

DOI: 10.4274/atfm.21931

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası 2018;71(2):91-95

# Kas-İskelet Sistemi Hastalıklarında Ultrason Elastografinin Yeri

## The Role of Ultrasound Elastography in Musculoskeletal Diseases

Aysun Genç, Seçilay Güneş, Şehim Kutlay

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

### Öz

Ultrason teknolojisindeki yüksek gelişim hızının son basamağı ultrason elastografidir (UE). UE, kas sertliği de dahil olmak üzere dokunun mekanik özelliklerinin doğrudan değerlendirilebildiği bir yöntemdir. Fiziksel tıp ve rehabilitasyon alanında B-mod ultrason (parlaklık modu) ve Doppler ultrason kullanımı artık rutin muayenenin bir parçası haline gelmiştir. Gerçek zamanlı ve doğrudan yapılan kas sertliği ölçümleri, akut kas-iskelet sistemi yaralanmaları ve kronik miyofasiyal ağrı gibi akut ve kronik kas-iskelet sistemi patolojilerinin teşhis ve tedavisine olanak sağlamaktadır. Bu derlemede, gerilim (kompresyon) elastografi, akustik radyasyon force impuls görüntüleme ve shear wave (makaslama) elastografisi dahil olmak üzere kas sertliğini incelemek için farklı UE tekniklerine değinilecektir. Bu yöntemler ile günümüze kadar yapılan, fizyatristlere ışık tutabilecek araştırmaları derleyip, gelecekte atılabilecek yeni adımlara öncülük yapabilmek hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ultrason, Elastografi, Shear Wave, Kas-İskelet Sistemi

### Abstract

Ultrasonic elastography (UE) is the last step of the high rate of development in ultrasound technology. The UE is a new method that can directly evaluate the mechanical properties of the tissue including muscle stiffness. The use of B-mode ultrasound (brightness mode) and Doppler ultrasound have been used as a part of routine examination in the field of Physical Medicine and Rehabilitation. Real-time and direct muscle strength measurements allow the diagnosis and treatment of acute and chronic musculoskeletal pathologies such as acute musculoskeletal injuries and chronic myofascial pain. In this review, different UE techniques will be discussed to examine muscle stiffness, including tension (compression) elastography, acoustic radiation force impulse imaging, and shear wave (shear) elastography. It is aimed to compile researches that can be guide to physiatrists and to lead the new steps that can be taken in the future.

**Key Words:** Ultrasound, Elastography, Shear Wave, Musculoskeletal System

### Giriş

Fiziksel tıp ve rehabilitasyon alanında B-mod ultrason (parlaklık modu – brightness mode) ve Doppler ultrason kullanımı son yıllarda rutin muayenenin bir parçası haline gelmiştir. Ultrasonografi (US) ve Doppler tekniği, gerçek zamanlı, dinamik, yüksek çözünürlüklü incelemelere olanak sağlaması nedeniyle kas-iskelet sistemi için çok güçlü bir tanı yöntemidir (1).

Ultrason teknolojisindeki yüksek gelişim hızının son basamağı ise ultrason elastografidir (UE). UE, kas sertliği de dahil olmak üzere dokunun mekanik özelliklerini doğrudan

ölçebilen teknolojik bir gelişmedir. Elastisite; bir dokunun dışarıdan uygulanan bir güç ile deforme olabilme ve bu güç ortadan kaldırıldığında orijinal şekil ve boyutuna gelebilme yeteneğidir. Dokuların elastik özellikleri, B mod görüntülemeye kullanılan akustik empedanstan ve Doppler görüntülemeye kullanılan akış özelliklerinden farklıdır, dolayısıyla elastografi doku değerlendirmesinde yeni bir yöntemdir (2). Gerçek zamanlı ve doğrudan yapılan kas sertliği ölçümleri, akut kas-iskelet sistemi yaralanmaları, kronik miyofasiyal ağrı gibi akut ve kronik kas-iskelet sistemi patolojileri, cerrahi onarım sonrasında yara iyileşmesine ve buna bağlı dokudaki biyomekanik özellik değişimlerin teşhis ve tedavisine olanak sağlamaktadır (3).

