

4. Diyafram Ultrasonografisi

Doç. Dr. Ashhan GÜRÜN KAYA, Prof. Dr. Akın KAYA

Ankara Üniversitesi Tıp Fakültesi, Göğüs Hastalıkları Anabilim Dalı, Ankara

ÖZET

Diyafram ultrasonografisi, son yıllarda göğüs hastalıkları ve yoğun bakım pratiğinde giderek daha fazla önem kazanan, non-invaziv ve yatak başı uygulanabilen bir görüntüleme yöntemidir. Diyaframın anatomisi ve fizyolojisine dair temel bilgiler eşliğinde bu yöntem; diyafram zayıflığı, paralizisi, mekanik ventilasyon sürecindeki izlem, zorlu ekstübasyon vakalarının değerlendirilmesi ve nöromusküler hastalıkların tanısında kullanılır. Teknik olarak subkostal, interkostal, posterior subkostal ve subksifoid yaklaşımlar ile uygulanabilen diyafram ultrasonu, özellikle M-modu ve B-modu ile diyafram hareketi ve kalınlığı gibi önemli parametreleri ölçme imkânı sunar. Diyafram kalınlığı (Tdi), kalınlaşma fraksiyonu (TF) ve ekskürsiyon gibi parametreler yardımıyla hem fonksiyonel hem de yapısal değerlendirme yapılabilir. Kritik hastalarda TF < %20 ya da DE < 10 mm gibi eşik değerler, diyafram disfonksiyonunun belirlenmesinde önem taşır. Yöntem, yüksek güvenilirliğe sahip olsa da operatör bağımlılığı, hasta faktörleri ve teknik sınırlılıklar gibi bazı kısıtlılıklar içermektedir. Son yıllarda geliştirilen elastografi, speckle tracking, otomatik ölçüm yazılımları ve yapay zekâ destekli algoritmalar ile bu yöntemin doğruluğu ve yaygınlığı artmaktadır. Diyafram ultrasonu, yoğun bakım ve solunum sistemi hastalıklarında tanı, izlem ve tedavi planlamasında önemli katkılar sunan, potansiyeli yüksek bir görüntüleme tekniğidir.

1. DİYAFRAMIN ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ

Diyafram, göğüs ve karın boşluklarını ayıran ana solunum kasımızdır. Yapısal olarak kostal kısım ve krural kısım olmak üzere iki ana kas bölgesinden ve bunların ortasında yer alan kasılmayan bir merkezî tendondan oluşur. Kostal kısımdan çıkan kas lifleri kraniyal yönde eğimli seyrederek alt göğüs kafesine iç yüzeyden yapışır; bu bölge appozisyon zonu olarak adlandırılır. Diyafram kasılmasıyla birlikte bu bölgedeki lifler kısalıp kalınlaşarak diyafram kubbesini kaudal tarafa doğru çeker. Sonuçta inspirasyon sırasında diyafram aşağı iner ve göğüs boşluğunun dikey çapı artarak intratorasik basınç düşer, akciğerler hava ile dolar (1).

Diyafram, sürekli solunum işini üstlenebilmek için yüksek oranda yorulmaya dirençli kas lifleri içerir. Yetişkin bir insan diyaframındaki kas liflerinin yaklaşık %55'i tip I (yavaş ve yüksek dirençli), %21'i tip IIA (orta dirençli) ve %24'ü tip IIB (hızlı ancak çabuk yorulan) fiber tipindedir (2). Bu sayede diyafram dinlenme sırasında kapasitesinin küçük bir kısmıyla çalışarak solunumu sürdürebilir ve önemli bir rezerv kapasiteye sahiptir. Diyaframın esas sinirsel uyarısını, boyun bölgesindeki C3-C5 köklerinden çıkan frenik sinir sağlar. Sağ ve sol frenik sinirler diyaframın motor innervasyonunu sağlayarak kasılmasını uyarır. Solunum merkezinden çıkan uyarı ile frenik sinir diyafram kasının kasılmasını sağlar ve inspirasyonu başlatır (3).

2. DİYAFRAM FONKSİYON BOZUKLUKLARI

Diyafram disfonksiyonu diyafram kasının kapasitesindeki kayıp olarak tanımlanır. Diyafram zayıflığı veya paralizisi tek taraflı ya da iki taraflı olabilir. Tek taraflı diyafram paralizisi çoğu zaman belirgin semptom vermez ve başka bir nedenle çekilen akciğer grafisinde diyafram yükselmesi görülmesiyle tesadüfen tanınabilir (4). Bazı hastalarda tek taraflı paralizisi eforla veya özellikle hasta sırtüstü yattığında belirginleşen nefes darlığına yol açabilir. İki taraflı diyafram disfonksiyonu ise belirgin inspiratuar kas kuvvet kaybına neden olarak efor dispnesi, ortopne (yatar pozisyonda solunum güçlüğü), egzersiz kapasitesinde azalma, uyku sırasında solunum bozuklukları ve kronik hipoventilasyon bulgularına yol açabilir. Diyafram fonksiyon bozukluğunun klinik bulguları özgül olmadığından, altta yatan neden sıklıkla gözden kaçabilir ve olgular pratikte az tanı alır (1).

