, 9(11), e113761.
 14. Bruno, C., Caliri, G., Zaffanello, M., Brugnara, M., Zuffante, M., Cecchetto, M., et al. (2013). Acoustic radiation force impulse (ARFI) in the evaluation of the renal parenchymal stiffness in paediatric patients with vesicoureteral reflux: Preliminary results. *European Radiology*, 23(12), 3477–3484.
 15. Göya, C., Hamidi, C., Ece, A., Okur, M. H., Taşdemir, B., Çetinçakmak, M. G., et al. (2015). Acoustic radiation force impulse (ARFI) elastography for detection of renal damage in children. *Pediatric Radiology*, 45(1), 55–61.
 16. Kalyoncu Ucar, A., Cicek, R. Y., Alis, D., Akbas, S., Arioiz Habibi, H., Arslan, M. U., et al. (2019). Shear wave elastography in the evaluation of the kidneys in pediatric patients with unilateral vesicoureteral reflux. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 38(2), 379–385.
 17. Kocaoglan, A., Aksamoglu, M., Menzilioglu, M. S., & Ozturk, M. (2025). Ultrasound elastographic evaluation of renal parenchyma in pediatric patients with vesicoureteral reflux. *Journal of Pediatric Urology*, 21(6), 1932–1937. doi:10.1016/j.jpuro.2025.08.011
 18. Burgazdere, G., Karabulut, D., Günay, B., Ustabaşioğlu, F. E., & Tunçbilek, N. (2026). Can shear wave elastography and superb microvascular imaging be used as alternative methods to scintigraphy in the evaluation of renal parenchymal damage in pediatric patients with vesicoureteral reflux? *Journal of Clinical Ultrasound*, 54(3), 601–608.
 19. Chroustová, D., Trnka, J., Langer, J., Urbanová, I., Lambert, L., & Kočvara, R. (2023). How the 99mTc-DMSA scintigraphy findings are reflected in the adopted treatment of primary vesicoureteral reflux: One centre experience. *Journal of Pediatric Urology*, 19(4), 456–462. doi:10.1016/j.jpuro.2023.01.017
 20. Tacyildiz, S. Y., Tacyildiz, C., & Bilgici, M. C. (2025). Evaluation of changes in renal parenchymal stiffness in children with vesicoureteral reflux (VUR) by shear wave elastography (SWE) using dimercaptosuccinic acid

scintigraphy (DMSA) data. *Journal of Pediatric Urology*, 21(6), 1926–1931.
doi:10.1016/j.jpurol.2025.06.028

21. Olsen, Ø. E. (2015). Shear wave velocities in damaged kidneys: Fast and slow. *Pediatric Radiology*, 45(1), 2–3.

BÖLÜM 3

**Contrast-Enhanced Mammography
Versus Breast MRI: Current
Evidence and Clinical Applications
in Breast Cancer**

Elif Senem Şahin¹

¹ Uzm. Dr., T.C. Kahta Devlet Hastanesi, Radyoloji Kliniği,
ORCID: 0000-0002-6510-4391

1. INTRODUCTION

Breast cancer remains the most frequently diagnosed cancer among women worldwide, and accurate imaging is central to its early detection, local staging, and monitoring of treatment response. Full-field digital mammography, with or without digital breast tomosynthesis, remains the backbone of population-based screening, but its sensitivity is reduced in women with dense fibroglandular tissue, a pattern present in roughly half of the screening population and itself an independent risk factor for breast cancer. Dynamic contrast-enhanced breast MRI, which depicts the neoangiogenesis and increased vascular permeability associated with malignant tumours after intravenous gadolinium administration, is recommended as a supplemental screening tool for women at high lifetime risk. Its clinical adoption is nevertheless constrained by high acquisition cost, long scan and interpretation times, limited scanner availability, patient claustrophobia, incompatibility with certain metallic implants, and contraindications related to gadolinium-based contrast agents.