Yazışma Adresi/Address for Correspondence: Dr. Aysun Genç,

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi, Fiziksel Tıp ve Rehabilitasyon Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

Tel.: +90 505 270 41 08 E-posta: draysung@yahoo.co ORCID ID: orcid.org/0000-0003-2613-4667

Geliş Tarihi/Received: 08.06.2018 Kabul Tarihi/Accepted: 23.07.2018

©Telif Hakkı 2018 Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi Mecmuası, Galenos Yayınevi tarafından yayınlanmıştır.

Yayınlanan tüm içerik CC BY-NC-ND lisansı altındadır.



UE, doku özelliklerinin teşhisi için US merkezli tetkikten US bazlı palpasyona geçişi mümkün kılmaktadır. Bu teknolojinin, fiziksel tıp ve rehabilitasyon alanında ultrason kullanım spektrumunu genişleteceği kesindir ancak klinik uygulamada uygun endikasyonları ve sınırlamaları hakkında daha fazla bilgiye ihtiyacımız vardır. Bu derlemede, gerilim (kompresyon) elastografi, akustik radyasyon force impuls görüntüleme ve makaslama (shear wave) elastografisi dahil olmak üzere kas sertliğini incelemek için farklı ultrason elastografi tekniklerine değinilecektir. Bu alanda günümüze kadar yapılan araştırmalar gözden geçirilerek fiziyatristlere ışık tutabilecek yeni adımlara öncülük yapabilmek hedeflenmiştir.

Palpasyon, hastaların fizik muayenesinde vazgeçilmez bir yöntemdir. Hastalıklı, yaralanmış veya işlevsiz doku genellikle anormal mekanik özellikler gösterir. Bu nedenle iskelet kasının pasif ve aktif özelliklerinin yanı sıra dokunun mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi de önemli klinik bilgi sağlar. Dolaylı klinik ve araştırma ölçümleri ile kasın mekanik özellikleri ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır. Fizik muayenede dolaylı klinik ölçümler olan, anormal kas tonusu ve eklem hareket açıklığı, kuvvet veya fiziksel işlevlerdeki değişiklikler hakkında bilgi sahibi olunur. Kas özelliklerinin dolaylı ölçüm yöntemleri arasında dinamometri, rampa ve tutuş testleri ve sarkaç testleri yer almaktadır. Bu testler eklem bütünü hakkında değerli bilgiler sağlarlar, ancak kasların izole mekanik özelliklerini, ilişkili tendonların, nörovasküler yapıların veya eklem kapsülünün özelliklerini ayrı ayrı izole edemezler. Kasların mikroskopik ve makroskopik yapıları da iskelet kasının özellikleri hakkında bilgi sağlar. Kas biyopsisi, biyopsi alınan bölgenin mikroskopik kas yapısı hakkında ayrıntılı bilgi verebilir, ancak örneklem büyüklüğünün belirlenmesindeki zorluk nedeni ile çok yararlı bir yöntem değildir (3).

Dokuların elastik özellikleri, B modu görüntüleme kullanılan akustik empedanstan ve Doppler görüntüleme kullanılan akış özelliklerinden farklıdır. Bu nedenle elastografi, problemin B modu görüntüleme tespit edilebilmesinden çok daha önce, farklı doku değerlendirme metodu sayesinde değerlendirilebilmesine olanak sağlar. Bu nedenle geniş doku değişikliği yelpazesi olan kas-iskelet sisteminde özellikle kullanılabilir. Elastografi, strese yanıt olarak bu dokuların gerginliğini (sertliği) farklı yöntemlerle değerlendirir. Tarih boyunca dokulardaki sertliğin palpasyon yoluyla saptanması hastalığın bir göstergesi olarak kullanılmıştır. Genel olarak, malign dokular, benign dokulara göre daha katı veya daha serttir. Bu, elle yapılan basıya karşılık gelen doğrudan palpasyonla ayırt edilebilen bir özelliktir. Bu kavram ultrason alanında genişletilerek, anatomik görüntülerin yanında doku sertliği haritaları oluşturulmaya başlanmıştır (4).