Diyafram disfonksiyonuna yol açan çok çeşitli etyolojiler vardır. Diyafram kasının kendisini tutan primer miyopatiler, santral sinir sistemi veya motor nöron hastalıkları, nöromusküler kavşak hastalıkları ve frenik sinir hasarları diyaframın kısmi veya tam felcine yol açabilir (1). Ayrıca, yaygın kritik hastalıklar sırasında diyafram da etkilenebilir; örneğin sepsis veya çoklu organ yetmezliği durumlarında inflamatuvar süreç ve uzun süreli mekanik ventilatör desteğinin etkisiyle kritik hastalığa bağlı diyafram zayıflığı gelişebilir. Yoğun bakım ünitesine kabul edilen ağır hastalarda, özellikle solunum yetmezliği nedeniyle mekanik ventilasyona bağlanan hastalarda, daha ilk günlerde bile diyafram fonksiyonunda belirgin düşüşler saptanabilmektedir. Yoğun bakımda uzun süre ventilatörde kalan hastalarda diyafram disfonksiyonunun prevalansının %30'un üzerinde olduğu bildirilmiştir (5).

Diyafram disfonksiyonundan şüphelenilen durumlarda tanı için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Ayırıcı tanıda akciğer grafisinde hemidiyafram yüksek duruşu, floroskopik "sniff" testi (ani inspiryumda diyafram hareketinin izlenmesi), transdiyafragmatik basınç ölçümü (özofageal ve gastrik basınç kateterleriyle) ve elektromiyografi gibi teknikler yer alır. Ancak bu yöntemlerin bir kısmı invaziv veya zor uygulanır olduğundan klinik pratikte sınırlı kullanılmaktadır. Diyafram ultrasonografisi, diyafram hareketlerini ve varsa disfonksiyonunu değerlendirmek için son yıllarda ön plana çıkan, yatakbaşında uygulanabilen, non-invaziv bir görüntüleme yöntemidir (1).

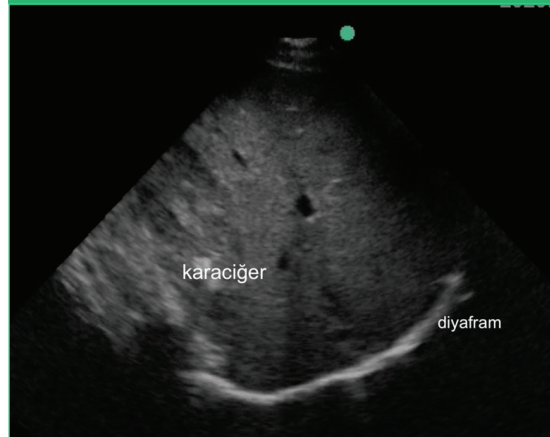
3. DİYAFRAM ULTRASONOGRAFİSİNİN TEKNİK YÖNLERİ

I. Kullanılan Prob Türleri ve Görüntüleme Modları (B ve M Mod)

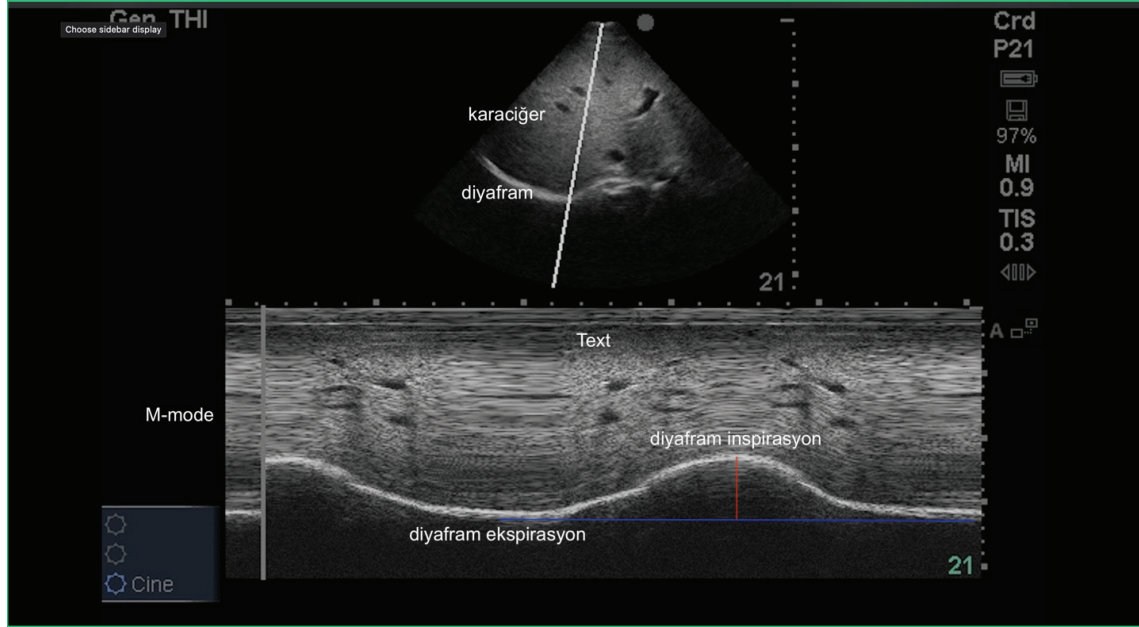
Diyafram ultrasonunda düşük frekanslı konveks ya da sektör problar ve yüksek frekanslı lineer prob kullanılır. Düşük frekanslarda (tipik olarak 2-5 MHz) çalışarak ses dalgalarının daha derine penetrasyonuna imkân tanır; bu prob geniş bir görüş alanı sağlayarak karaciğer altından diyafram kubbesinin derin lokasyonunu görüntülemeye uygundur. Ancak konveks problarda çözünürlük biraz düşüktür. Yüksek frekanslı lineer problar (7-12 MHz) ise yüzeysel yapıları çok yüksek çözünürlükle gösterebilir ancak penetrasyon derinliği sınırlıdır. Diyaframın interkostal mesafede görüntülenmesi için lineer prob idealdir; karaciğer üzerinden hareketini izlemek için ise düşük frekanslı konveks ya da sektör prob tercih edilir. Genellikle ICU ve acil servis koşullarında mevcut taşınabilir ultrason cihazları bu incelemeyi yapabilecek donanıma sahiptir (6).