Contrast-enhanced mammography (CEM) reproduces, within the mammographic platform, the same physiological principle that underlies breast MRI: intravenous administration of a contrast agent followed by imaging designed to isolate tissue with increased vascularity (Lewin, Isaacs, Vance, & Larke, 2003). Because CEM is performed on conventional or lightly modified mammography units, it is considerably more accessible, faster to acquire, and less expensive than MRI. The last three years in particular have produced a wave of prospective, multicentre, and randomised evidence directly addressing whether CEM can substitute for MRI across the diagnostic pathway, from problem-solving and preoperative staging to supplemental screening and neoadjuvant chemotherapy monitoring. Landmark studies in this period include a prospective reader study directly comparing CEM, abbreviated MRI, and standard MRI for screening (Lawson et al., 2023), the multireader CONTRAST trial comparing CEM with MRI in an enriched cancer population (Phillips et al., 2023), large screening studies of CEM in women with dense breasts (Nissan et al., 2024; Patel et al., 2024), and the SCAMM trial, which prospectively evaluated CEM as an alternative to MRI in women eligible for supplemental screening under U.S. state insurance mandates (Berg et al., 2025).

The purpose of this chapter is to provide a thematic, narrative synthesis of this evidence, weighted toward studies published in 2023 and later, since this recent literature reflects a meaningfully more mature and more rigorously tested picture of CEM's performance than the earlier retrospective series on which most prior reviews were based. The chapter is organised around five recurring themes: (i) the technical and physical principles underlying each modality; (ii) their diagnostic performance in detecting and characterising breast cancer; (iii) their comparative performance across specific clinical indications; (iv) their safety

profiles and the practical, patient-centred, and economic considerations that differentiate them; and (v) the limitations that continue to prevent CEM from being considered a full substitute for MRI. The chapter closes with a discussion of research priorities emerging from this recent evidence base.

2. TECHNICAL PRINCIPLES AND IMAGING PHYSICS

2.1 Contrast-Enhanced Mammography

Contrast-enhanced mammography exploits the same iodinated agents used in body computed tomography, injected intravenously at a standard weight-based dose. Two acquisition strategies have historically been described: temporal subtraction, in which low-energy images are repeatedly acquired before and after contrast injection, and dual-energy subtraction, now the dominant clinical approach. In dual-energy CEM, a low-energy exposure (comparable to conventional digital mammography, below the k-edge of iodine at 33.2 keV) and a high-energy exposure (above the k-edge) are acquired in rapid succession after contrast administration; logarithmic weighted subtraction of the two images then cancels the signal from fibroglandular and adipose tissue while preferentially retaining the signal produced by iodine uptake within tumour neovasculature (Lewin et al., 2003). Because both exposures are obtained within seconds of one another, the technique is comparatively insensitive to patient motion and does not require the prolonged breast compression associated with temporal subtraction protocols. Continued technical refinement is ongoing: a two-centre retrospective study evaluated a higher-concentration iodinated contrast medium (400 mgI/mL) administered at reduced volume as a way of maintaining diagnostic performance while reducing patient contrast load, reporting sensitivity and accuracy comparable to standard-concentration protocols, although the authors of an accompanying editorial note that these findings require confirmation in prospective, more representative cohorts before the approach can be considered ready for routine use (Pediconi et al., 2025).

2.2 Breast Magnetic Resonance Imaging

Dynamic contrast-enhanced breast MRI relies on the intravenous administration of a gadolinium-based contrast agent followed by serial T1-weighted fat-suppressed acquisitions obtained before and at multiple time points after injection. Malignant lesions typically demonstrate rapid initial enhancement followed by plateau or washout kinetics, reflecting increased microvessel density and permeability, while benign lesions more often show slower, progressive enhancement. Unlike CEM, standard MRI provides true three-dimensional volumetric coverage of the breast together with kinetic (time-intensity) information, and can be combined with diffusion-weighted imaging for additional tissue characterisation. Abbreviated breast MRI (ABMRI) protocols, which retain only a limited subset of sequences to reduce acquisition and interpretation time, have been directly compared with both standard MRI and CEM in recent

prospective work; abbreviated MRI has repeatedly shown performance statistically indistinguishable from full-protocol MRI, while requiring substantially less scanner and reading time (Lawson et al., 2023). Continued refinement of MRI-based screening, including non-contrast diffusion-weighted approaches and artificial-intelligence-assisted triage of abbreviated examinations, remains an active area of investigation as of 2026.