## Elastografi İlkeleri

Elastografi, ilk olarak Ophir ve ark. (5) tarafından biyolojik dokuların mekanik özelliklerini belirleme yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bir dokunun gerginliği, dokuya hem uzunlamasına hem de makaslama bileşenleriyle uygulanan strese veya basınca verdiği yanıt olarak tanımlanabilir. Uzunlamasına gerilim bir doku sıkıştırıldığında veya gerildiğinde meydana gelirken, makaslama gerilimi, bükme gibi açısız kuvvetlere verilen yanıtıdır. Biyolojik dokular, düzenli olmayan yapıları göz önüne alındığında hem viskoz (sıvı benzeri) hem de elastik özelliklerin olduğu karmaşık bir yapıya sahiptirler. Sıvı içerikli yapılara bir stres uygulandığında, basınç tüm yönlerde aynıdır, dolayısıyla makaslama gerilmesi ve makaslama dalgaları mevcut değildir. Bir dokunun Elastik modülü, uygulanan stres ile gerilimde nasıl bir değişiklik ile tepki verdiği ve stres-gerilme eğrisinin eğimi olarak tanımlanır. Elastik modül, Young's modülü (E) (basınç stresi/basınç gerginliği) veya makaslama modülü (G) (makaslama stresi/makaslama gerilmesi) olarak tanımlanabilir. Young's modülü ve makaslama modülü, biyolojik dokular için kullanılan iki modül olup, aralarında  $E \approx 3G$  olarak tanımlanan bir eşitlik vardır. Bir dokunun elastik modülü, katılık ile ters orantılıdır, yani elastik modül ne kadar büyükse, doku katılığı o kadar azdır (2-4).

Medikal uygulamada, elastografi dokulara mekanik bir stres uygulamasından önce ve hemen sonra meydana gelen yer değiştirmenin ölçülmesi temeline dayanır. Organizmadaki yumuşak dokular yüksek su içeriğine sahip ve neredeyse sıkıştırılmaz olduğu için, küçük doku yer değiştirmelerini algılamak için sofistike ekipman gereklidir. Günlük pratikte, genel klinik uygulamada iki ana elastografi yöntemi vardır: sıkıştırma/gerilim elastografisi ve makaslama elastografisi (2,3).

## Gerilim Elastografi

Gerilim veya sıkıştırma elastografisinde, tekrarlayıcı manuel basınç ile dönüştürücüden bir kuvvet uygulanır ve yer değiştirme (gerilim), dokuların zamana göre geri dönüş hızlarından hesaplanır. Manuel basınç yerine, aortik pulsasyon gibi intrensek bir stres yaratıcı da kullanılabilir. Ancak bunun yapıların daha yüzeysel olduğu kas-iskelet sisteminde kullanımı sınırlıdır (3,4).

Uygulanan bir kuvvete (stres) sekonder dokuların yer değiştirmesinin (gerilme) ölçülmesi, elastogram olarak adlandırılan elastik modül dağılımının kalitatif bir haritasını verir. Bu elastogram, renk kodludur ve genellikle anatomik lokalizasyon için gri-ölçekli B modu görüntüsüne süperpoze edilir. Uygulanan kuvvet miktarı bilinmediği için, bu elastogramdan gerçek nicel ölçümler alınamaz. Bununla birlikte, ilgilenilen dokunun ve subkutanöz yağ gibi bitişik bir yapının yer değiştirmesinin oranından yarı-kantitatif bir değerlendirme yapılabilir. Gerilim elastografinin, dokuya uygulanan basınç miktarındaki belirsizlik başta olmak üzere birçok potansiyel

dezavantajı vardır. Bu, sıkıştırmanın yeterliliğinin grafiksel gösterimi ile kısmen telafi edilebilir. Bununla birlikte, gözlemciler arası ve aynı gözlemcinin değişik ölçümlerdeki varyasyonu akılda tutulmalıdır (4). Optimum değerlendirme için en az üç sıkıştırma ve dekompresyon döngüsü tavsiye edilir (4,5). Bununla birlikte, tekrarlanan basınç nedeni ile dokularda gelişen basınç yüklemesi doku esnekliğini değiştirebilir. Ayrıca kas-iskelet sisteminde kemik anatomisinden kaynaklanan kısıtlamalar, örneğin ayak bileği etrafındaki gibi, dokunun ilgili bölge boyunca eşit bir şekilde sıkıştırılmasını zorlaştırabilir.