Görüntüleme modlarından B-modu (brightness mod), ultrasonun gerçek zamanlı iki boyutlu kesit görüntüsünü sunar ve diyaframın anatomik yapısını, kalınlığını ölçmek için kullanılır B-modunda diyafram ve çevre dokuların anlık durumunu değerlendirmek, kaliperlerle mesafe ölçümü yapmak mümkündür. M-modu (motion mod) ise seçilen tek bir ultrason kesit hattındaki yapının zaman içindeki hareketini

Resim 1. Subkostal ultrasonografik değerlendirilmede sağ hemidiyafram ve karaciğer görünümü. Düşük frekanslı konveks prob ile sağ subkostal alandan yapılan değerlendirmede, karaciğer akustik pencere olarak kullanılarak altında parlak hiperekoik çizgi şeklinde diyafram kubbesi izlenmektedir.



Resim 2. Subkostal yaklaşımda M-modu ile diyafram hareketinin ölçümü. Üstte B-modunda diyaframa ait hiperekojen çizgiye ultrason kursoru dik bir şekilde yerleştirildikten sonra, M-moduna geçilerek zaman içinde diyafram hareketi kaydedilmiştir. Diyafram inspirasyon sırasında yukarı, ekspirasyon sırasında aşağı yönlü hareket eder. Kırmızı çizgi diyaframın ekskürsiyon miktarını göstermektedir.



grafiğe döker. Ekranda dikey eksen mesafe, yatay eksen zaman olacak şekilde, M-modu hattı altından geçen diyaframın hareket dalgası izlenir. M-modu, yüksek zaman çözünürlüğüyle diyaframın hareket amplitüdünü ölçmede çok kullanışlıdır; örneğin inspirasyon sırasında diyafram kubbesinin nasıl aşağı indiğini net bir şekilde zaman çizelgesi üzerinde gösterir. Diyafram ultrasonunda genellikle B-modu ile yapı ve kalınlık izlendikten sonra, aynı noktada M-moduna geçilerek hareket miktarı ölçülür. Her iki mod da birbirini tamamlar biçimde kullanılabilir. Deneyimli uygulayıcılar arasında diyafram kalınlığı ve hareketi ölçümlerinin tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğu gösterilmiştir (6).

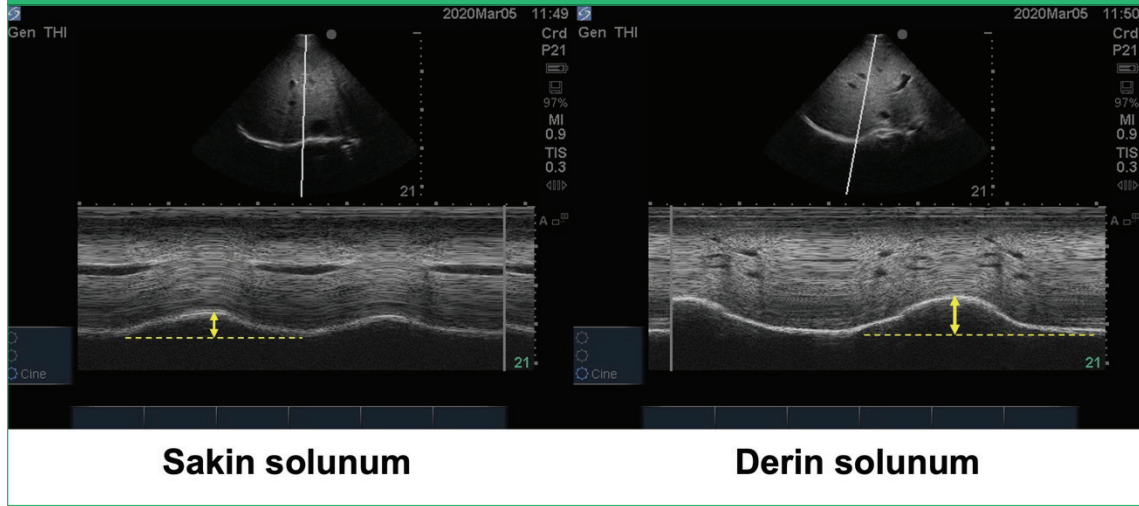
Diyafram değerlendirilmesi teknik olarak oturur ya da supin pozisyonda yapılabilir de genellikle hastanın başı 30-45° yükseltildiği supin pozisyonda yapılır. İnceleme sırasında karaciğerin akustik penceresi nedeniyle sağ hemidiyafram en iyi görüntü alınabilen taraftır. Sol diyafram da dalağın altından benzer şekilde görüntülenebilse de mide gazı ve teknik zorluklar nedeniyle genellikle sağ tarafa kıyasla daha zor izlenir. Rutin incelemede sağ diyafram değerlendirmesi çoğunlukla yeterli kabul edilir, ancak tek taraflı bir yaralanmadan şüpheleniliyorsa her iki hemidiyaframı da değerlendirmek uygun olur (6).