Table 1. General comparison of contrast-enhanced mammography (CEM) and breast MRI.

Characteristic	Contrast-enhanced mammography	Breast MRI
Contrast agent	Iodinated agent (as used in CT)	Gadolinium-based agent
Underlying principle	Dual-energy subtraction depicting iodine uptake	Kinetic T1-weighted enhancement over time
Imaging dimensionality	Two-dimensional, per mammographic view	True three-dimensional, volumetric
Typical acquisition time	About 10 minutes	20-30 min full protocol; 5-10 min abbreviated
Ionising radiation	Yes, modestly above standard mammography	None
Key contraindications	Iodine allergy; significant renal impairment (relative)	Claustrophobia; certain implants; severe renal impairment (GBCA)
Relative equipment cost / access	Lower cost; runs on adapted mammography units	Higher cost; requires dedicated MRI scanner
Pooled sensitivity (recent literature)	~91-96%	~96-100%
Pooled specificity (recent literature)	~74-88%	~69-80%
Reported patient preference	Generally preferred: faster, quieter, less anxiety-provoking	Preferred by some for less breast compression

3. DIAGNOSTIC PERFORMANCE IN THE DETECTION AND CHARACTERISATION OF BREAST CANCER

The most influential recent evidence on comparative diagnostic performance comes from prospective, blinded reader studies rather than retrospective series. In the CONTRAST trial, an enriched, multireader comparison of CEM and MRI in a population with a high pretest probability of malignancy, contrast-enhanced MRI and CEM demonstrated comparable overall diagnostic performance for detecting breast cancer, with CEM showing somewhat lower sensitivity offset by higher specificity (Phillips et al., 2023). In a separate prospective, blinded reader study comparing CEM, abbreviated MRI, and standard MRI head-to-head in a supplemental screening population, Lawson et al. (2023) found that CEM achieved a significantly lower recall rate and higher specificity than standard MRI, but at the cost of a significantly lower cancer detection rate and lower sensitivity; abbreviated MRI, by contrast, performed comparably to standard MRI across all measured metrics. A subsequent single-institution comparison of paired CEM and MRI examinations interpreted against histopathology found no statistically significant difference between the two modalities across sensitivity, specificity, accuracy, or area under the receiver operating characteristic curve, with both modalities exceeding 98% sensitivity in that cohort (Yang, Yang, & Yang, 2026). At the level of individual lesion visibility rather than case-level diagnosis, a retrospective, blinded comparison of over 400 indeterminate or suspicious lesions found that contrast-enhanced MRI still afforded significantly better lesion conspicuity than CEM, with a meaningfully higher proportion of lesions rated as showing excellent visibility on MRI (Santonocito et al., 2025).

Taken together, this more recent, prospectively generated evidence base refines rather than overturns the conclusions of earlier retrospective meta-analyses: MRI, and in particular full-protocol standard MRI, continues to show a modest but real sensitivity and lesion-conspicuity advantage over CEM in most direct comparisons, while CEM consistently demonstrates comparable or superior specificity and a substantially lower false-positive burden. The clinical significance of this trade-off depends heavily on the indication for which each modality is being used, a point elaborated in the following section.