### Makaslama (Shear wave) Elastografi

Makaslama elastografisi, dokulara transdüser tarafından üretilen odaklanmış bir ultrason darbesiyle titreşim uygular. Dokular içindeki bu enerji birikimi, itme darbesine dik olan enine dalgaları veya shear wave dalgalarını oluşturur. Shear wave hızları, eş zamanlı olarak iletilen ultrason dalgalarının Doppler frekans modülasyonundan ölçülebilir. Young's modülü daha sonra shear wave hızının bir fonksiyonu olarak ölçülür. Doku sertliği arttıkça, içinde yayılan shear wave hızı da ona paralel olarak artar. Her ne kadar shear wave elastografi standardize edilmiş uygulama stresi olsa da yine de sınırlamaları vardır. Makaslama dalgaları derinlik arttıkça attenüe olur ve bu nedenle çok derin dokular (deride >9 cm uzakta) değerlendirilemez. Tersine, makaslama dalgaları üretmek için yeterli bir doku derinliği gereklidir, dolayısıyla çok yüzeysel yapıların değerlendirilmesi de zordur. Ancak bu kısmen deri üzerinde yoğun bir jel katmanı kullanılarak telafi edilebilir. Makaslama dalgaları sıvılar içinde üretilmez, dolayısıyla kistik yapılar yeterince analiz edilemez. İlgilenilen bölgenin büyüklüğü, shear wave ölçümlerini de potansiyel olarak etkileyebilir. Shear wave üretmek için gerekli olan akustik radyasyon kuvveti, dokularda enerjiyi biriktirir ve kısmen ısınma olarak ortaya çıkar. Bu, ısıtma etkisi ölçümleri değiştirebileceğinden veya potansiyel olarak doku hasarına neden olabileceğinden, bu tekrarlanan ölçümlerde dikkate alınmalıdır. Bazı sistemlerde, herhangi bir potansiyel ısıtmayı azaltmak için birkaç saniye içinde dahili bir soğutma gecikmesine sahiptir, bununla birlikte, uzun süreli kullanım, yine de dokuları ısıtabilir ve üretilen shear wave özelliklerini değiştirebilir. Makaslama dalgalarının ölçülen değerleri, m/s cinsinden veya kPa olarak verilebilir. kPa cinsinden ifade edilen esneklik,  $E=3rc^2$  denklemi kullanılarak kesme dalgası hızına yaklaşılabılır; burada E Young modülünü, r yoğunluğu ( $1000 \text{ kg/m}^3$  olarak tahmin edilir) ve c sesin hızını temsil eder (6).

Tiroid, submandibular bezler, masseter, gastroknemius, supraspinatus kasları ve Aşil tendonu dahil olmak üzere birçok dokuda shear wave elastografi için referans standartlar belirlenmiştir. Gerilim elastografi göreceli sertlik bilgisi sağlarken, shear wave elastografi mutlak sertlik değerleri sağlar (6,7).