II. Değerlendirme Alanları

Subkostal yaklaşım: Subkostal yaklaşımda diyafram, karın tarafından kubbe şeklindeki yapısının hareketi ile görüntülenir. Bu teknikte düşük frekanslı (2-5 MHz) bir konveks prob veya sektör prob, hastanın sağ subkostal bölgede midklavikular hattın hemen altına yerleştirilir. Prob diyafram düzlemine dik olacak şekilde açlandırılır. B-modunda karaciğer üst sınırında akustik olarak parlak (hiperekojen) bir çizgi halinde diyafram kubbesi izlenir ve inspirasyon sırasında bu çizginin ultrason probuna doğru hareket ettiği görülür. M-modu kullanılarak diyafram hareket mesafesi kayıt altına alınabilir.

Mekanik ventilatöre bağlı hastalarda subkostal yaklaşımla diyafram hareketini değerlendirirken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, ventilatörün sağladığı pasif diyafram hareketinin ayırt edilmesinin zor olmasıdır. Özellikle yüksek düzeyde basınç desteği alan entübe hastalarda görülen diyafram aşağı hareketi, hastanın kendi kas aktivitesi olmadan sadece ventilatör insuflasyonuna bağlı olabilir. Bu nedenle diyafram hareket ölçümleri için ideali, hastanın kendi eforuyla soluduğu (ventilatör desteğinin en az olduğu) anları seçmektir. Örneğin; entübe bir hastada ölçüm yapmak için mümkünse spontan solunum denemesi (SBT) esnasında veya basınç desteğinin mi-

Resim 3. M-modunda diyafram ekskürsiyonunun sakin ve derin solunumda karşılaştırılması. Sol panelde sakin solunumda, sağ panelde derin inspirasyon sırasında diyaframın hareketi izlenmektedir. Sarı oklar ekskürsiyona işaret etmekte; sakin ve derin solunum arasındaki ekskürsiyon miktarındaki belirgin farkı görülmektedir. Derin inspirasyon sırasında diyafram hareketi daha geniş amplitüdlüdür.



nimal seviyede olduğu durumlarda diyafram ekskürsiyonu değerlendirilmelidir. Hastada yeterli solunum sürücü aktivitesi varken (örneğin; $P0.1 \geq 2 \text{ cmH}_2\text{O}$ gibi bir durum, yani inspiratuvar çaba yeterliken) belirgin derecede düşük diyafram hareketi saptanması, diyafram zayıflığı lehinedir. M-modunda diyafram kubbesinin inspiryumda yukarı yerine aşağı doğru hareket etmesi, yani paradoks hareket göstermesi ise ilgili hemidiyaframın tam paralizisini düşündürür. Subkostal yaklaşım genellikle sağ diyaframı ölçmek için kullanılsa da sol diyafram paralizi şüphesi varsa dalak üzerinden benzer bir subkostal yaklaşım denenebilir; ancak teknik olarak daha zordur ve her zaman güvenilir olmayabilir.

İnterkostal (appozisyon zonu) yaklaşımı: İnterkostal yaklaşım, diyaframın appozisyon zonu olarak adlandırılan, kostal kas liflerinin göğüs duvarına en yakın olduğu bölümünü görüntülemek için kullanılır. Bu teknikte yüksek frekanslı (7-12 MHz) lineer bir ultrason probu, genellikle midaksiller veya ön aksiller hattın 8-10. interkostal aralık seviyesinde, göğüs duvarına dik olacak şekilde yerleştirilir. Probu interkostal aralıktaki paralel hizalanması, diyaframın kas tabakasını tüm ekran boyunca kesintisiz görmek için önemlidir. B-modunda bu bölgede diyafram, üç tabakalı bir yapı olarak tanınır: ortada hipoeoik çizgi şeklinde diyafram kası, onun üst ve alt yüzeyinde ise periton ve plevra yapraklarının oluşturduğu iki parlak ekojen çizgi görülür. İnterkostal görüntülemeye bazen diyafram kası ortasında ince bir fibröz çizgi de

parlak hat şeklinde izlenebilir. Bu yaklaşım ile esas olarak diyafram kasının kalınlığı ve inspirasyon sırasında kalınlaşması değerlendirilir.

İnterkostal yaklaşım aynı zamanda diyafram hareketini kalitatif olarak değerlendirmek için de kullanılabilir. Subkostal pencerenin uygun olmadığı ameliyat yaraları ya da prob yerleştirmeyi engelleyen pansumanların bulunduğu hallerde interkostal bölgeden diyafram hareketi kısmen izlenerek ciddi bir hareket kaybı veya paradoks hareket olup olmadığı anlaşılabilir. Ancak interkostal pencereden diyaframın kranio-kaudal ekseninde ne kadar yer değiştirdiğini tam olarak ölçmek zordur ve bu yaklaşım için normal referans değerleri de net değildir. Bu nedenle interkostal yöntem, sayıdan çok gözlemsel olarak diyafram kas aktivitesini değerlendirmede ve kalınlık ölçümünde kullanılır; kantitatif ekskürsiyon ölçümü için standart teknik yine subkostal yaklaşımdır.

Posterior subkostal yaklaşım: Genellikle hastanın oturur pozisyonda olduğu durumlarda kullanılır. Düşük frekanslı konveks bir prob, arka subkostal bölgeye yerleştirilir; bu bölge sağ veya sol sagittal düzlemlerde ve B modda değerlendirilir. İşlem sırasında operatör, karaciğer veya dalak penceresinden ilgili hemidiyaframı görüntülemeye çalışır (1).