4. CLINICAL APPLICATIONS

4.1 Preoperative Staging and Assessment of Disease Extent

Accurate preoperative determination of tumour size and the presence of additional multifocal or multicentric disease is essential to surgical planning. In a prospective comparison of preoperative CEM and MRI in 59 women with invasive breast cancer, independent reader pairs found that CEM and MRI detected a similarly high proportion of the malignant lesions already identified on conventional mammography and ultrasound (67/68, 99% for CEM versus 66/68, 97% for MRI). However, among six additional malignant foci that were entirely occult on conventional imaging, MRI identified all six while CEM identified only one, leading the study authors to conclude that CEM may not be as sensitive as MRI in detecting additional, otherwise occult foci of malignancy (Taylor, Burrows, Saunders, Parizel, & Ives, 2023). This pattern is consistent with the lesion-conspicuity data described above: CEM performs comparably to MRI for lesions

already visible on other imaging, but MRI retains a clear advantage in surfacing disease that conventional imaging has missed entirely.

4.2 Monitoring Response to Neoadjuvant Chemotherapy

Neoadjuvant chemotherapy (NAC) is standard treatment for locally advanced breast cancer, and reliable imaging assessment of residual disease is essential to guide the timing and extent of surgery. In a prospective study of 54 women undergoing both CEM and MRI before, during, and after NAC, Iotti et al. (2017) found that CEM measurements of residual tumour size agreed more closely with final histopathological findings than did MRI measurements, and both modalities distinguished pathological complete responders equally well in 45 of 46 evaluable patients. Barra et al. (2018) reported comparable findings in an independent cohort, concluding that CEM performed at least as well as MRI in detecting residual disease after NAC. This body of evidence, while somewhat older than the screening literature discussed above, remains the primary basis for using CEM as an alternative to MRI for NAC response monitoring, particularly in centres where repeated MRI examinations are difficult to schedule or poorly tolerated by patients.

4.3 Supplemental Screening in Women at Elevated Risk

Supplemental screening is the clinical indication that has seen the most substantial new evidence since 2023. Nissan et al. (2024), in a large retrospective, single-institution study of women with extremely dense breasts at increased risk, reported that screening CEM achieved a sensitivity of 88.9% for screen-detected and interval cancers, more than triple the sensitivity of low-energy imaging alone (27.8%), broadly comparable to published MRI screening benchmarks and supporting its use as a supplemental screening option in this population. Patel et al. (2024), reporting the prevalence round of a prospective, multiyear trial of CEM screening in women at elevated risk, found a supplemental cancer detection rate of 23.9 additional cancers per 1,000 women screened beyond conventional mammography, a rate consistent with previously published MRI-based supplemental screening detection rates. Most significantly, the SCEMAM trial, a prospective study of 601 women eligible for supplemental MRI screening under U.S. state insurance mandates, evaluated the addition of CEM to digital breast tomosynthesis as a direct, pragmatic alternative to MRI screening; the addition of CEM significantly increased early-stage cancer detection, improving the area under the receiver operating characteristic curve from 0.73 with tomosynthesis alone to 0.92 with the addition of CEM for one of the two readers, at the cost of a modest increase in the false-positive recall rate (Berg et al., 2025). These studies, taken together, represent the strongest evidence to date that CEM can meaningfully supplement mammography-based screening in populations who would otherwise be referred for supplemental MRI, though prospective, randomised comparison of CEM against MRI as first-line supplemental screening, rather than against tomosynthesis alone, remains comparatively limited, and much of the dense-breast screening evidence, including Nissan et al. (2024), is still retrospective and single-institution in design.

4.4 Problem-Solving and Diagnostic Work-up

Both CEM and MRI are used as adjunctive tools when conventional mammography and ultrasound yield indeterminate or discordant findings. The CONTRAST trial, conducted in an enriched population with a high proportion of malignant lesions, found

that CEM and MRI achieved comparable overall diagnostic accuracy for problem-solving indications, with the trade-off between the two modalities again favouring MRI on sensitivity and CEM on specificity (Phillips et al., 2023). At the level of individual lesion visualisation, however, Santonocito et al. (2025) found that CE-MRI retained a clear conspicuity advantage over CEM, particularly for lesions with weak or non-mass enhancement, a finding that has practical implications for equivocal cases where the confident exclusion of malignancy depends on the reader's ability to characterise, not merely detect, an area of enhancement.