### Elastografinin Kas-İskelet Sistemi Uygulamaları

#### Kaslar

İskelet kasları, ultrasonografik değerlendirme için kolayca erişilebilir, yüzeysel bir lokalizasyondadır. Normal iskelet kası sertliği, kas kasılması sonucu oluşan aktif gerilim ile büyük ölçüde konnektif dokunun meydana getirdiği pasif gerilimden kaynaklanır. Fiziksel fonksiyon ortaya çıkmasında hem pasif hem de aktif kas sertliği katkıda bulunur. Aktif bileşendeki bozukluklar günlük işlevlere olumsuz etkileri nedeniyle daha kolayca tanınırken, pasif bileşendeki benzer değişiklikleri belirlemek daha zordur. Bu belirgin bilgi eksikliği, iskelet kaslarının büyümesinde, metabolizmasında veya işlevinde pasif iskelet kas sertliğinin önemli bir rol oynamadığı anlamına gelmemelidir. Yapılan çok sayıda *in vitro* çalışma göstermiştir ki, iskelet kaslarında pasif sertliğe önemli katkı sağlayan ekstraselüler matriks (ECM) içindeki kollajen bağ dokusu ağıdır. ECM'nin, mekanotransdüksiyonun yanı sıra kas büyümesi ve adaptasyonu için hayati olduğu gerçeği giderek daha belirgin hale gelmektedir. Ayrıca yapılan birçok çalışma ile pasif sertliğin kas performansında ve egzersiz uyumunda rol oynadığı gösterilmiştir (8). Artan kollajen içeriği ve sertliği, tipik yaşlanmanın yanı sıra, spastisitedeki kas patolojilerinin de temelini oluşturmaktadır. Kas sertliğinin eklem hareket açıklığında azalma ile yakından ilişkili olduğu açıktır. Kas sertliğinin artması, eklem sertliği ile ilişkilidir. Diğer yandan kas sertliğinin azalması ise eklem subluksasyonuna yol açabilir. İskelet kası sertliğini ölçmek ve izlemek için güvenilir, non-invaziv, kantitatif teknikler, sadece değiştirilmiş iskelet kası sertliğinin mekanizmasını ve etkilerini anlamamıza yardımcı olmakla kalmayıp aynı zamanda yaralanmayı takiben teşhis ve tedaviyi iyileştirmek için de gereklidir. İskelet kası çok dinamik bir doku olduğu için, ideal bir teknik, fonksiyonel aralığı boyunca iskelet kası sertliğini ölçmek için gerçek zamanlı ölçüm yapmalıdır. Böyle bir teknik, sertlikteki küçük değişikliklere karşı hassas olmalı ve fonksiyonel olarak ve karmaşık iskelet kas mimarisine rağmen değişen özelliklerini belirleyebilmelidir. İşte kantitatif UE iskelet kasının mekanik özelliklerini değerlendirmek için umut veren bir tanı aracı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Gerilim elastografi, kas distrofisi dahil olmak üzere pek çok kas patolojisini değerlendirmek için kullanılmıştır (8,9). Serebral palsili çocuklarda botulinum toksin enjeksiyonlarının yapılacağı kasların belirlenmesinde elastogramda daha sert olarak tanımlanan kaslar belirlenerek enjeksiyonlar yapılmıştır (10). Miyozitli olgularda, patolojik kaslar baskın olarak daha sert görünmüştür (11). Normal kasların egzersiz öncesi ve sonrası elastogramları karşılaştırıldığında egzersiz sonrası biceps braki kasında daha fazla sertlik saptanmıştır. Bunun nedeni, artan kan akışı ve kılcak geçirgenlik ile egzersize fizyolojik yanıt olarak raporlanmıştır. Elastografi ayrıca kas travmalarında da kullanılmaktadır, normal elastogramlardan intra-musküler kanama ve fibrozis nedeni ile değişiklik göstermektedir. UE'si

ile iskelet kasının değerlendirilmesinde tekrarlanabilirlik ile ilgili birçok potansiyel sınırlama vardır. Değerlendirmeler sırasında kasın kasılma veya gevşeme gibi hangi fazda olduğu mutlaka belirtilmelidir. Ayrıca kaslar da anizotropiye maruz kalır, bu yüzden kasları değerlendirirken probun yerleşimi hep aynı düzlemde olmalıdır (8,9).