Subksifoid yaklaşım: Özellikle çocuklar ve zayıf erişkin bireylerde oldukça kullanışlıdır. Düşük frekanslı konveks bir prob, ksifoid çıkıntının altına transvers yerleştirilir ve kranial ve dorsal yönde,

arka hemidiyaframlara doğru açlandırılır. B mod görüntülemeye hem sağ hem de sol hemidiyafram birlikte izlenebilir ve bu sayede ekskürsionları niteliksel olarak karşılaştırılabilir. M modda ise her bir hemidiyaframın hareket mesafesi nesnel olarak ölçülebilir (1).

4. ÖLÇÜM PARAMETRELERİ

I. Diyafram Ekskürsiyonu

Diyaframın solunum sırasındaki hareket mesafesi, diyafram mobilitesi veya ekskürsiyonu olarak tanımlanır. Ultrason ile genellikle subkostal yaklaşımla M-modunda ölçülür. Diyafram ekskürsiyonu (DE), çoğunlukla inspiryumda diyaframın kaudal yönde katettiği mesafe (mm veya cm cinsinden) olarak rapor edilir. Normal sakin solunum yapan sağlıklı bir erişkinde diyafram ekskürsiyonu yaklaşık 1-2 cm kadardır (7). Derin bir nefes alındığında bu değer sağlıklı erkeklerde ortalama 7-8 cm'ye, kadınlarda 6-7 cm'ye kadar çıkabilir (8). Ancak yoğun bakım gibi ortamlarda genellikle tidal solunum ekskürsiyonu değerlendirilir. Kritik hastalarda yapılan çalışmalarda, diyafram ekskürsiyonunun < 1.0-1.5 cm olması önemli derecede diyafram atrofisi lehine yorumlanmıştır. Özellikle spontan solunum denemesi sırasında < 1 cm'lik hareket saptanması, muhtemel weaning başarısızlığına işaret eden bir kriter olarak kullanılmaktadır (9,10). Bazı uzmanlar, yoğun bakım hastalarında DE < 10 mm değerini diyafram disfonksiyonunun tanısında pratik bir eşik olarak önermektedir (11, 12) Maksimal inspiratuvar çaba ile bile diyafram hareketinin kısıtlı kalması (örneğin; <2.5 cm) ciddi disfonksiyon göstergesidir; örneğin kardiyojenik şok nedeniyle uzun süre ventilatörde kalan hastalarda < 25 mm'lik maksimal hareketin diyafram paralizisini düşündürdüğü bildirilmiştir (13). Ayrıca, M-modunda inspirasyon sırasında diyafram hareketinin ters yönde (yukarı) olması, yani paradoksal hareket, ilgili tarafta diyafram paralizisini tanımlayan karakteristik bir bulgudur (1,6,14).

Diyafram ultrasonu ile en sık değerlendirilen temel kantitatif parametreler diyafram kas kalınlığı (Tdi), diyafram kalınlaşma fraksiyonu (TF) ve diyafram ekskürsiyonu (DE) olup, her biri diyaframın farklı bir fonksiyonel yönünü yansıtır. Aşağıda bu parametrelerin tanımları, normal değer aralıkları ve patolojik durumlarda kullanılan sınır değerleri özetlenmiştir.

II. Diyafram Kalınlığı (Tdi)

Diyafram kasının kalınlığı, interkostal yaklaşım ile ekspirasyon sonunda ölçülür (Tdi_exp). Normal sağ-

lıklı erişkinlerde diyafram kalınlığı, supin pozisyonda FRC seviyesinde yaklaşık 1.5-2.5 mm civarındadır (1). Carillo ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada sağlıklı bireylerde ortalama Tdi_exp değerleri kadınlarda 1.4 mm, erkeklerde 1.9 mm olarak bildirilmiştir (15). Diyaframın tam inspirasyon sonunda (Tdi_insp) kalınlığı ise kasılmaya bağlı belirgin artış gösterir; maksimum derin inspirasyonda genellikle 4-6 mm düzeyine ulaşabilir (16). Diyafram kası ne kadar güçlüyse ve ne kadar aktif kasılırsa, inspirasyon sonunda o kadar kalınlaşır.