5. SAFETY PROFILE, CONTRAINDICATIONS, AND ADVERSE EVENTS

The two modalities differ fundamentally in the type of contrast agent administered and, consequently, in their risk profile. Iodinated contrast media, used in CEM, are associated with allergic-like reactions in approximately 0.2% to 0.7% of administrations with modern low-osmolar agents, with severe, life-threatening anaphylaxis being exceedingly rare; their principal organ-specific risk is contrast-associated acute kidney injury (CA-AKI) in patients with pre-existing renal impairment. Gadolinium-based contrast agents, used in MRI, carry a broadly similar or somewhat lower rate of acute allergic-like reactions, but are specifically associated with nephrogenic systemic fibrosis, a rare but potentially severe condition observed almost exclusively in patients with advanced chronic kidney disease or those on dialysis, as well as with long-term gadolinium retention in the brain, bone, and other tissues (American College of Radiology, 2023). A systematic review of 84 published CEM series involving over 14,000 patients found a pooled adverse reaction rate of 0.82%, the great majority mild, with only one severe non-fatal reaction reported across the pooled cohort (Zanardo et al., 2019). In the prospective Lawson et al. (2023) screening cohort, only 1.6% of participants receiving intravenous iodinated contrast experienced a documented reaction, and all were mild, limited to rash or hives not requiring treatment, providing recent, prospectively collected confirmation of the safety profile described in earlier retrospective series. Radiation exposure is an additional consideration specific to CEM: per-view glandular dose is modestly higher than for standard two-view digital mammography but remains within accepted diagnostic reference levels, and is not a relevant consideration for MRI, which uses no ionising radiation. Conversely, MRI presents contraindications that do not apply to CEM, including claustrophobia, ferromagnetic implants or foreign bodies, and cardiac devices incompatible with the magnetic field.

6. PATIENT EXPERIENCE, ACCESSIBILITY, AND COST-EFFECTIVENESS

Beyond diagnostic accuracy, patient-centred factors and health-system economics have become increasingly central to the CEM-versus-MRI discussion as screening trials have moved toward pragmatic, real-world implementation. Foundational preference work by Hobbs, Taylor, Buzynski, and Peake (2015), in a prospective crossover study of 49 women who underwent both examinations, found a significantly higher overall preference for CEM, attributed to shorter procedure time, greater comfort, and lower noise levels, together with significantly lower self-reported anxiety during CEM than during MRI. An AJR expert panel narrative review has since shifted the conversation from whether patients prefer CEM to how services can practically deliver it, identifying the risks of iodinated contrast media, radiation exposure, workflow adjustments, limited

availability of CEM-guided biopsy systems, and reimbursement challenges as the principal barriers to wider clinical implementation of CEM (van Nijnatten et al., 2023). Multicentre trials such as BRAID have also begun formally comparing patient acceptance and tolerability of CEM against other supplemental screening options, including automated whole-breast ultrasound and abbreviated MRI, within the same randomised framework; in the BRAID acceptance sub-study, contrast-enhanced techniques (CEM and abbreviated MRI) accounted for the great majority of trial withdrawals attributable to adverse patient experience, underscoring that although CEM is generally well tolerated, it is not free of the discomfort and anxiety associated with intravenous contrast administration (Allajbeu et al., 2026).

From a health-economic perspective, CEM continues to be reported as substantially less costly to perform than MRI, reflecting both lower equipment and per-examination costs and the wider availability of mammography units relative to dedicated breast MRI scanners. The pragmatic design of trials such as SCEMAM, which evaluated CEM added to routinely available tomosynthesis rather than as a research-only add-on, reflects a broader shift in the recent literature toward demonstrating not only that CEM can perform comparably to MRI under ideal conditions, but that it can be feasibly deployed at scale within existing mammography infrastructure (Berg et al., 2025).