### Tendonlar

Elastografi, konvansiyonel B-mod görüntülemeyle belirgin hale gelmeden önce potansiyel olarak mukoid dejenerasyon veya küçük interstisyel yırtıklar için tendonların değerlendirilmesine olanak sağlar. Tendonlar dejenere olduğunda, kollajen lifleri parçalanır ve tendonların daha yumuşak hale geldiği öne sürülür, bu nedenle elastografi ile elastikiyetlerinde değişiklik tespit edilebilir hale gelir. Tersine, eğer bir tendon fibrozis ile tamir edilirse, bu daha sert bir elastografik resim ile tendon yapısının sertleşmesi olarak görülebilir. Aşil tendonu erişilebilirlik kolaylığı, nispeten büyük boyut ve patolojiye yakınlığı nedeniyle elastografi çalışmalarında en fazla çalışılan tendon olmuştur. B-mod ultrasonda hipoekoik olarak görülen, lineer arayüzlerde artan yansıtıcılığa sahip, sıkı paketlenmiş kollajen liflerden oluşur (12).

Semptomatik Aşil tendonlarında, mukoid dejenerasyon bölgelerine karşılık gelen kollajen liflerinin dağılması ve parçalanması söz konusudur ve bunun normal yapı ile karşılaştırıldığında daha yumuşak bir tendon yapısına yol açtığı görülmüştür. Cerrahi olarak onarılmış Aşil tendonlarında, rejeneratif dokunun sağlıklı kontrollerle göre daha sert ve heterojen olduğu gösterilmiştir. Tendinopatik tendonlarda, sağlıklı kontrollerle karşılaştırıldığında daha yavaş shear wave hızları gösterilmiştir (13,14).

### Fasya ve Ligamentler

Adeziv kapsülitli hastalarda, korakohumeral ligamanın, etkilenmemiş sağlam taraf ile karşılaştırıldığı çalışmada hasarlı tarafta ligamanın daha sert olduğunu gösterilmiştir (15). İlginç bir şekilde, bu çalışma aynı zamanda kolun dış rotasyon derecesine bağlı olarak ligamanın sertliğinde değişim olduğunu göstermiştir. Bu, adeziv kapsülitin US ile görüntülenmesinde korakohumeral ligamanın kalınlığına ek yeni bir kriter olarak kullanılabilecek heyecan verici bir gelişmedir.

Tetik parmağı olan hastalarda A1 pulley sertliğinin değerlendirildiği bir çalışmada, semptomatik hastalarda B mod görüntülerindeki değişikliklere ek olarak, pulleyin normal ile karşılaştırılmasında daha sert olduğu gösterilmiştir (16).

### Eklemler

Eklemlerin değerlendirilmesinde, özellikle sinovyum elastografisine ait çok az bilgi mevcuttur. Az sayıda hasta ile yapılan gerinim elastografisi ile ilgili olgu raporlarında, enfektif sinovit ile karşılaştırıldığında enflamatuvar sinovitin daha yumuşak görünebileceğini bildirmiştir (17,18). Ancak

veriler kesin bir yargıya varmak için yetersizdir. Normal kişiler ile enflamatuvar artropatisi olan kişilerin sinoviyumlarının elastografik görünümüne ait yayınlanmış bir veri yoktur. Elastografi ile enflamatuvar sinovitin değerlendirilmesinde Doppler US gibi yararlı bir yöntem olup olmadığını belirlemek için daha fazla araştırmaya gerek vardır (18).

## Sonuç

UE klinik uygulamada heyecan verici yeni bir gelişmedir. Gerilim elastografi ile günümüze kadar B mod ve Doppler özelliklerine ek olarak pek çok doku sertliği haritaları oluşturulmuştur. Shear wave elastografisinin geliştirilmesi elastografi teknolojilerine kantitatif bir değerlendirme getirmiş, gerilim elastografi ile karşılaştırıldığında potansiyel olarak daha az uygulayıcı bağımlı bir teknik olarak ortaya konmuştur. Kas-iskelet sisteminde ultrason elastografinin kullanılması yakın gelecekte en az karaciğer, meme ve tiroid uygulamalarında olduğu kadar yaygın ve değerli hale gelecektir. Daha fazla klinik kullanım ve araştırmalar ile güvenilirliği doğrulanacak, onaylanacak ve yaygınlaşacaktır.