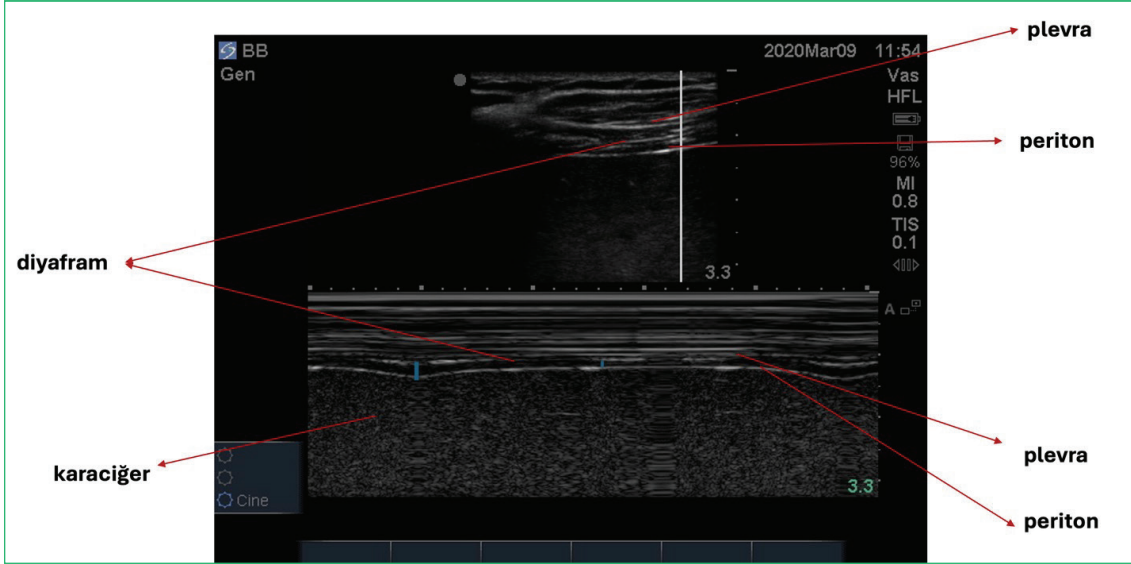
Diyafram kalınlığının tek başına ölçümü, diyafram yapısı hakkında bilgi verse de fonksiyonel kapasitesini tam olarak yansıtmayabilir. Örneğin kronik tek taraflı frenik sinir felcinde etkilenen tarafta diyafram zamanla incelişip atrofiye uğrar, ancak erken dönemde kalınlık normal sınırlarda da olabilir. Genel olarak, son ekspirasyonda diyaframın çok ince olması (örneğin; <1.2 mm, sağlıklı popülasyonda normal alt sınırı olarak bildirilen değer) anormal kabul edilir ve anlamlı kas atrofisi veya zayıflığına işaret edebilir (8). Yoğun bakım hastalarında diyafram kalınlığının günlük seri ölçümleri, diyaframdaki atrofiyi tespit etmek için kullanılmıştır; tam ventilatöre bağımlı hastalarda ilk 48-72 saatte diyafram kalınlığında günde ortalama %6 civarında azalma olabileceği gösterilmiştir. Dolayısıyla, mekanik ventilasyonda diyafram kalınlığının belirgin azalması, kullanımsızlığa bağlı atrofi (ventilatöre bağlı diyafram disfonksiyonu) geliştiğinin bir göstergesi olabilir. Öte yandan KOAH gibi kronik solunumsal yükün arttığı durumlarda diyaframın kompenzatuvar olarak hipertrofiye uğrayabileceği bilinmektedir (17-19).

III. Kalınlaşma Fraksiyonu (TF)

Kalınlaşma fraksiyonu, diyafram kasının inspirasyon sırasındaki kalınlık artışının yüzde oranıdır. Matematiksel olarak $(Tdi_{insp} - Tdi_{exp}) / Tdi_{exp} \times 100$ formülü ile ifade edilir ve B-modunda ekspirasyon sonu ve inspirasyon sonu diyafram kalınlığı ölçülerek hesaplanır. Örneğin ekspirasyonda 2 mm olan diyafram, inspirasyonda 4 mm ölçülürse kalınlaşma fraksiyonu %100'dür. Sağlıklı kişilerde maksimal eforla derin inspirasyonda bu oran %150-200'leri bulabilir (16). Tidal (sakin) solunum sırasında ise diyafram çok güçlü kasılmadığı için TF değeri bu kadar yüksek olmayacaktır; normal bir solunum eforunda %20-50 arası kalınlaşma görülebilir (20,21).

Düşük kalınlaşma fraksiyonu, diyaframın yeterince kasılmadığını veya eforun yetersiz olduğunu düşündürür. Kritik hastalarda ve ventilatörden weaning

Resim 4. İnterkostal (appozisyon zonu) yaklaşımda diyafram kalınlığının değerlendirilmesi. Yüksek frekanslı lineer prob ile sağ aksiller hatta yapılan incelemede diyafram, üstte plevra ve altta periton zarları arasında yer alan hipoekoik kas tabakası olarak izlenmektedir. Bu üç katmanlı görünüm kalınlık ölçümü için referans alınır. M-modu ile kalınlık değişimi zaman içinde takip edilebilir.



döneminde TF değerinin belli eşiklerin altında olması, diyafram disfonksiyonunu ve weaning başarısızlığını öngörebilir. Literatürde bu eşik değerler için çeşitli değerler bildirilmiştir; örneğin SBT sırasında TF < %20 değeri bazı çalışmalarda weaning başarısızlığını öngörmüştür (22,23). Diğer araştırmalarda < %30 veya < %36 gibi eşikler de önerilmiştir (24). Genel olarak kalınlık fraksiyonunun %20'nin altında olması diyaframın kuvvet üretmede yetersiz kaldığını gösteren önemli bir bulgu olarak kabul edilir Ancak TF ölçümünün hasta eforuna çok bağımlı olduğu ve her zaman diyaframın gerçek maksimal kapasitesini yansıtmadığı unutulmamalıdır. Örneğin bazı yeni çalışmalar, TF ile diyaframın ürettiği basınç (transdiyafragmatik basınç) arasında zayıf bir korelasyon olduğunu, dolayısıyla TF'nin tek başına diyafram fonksiyonu için güvenilir bir gösterge olmayabileceğini göstermiştir. Bu nedenle TF yorumlanırken hastanın ventilatör desteği, efor düzeyi ve genel klinik durumu birlikte değerlendirilmelidir (1,14).