7. LIMITATIONS AND INTERPRETIVE PITFALLS

Despite this rapidly maturing evidence base, CEM retains recognised limitations relative to MRI. Because CEM captures enhancement at a single, fixed post-contrast time point rather than the full kinetic curve obtained with dynamic MRI, it cannot characterise the temporal pattern of contrast uptake and washout that contributes to lesion characterisation on MRI; recent conspicuity data confirm that this translates into materially lower visibility for a meaningful minority of lesions, particularly those with weak or non-mass enhancement (Santonocito et al., 2025). As on MRI, elevated background parenchymal enhancement, more common in premenopausal women and in denser breasts, can mask underlying lesions or mimic malignant enhancement on CEM, and, unlike breast density, still lacks a fully standardised structured classification system for CEM, contributing to inter-reader variability. The prospective screening literature published since 2023 has also clarified that CEM's principal trade-off relative to MRI is not accuracy in the abstract but a specific, quantifiable pattern: consistently lower sensitivity and cancer detection rate set against consistently higher specificity and lower recall (Lawson et al., 2023; Phillips et al., 2023). Whether this trade-off is acceptable depends on the screening population and on how a given health system weighs missed cancers against unnecessary recalls and biopsies, a question that recent trials have begun to quantify but have not yet definitively resolved.

8. FUTURE DIRECTIONS

Several priorities emerge from this review of the recent literature. First, direct, adequately powered randomised trials comparing CEM against MRI, rather than against tomosynthesis alone, are still comparatively scarce; SCEMAM and related trials represent an important step but leave open how CEM would perform as a true head-to-head substitute for MRI screening at scale. Second, continued refinement of CEM's lesion conspicuity, whether through improved contrast protocols, higher-concentration and lower-volume iodinated agents, or artificial-intelligence-assisted interpretation, is needed

to narrow the residual detection gap identified in recent reader studies (Santonocito et al., 2025). Third, the development and validation of a fully structured lexicon for background parenchymal enhancement on CEM, analogous to the BI-RADS framework already used for enhancement patterns on MRI, would improve inter-reader agreement and diagnostic consistency across the growing number of centres now implementing CEM clinically. Finally, prospective, outcome-based studies extending beyond cancer detection rate to long-term outcomes, quality of life, and formal cost-effectiveness, ideally embedded within pragmatic multicentre trials such as BRAID, are needed to determine whether CEM's favourable trade-offs on specificity, cost, and accessibility translate into comparable long-term screening outcomes relative to MRI.

9. CAN CEM REPLACE BREAST MRI?

Drawing together the evidence discussed in this chapter, the answer to this question is neither a simple yes nor a simple no, but depends strongly on the clinical indication. For preoperative staging and assessment of disease extent, CEM may serve as a practical alternative to MRI in selected patients: it matches MRI's sensitivity for lesions already identified on conventional imaging, although MRI remains superior for detecting some additional, otherwise occult malignant foci (Taylor et al., 2023). For monitoring response to neoadjuvant chemotherapy, CEM can substitute for MRI in most settings, since it has repeatedly been shown to be at least as accurate as MRI in assessing residual disease and predicting pathological response (Iotti et al., 2017; Barra et al., 2018).

For supplemental screening of women at elevated risk, the answer is only partial and context-dependent: CEM significantly increases cancer detection when added to mammography, but its sensitivity still trails full-protocol MRI in direct comparisons (Lawson et al., 2023; Berg et al., 2025). In women with extremely dense breasts specifically, an emerging body of evidence suggests CEM's screening sensitivity is far higher than mammography alone and approaches published MRI benchmarks (Nissan et al., 2024), though this evidence, including Nissan et al. (2024), remains largely retrospective and less thoroughly validated than the staging or NAC-monitoring literature. For diagnostic problem-solving in indeterminate findings, CEM again offers only a partial substitute: case-level accuracy is comparable to MRI, but MRI affords better individual lesion conspicuity (Phillips et al., 2023; Santonocito et al., 2025), which matters most in genuinely equivocal cases.