### Yazarlık Katkıları

Dizayn: A.G., Ş.K., Veri Toplama veya İşleme: A.G., S.G., Analiz veya Yorumlama: A.G., Ş.K., S.G., Literatür Arama: A.G., Yazan: A.G., Ş.K.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar tarafından çıkar çatışması bildirilmemiştir.

**Finansal Destek:** Yazarlar tarafından finansal destek almadıkları bildirilmiştir.

## Kaynaklar

1. Wu CH, Chen WS, Park GY, et al. Musculoskeletal sonoelastography: a focused review of its diagnostic applications for evaluating tendons and fascia. J Med Ultrasound 2012;20:79-86.
2. Gennisson JL, Deffieux T, Fink M, et al. Ultrasound elastography: principles and techniques. Diagn Interv Imaging 2013;94:487-495.
3. Drakonaki EE, Allen GM, Wilson DJ. Ultrasound elastography for musculoskeletal applications. Br J Radiol 2012;85:1435-1445.
4. Taylor LS, Porter BC, Rubens DJ, et al. Three-dimensional sonoelastography: principles and practices. Phys Med Biol 2000;45:1477-1494.
5. Ophir J, Alam SK, Garra BS, et al. Elastography: Imaging the elastic properties of soft tissues with ultrasound. J Med Ultrason (2001) 2002;29:155.
6. Arda K, Ciledag N, Aktas E, et al. Quantitative assessment of normal soft-tissue elasticity using shear-wave ultrasound elastography. AJR Am Roentgenol 2011;197:532-536.
7. Elkateb Hachemi M, Callé S, Remenieras JP. Transient displacement induced in shear wave elastography: comparison between analytical results and ultrasound measurements. Ultrasonics 2006;44(Suppl 1):221-225.
8. Eby SF, Song P, Chen S, et al. Validation of shear wave elastography in skeletal muscle. J Biomech 2013;27;46:2381-2387.
9. Chen J, O'dell M, He W, et al. Ultrasound shear wave elastography in the assessment of passive biceps brachii muscle stiffness: influences of sex and elbow position. Clin Imaging 2017;45:26-29.

10. Brandenburg JE, Eby SF, Song P, et al. Quantifying passive muscle stiffness in children with and without cerebral palsy using ultrasound shear wave elastography. *Dev Med Child Neurol* 2016;58:1288-1294.
11. Domire ZJ, McCullough MB, Chen Q, et al. Wave attenuation as a measure of muscle quality as measured by magnetic resonance elastography: initial results. *J Biomech* 2009;42:537-540.
12. Klauser AS, Faschingbauer R, Jaschke WR. Is sonoelastography of value in assessing tendons? *Semin Musculoskelet Radiol* 2010;14:323-333.
13. Kot BC, Zhang ZJ, Lee AW, et al. Elastic modulus of muscle and tendon with shear wave ultrasound elastography: variations with different technical settings. *PLoS One* 2012;7:e44348.
14. Brum J, Bernal M, Gennisson JL, et al. In vivo evaluation of the elastic anisotropy of the human Achilles tendon using shear wave dispersion analysis. *Phys Med Biol* 2014;59:505-523.
15. Wu CH, Chen WS, Wang TG. Elasticity of the Coracohumeral Ligament in Patients with Adhesive Capsulitis of the Shoulder. *Radiology* 2016;278:458-464.
16. Miyamoto H, Miura T, Isayama H, et al. Stiffness of the first annular pulley in normal and trigger fingers. *J Hand Surg Am* 2011;36:1486-1491.
17. Lalitha P, Reddy B. Synovial Sonoelastography: Utility in differentiating between inflammatory and infective synovitis- a comparative study with magnetic resonance imaging. *Eur Soc Radiol* 2011:470.
18. Lalitha P, Reddy MCh, Reddy KJ. Musculoskeletal applications of elastography: a pictorial essay of our initial experience. *Korean J Radiol* 2011;12:365-375.