5. KLİNİK UYGULAMALAR

Diyafram ultrasonografisi, göğüs hastalıkları ve yoğun bakım pratiğinde çeşitli durumlarda değerli bilgiler sunar. Özellikle mekanik ventilasyondaki hastaların takibinde, zor ekstübasyon olgularında, nöromusküler hastalık şüphesi olan durumlarda ve travmatik frenik sinir yaralanmalarında tanıya katkı sağlar. Aşağıda bu klinik uygulama alanları ele alınmıştır.

I. Mekanik Ventilasyon Altındaki Hastalarda Diyafram İzlemi

Yoğun bakım hastalarında diyafram fonksiyonunu izlemek, geleneksel olarak zor olduğu için uzun süre ihmal edilmiş bir alandı. Ancak ultrason sayesinde artık ventilatöre bağlı bir hastanın diyafram performansı yatakbazında takip edilebilmektedir (22,23,25). Mekanik ventilasyon sürecinde diyafram, eğer tam destekli ventilasyonda “boşta” kalırsa hızla gücünü kaybedebilir. Bu fenomene ventilatöre bağlı diyafram disfonksiyonu (VB-DD) denir. Ultrason ile entübe hastalarda diyafram kalınlığının seri ölçümü yapılarak olası atrofi saptanabilir; örneğin tam kontrol modunda yatan hastalarda diyafram kalınlığının ilk birkaç günde belirgin ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Diyaframın günde %5-7 civarında incilmesi, yüksek ventilatör desteğine bağlı kullanılmama (disuse) atrofisinin göstergesi olabilir. Bu bilgi, yoğun bakım hekimlerine ventilatör ayarlarını yeniden düzenleme (daha fazla spontan solunuma izin verme) konusunda yol gösterir. Benzer şekilde, ultrason ile diyafram kalınlık fraksiyonunun düşük seyretmesi, hastanın solunum işini tamamen ventilatöre bıraktığını göstererek ventilatör modunun ayarlanmasını gerektirebilir (17-19,26).

Ultrason, yoğun bakımda diyafram disfonksiyonunun tanınmasını da kolaylaştırmıştır. Mekanik ventilasyona alınan bir hastada, eğer hastanın kendi

solunum çabası varken diyafram hareketi < 10 mm olarak saptanıyorsa bu anormal kabul edilir ve diyafram zayıflığı tanısı konulabilir. Bu kriter, yoğun bakım pratiğinde diyafram değerlendirmesi yapılan çalışmalarda en sık kullanılan tanı eşiğidir (11,12). Böyle bir durumda altta yatan neden araştırılmalı (örneğin; kritik hastalık polinöropatisi, sepsis etkisi, frenik sinir hasarı vb.) ve mümkünse diyafram rehabilitasyonu veya desteklenmesi düşünülmelidir. Diyafram ultrasonu ayrıca hastanın solunum işi (work of breathing) hakkında da ipuçları verir: Son çalışmalar, kalınlaşma fraksiyonunun diyaframın ürettiği basınç-zaman ürününe korele olduğunu göstermiştir. Yani TF yükseldikçe hastanın solunum eforunun arttığı, TF çok düşükse solunum işinin büyük kısmını ventilatörün üstlendiği anlaşılabılır. Bu da ventilatör weaning stratejisinin planlanmasında önemlidir (1,3,5,19).

II. Zorlu Ekstübasyon ve SBT Başarısızlığında Tanı Desteği

Mekanik ventilasyondan weaning sürecinde diyaframın rolü kritiktir. Yoğun bakım hastalarının tahminen %20-30'u "zor ayrılan" hasta grubuna girmektedir ve bu vakalarda altta yatan sorunların tespiti için sistematik bir değerlendirme gereklidir. Diyafram disfonksiyonu, bu hastalarda sık karşılaşılan ve potansiyel olarak geri dönüşümlü bir ayrılma engelidir (14). Diyafram ultrasonu, spontan solunum denemesi (SBT) sırasında diyaframın yeterli katkıyı yapıp yapmadığını ortaya koyarak ayırma kararını destekler. Örneğin; SBT esnasında diyafram ekskürsionunun < 1 cm ölçülmesi veya kalınlaşma fraksiyonunun < 20 olması, ekstübasyonun muhtemelen başarısız olacağına dair bir uyarı sinyali olabilir. Bu durumda hasta yeniden desteklenip altta yatan sorunlar (örneğin; kas güçsüzlüğü, akciğer yükü, sıvı dengesi) ele alınmalıdır).

Tersine, zor ekstübasyon öyküsü olan bir hastada diyafram ultrasonu normalse (yeterli ekskürsion ve kalınlaşma gözleniyorsa), o zaman ayrılmayı engelleyen başka bir sebep aranmalıdır (örneğin; kalp yetmezliği, sekresyon birikimi veya üst havayolu ödemi gibi). Bu şekilde diyafram ultrasonu, ekstübasyon başarısızlığının diyaframa bağlı olup olmadığını ayırt etmede klinisyene yardımcı olur. Ekstübasyon sonrası erken dönemde diyafram hareketinin çok zayıf olması, yeniden entübasyon gereksinimini öngörebilir. Ancak pratikte daha çok ekstübasyon öncesi SBT sırasında değerlendirme yapılmaktadır. Diyafram ultrasonunu, zorlu weaning olgularında

çoklu disiplinler yaklaşımının bir parçası olarak görmek gerekir; kalp, akciğer, nörolojik ve diyaframa ait faktörler bütüncül değerlendirildiğinde hasta için en doğru zamanlamada ve yöntemle ekstübasyon gerçekleştirilebilir (14).