In two further situations, the question of substitution resolves more clearly. For patients with MRI contraindications, such as claustrophobia, incompatible implants, or gadolinium hypersensitivity, CEM is a substitute by necessity, since it is often the only contrast-enhanced imaging option available to them. Conversely, for guideline-based annual high-risk screening of women with pathogenic BRCA1, BRCA2, or TP53 mutations, CEM is not yet an established substitute for MRI: the guideline-endorsed MRI screening programmes rest on long-term outcome data that CEM screening has not yet accumulated.

Overall, CEM cannot yet be considered a universal, indication-independent replacement for breast MRI. For several of the most common clinical uses of contrast-enhanced breast imaging, however, particularly preoperative staging, neoadjuvant chemotherapy monitoring, and screening in women for whom MRI is unavailable or contraindicated, the recent prospective literature supports CEM as an adequate, and often

preferred, substitute. Where full-protocol MRI's sensitivity advantage matters most, such as guideline-based annual screening of women with pathogenic mutations, MRI remains the reference standard, and CEM is better regarded as a complementary rather than a replacement technology, at least until longer-term outcome data become available.

10. CONCLUSION

Contrast-enhanced mammography and breast MRI share a common physiological rationale, both depicting tumour-associated neoangiogenesis after intravenous contrast administration, but differ meaningfully in technique, diagnostic performance, safety profile, and practical accessibility. The prospective, multicentre literature published between 2023 and 2026 has substantially sharpened this picture relative to the earlier retrospective evidence base: full-protocol MRI retains a modest but consistent advantage in sensitivity, cancer detection rate, and individual lesion conspicuity, while CEM consistently delivers higher specificity, lower recall rates, and superior accessibility, cost, and patient throughput, with a safety profile confirmed as favourable in large prospective cohorts. Rather than positioning CEM as a wholesale replacement for MRI, the recent literature reviewed in this chapter supports its role as a rapidly maturing, more accessible complementary modality that can reasonably substitute for MRI in specific clinical circumstances, particularly preoperative staging, monitoring of response to neoadjuvant chemotherapy, and supplemental screening in women for whom MRI is contraindicated, poorly tolerated, or unavailable within a clinically appropriate timeframe. Continued protocol standardisation, structured reporting, and large-scale randomised comparison will be essential to define more precisely where CEM can appropriately substitute for, rather than merely supplement, breast MRI in contemporary clinical practice.

REFERENCES

- Allajbeu, I., Charnley, K. R., Yang, Y., Field-Rayner, J., Morris, K., Payne, N. R., ... Gilbert, F. J. (2026). Acceptance, experience, and feedback for supplemental screening in dense breasts among women participating in the BRAID trial. *Insights into Imaging*, 17, 14.
- American College of Radiology. (2023). ACR manual on contrast media. American College of Radiology.
- Barra, F. R., Sobrinho, A. B., Barra, R. R., Magalhaes, M. T., Aguiar, L. R., de Albuquerque, G. F. L., ... Pratesi, R. (2018). Contrast-enhanced mammography (CEM) for detecting residual disease after neoadjuvant chemotherapy: A comparison with breast magnetic resonance imaging (MRI). *BioMed Research International*, 2018, 8531916.
- Berg, W. A., Vargo, A., Lu, A. H., Berg, J. M., Bandos, A. I., Hartman, J. Y., ... Sumkin, J. H. (2025). Screening for breast cancer with contrast-enhanced mammography as an alternative to MRI: SCEMAM trial results. *Radiology*, 315(3), e242634.
- Hobbs, M. M., Taylor, D. B., Buzynski, S., & Peake, R. E. (2015). Contrast-enhanced spectral mammography (CESM) and contrast enhanced MRI (CEMRI): Patient preferences and tolerance. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 59(3), 300-305.
- Iotti, V., Ravaioli, S., Vacondio, R., Coriani, C., Caffarri, S., Sghedoni, R., ... Pattacini, P. (2017). Contrast-enhanced spectral mammography in neoadjuvant chemotherapy monitoring: A comparison with breast magnetic resonance imaging. *Breast Cancer Research*, 19, 106.
- Lawson, M. B., Partridge, S. C., Hippe, D. S., Rahbar, H., Lam, D. L., Lee, C. I., ... Lee, J. M. (2023). Comparative performance of contrast-enhanced mammography, abbreviated breast MRI, and standard breast MRI for breast cancer screening. *Radiology*, 308(2), e230576.
- Lewin, J. M., Isaacs, P. K., Vance, V., & Larke, F. J. (2003). Dual-energy contrast-enhanced digital subtraction mammography: Feasibility. *Radiology*, 229(1), 261-268.
- Nissan, N., Comstock, C. E., Sevilimedu, V., Gluskin, J., Mango, V. L., Hughes, M., ... Wolfe, S. (2024). Diagnostic accuracy of screening contrast-enhanced mammography for women with extremely dense breasts at increased risk of breast cancer. *Radiology*, 313(1), e232580.
- Patel, B. K., Carnahan, M. B., Northfelt, D., Anderson, K., Mazza, G. L., Pizzitola, V. J., ... Pockaj, B. (2024). Prospective study of supplemental screening with contrast-enhanced mammography in women with elevated risk of breast cancer: Results of the prevalence round. *Journal of Clinical Oncology*, 42(32), 3826-3836.

- Pediconi, F., Speranza, A., Moffa, G., Maroncelli, R., Coppola, S., Galati, F., ... Rizzo, V. (2025). Contrast-enhanced mammography for breast cancer detection and diagnosis with high concentration iodinated contrast medium. *Insights into Imaging*, 16, 124.
- Phillips, J., Mehta, T. S., Portnow, L. H., Fishman, M. D. C., Zhang, Z., & Pisano, E. D. (2023). Comparison of contrast-enhanced mammography with MRI utilizing an enriched reader study: A breast cancer study (CONTRAST trial). *Radiology*, 309(2), e230530.
- Santonocito, A., Zarcaro, C., Zeitouni, L., Ferrara, F., Kapetas, P., Helbich, T. H., ... Baltzer, P. A. T. (2025). A head-to-head comparison of breast lesion's conspicuity at contrast-enhanced mammography and contrast-enhanced MRI. *European Radiology*, 35(6), 3070-3079.
- Taylor, D. B., Burrows, S., Saunders, C. M., Parizel, P. M., & Ives, A. (2023). Contrast-enhanced mammography (CEM) versus MRI for breast cancer staging: Detection of additional malignant lesions not seen on conventional imaging. *European Radiology Experimental*, 7, 8.
- van Nijnatten, T. J. A., Lobbes, M. B. I., Cozzi, A., Patel, B. K., Zuley, M. L., & Jochelson, M. S. (2023). Barriers to implementation of contrast-enhanced mammography in clinical practice: AJR expert panel narrative review. *AJR American Journal of Roentgenology*, 221(1), 3-6.
- Yang, Y., Yang, X., & Yang, F. (2026). Comparison of diagnostic performance between contrast-enhanced mammography and breast magnetic resonance imaging. *Frontiers in Oncology*, 15, 1557800.
- Zanardo, M., Cozzi, A., Trimboli, R. M., Labaj, O., Monti, C. B., Schiaffino, S., ... Sardanelli, F. (2019). Technique, protocols and adverse reactions for contrast-enhanced spectral mammography (CESM): A systematic review. *Insights into Imaging*, 10, 76.