III. Nöromusküler Hastalıkların Tanısı

Nöromusküler hastalıklarda (örneğin; amyotrofik lateral skleroz, musküler distrofi, omurilik yaralanmaları) diyafram tutulumu, solunum yetmezliğinin başlıca nedenlerindendir. Bu hastalarda diyafram kuvvetini değerlendirmek zor olabilir; çünkü klasik solunum fonksiyon testleri ve maksimum inspiratuar basınç ölçümleri, hasta iş birliğine ve orofasiyal kas gücüne bağlıdır ve erken dönemde maskelenmiş kalabilir (27,28). Diyafram ultrasonu, nöromusküler hastalıklarda değerli bir tanısal araç olarak ortaya çıkmıştır. Örneğin; ALS hastalarında diyafram kalınlığının ve kalınlaşma oranının azalması, vital kapasitedeki düşüşle korelasyon göstermektedir. Vital kapasitesi %80'in altına inen ALS hastalarında diyaframın hem ekspirasyon sonu kalınlığı hem de inspirasyonla kalınlaşma oranı, normal bireylere kıyasla anlamlı derecede düşük bulunmuştur. Bu da diyafram zayıflığının objektif bir ultrasonik göstergesidir. Hatta bazı çalışmalarda, ALS'li hastalarda tidal volum düzeyindeki diyafram kalınlığının tam inspirasyondaki kalınlığa oranı kullanılarak diyafram rezervinin tükendiği noktayı belirleme girişimleri olmuştur. Erken bulbar tutulumlu ALS olgularında bile, solunum semptomları başlamadan ultrason ile diyaframdaki etkilenmeyi saptamak mümkün olabilmektedir (29,30).

Klinikte, nedeni açıklanamayan kronik hipoventilasyon veya sürekli yüksek CO_2 seviyeleri ile başvuran hastalarda, altta yatan bir nöromusküler problem düşünülüyorsa diyafram ultrasonu non-invaziv ilk tarama testi olarak yapılabilir. Özellikle kas güçsüzlüğü nedeniyle yeterli nefes alamama durumlarında (örneğin; musküler distrofi hastaları, spinal musküler atrofi, frenik sinir hasarı ile seyreden Guillain-Barré vb.), diyaframın hareket etmediğinin veya çok zayıf hareket ettiğinin ultrasonla gösterilmesi tanıya giden yolda kritik bir bulgudur. Ayrıca, takipte, bu hastalarda diyafram kalınlığının seyri ve rezerv kapasitenin izlenmesi, non-invaziv mekanik ventilasyon gereksiniminin belirlenmesinde yardımcı olabilir. Sonuç olarak diyafram US, nöromusküler hastalığı olan hastaların solunumsal değerlendirmesinde hızlı, tekrarlanabilir ve güvenilir bir araç olarak kullanılmaktadır (1,27,30,31).

IV. Travmatik Frenik Sinir Hasarı

Frenik sinirin zedelenmesine bağlı diyafram paralizileri, özellikle kardiyotorasik cerrahiler sonrasında veya servikal travmalarda görülebilir. Kalp cerrahisi geçiren hastalarda soğuk kardiyopleji veya traksiyon nedeniyle frenik sinir hasarı yaşanması sonucunda tek taraflı diyafram paralizisi gelişmesi nispeten sık bir komplikasyondur. Bu durum, hastanın postoperatif dönemde süregelen solunum yetmezliği yaşamasına yol açabilir ve radyolojik olarak diyafram yükselmesi ile kendini belli eder. Diyafram ultrasonu, travmatik veya cerrahi frenik sinir hasarını doğrulamak için birinci basamak görüntüleme yöntemidir. Yatak başında ilgili hemidiyaframın hareket edip etmediği hızlıca görülerek tanı konulabilir (14).

Özellikle ayrıntılı floroskopik tetkiklere ihtiyaç duyulmadan, ultrasonla hem diyaframın kalınlığı hem de hareketi değerlendirilebilir. Travmatik frenik sinir hasarında etkilenen tarafta diyaframın incelmesi ve inspirasyonda paradoks hareket yapacağı saptanır. Ultrason aynı zamanda paralizinin tam mı kısmi mi olduğunu da gösterebilir; örneğin kısmi innervasyon kalan olgularda hafif bir kalınlaşma veya sınırlı bir hareket izlenebilir. Bu bilgi, sinir iyileşme sürecini izlemek veya gerekirse diyafram plikasyonu gibi cerrahi müdahalelere karar vermek açısından değerlidir.

Travma sonrası veya cerrahi sonrası yoğun bakım hastalarında diyafram ultrasonu yapmak, oldukça pratik bir yaklaşımdır. Örneğin; toraks travması geçirmiş bir hastada açıklanamayan ventilatör bağımlılığı varsa, diyafram paralizisi açısından ultrason taraması yapılabilir. Aynı şekilde spinal yaralanma seviyesini değerlendirirken frenik sinir çıkış seviyesinde bir hasarın diyaframa etkisi olup olmadığı US ile tespit edilebilir. Hermans ve ark.'nın klinik tecrübelerine göre, diyafram ultrasonu pek çok olguda unilateral veya bilateral frenik sinir lezyonlarını doğrularak doğru tanı ve yönetim stratejisinin belirlenmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, frenik sinir hasarına bağlı diyafram paralizilerinde ultrason, hızlı tanı koydurup gereksiz invaziv girişimleri önleyebilen değerli bir araçtır (1,3,14,30).

6. DİYAFRAM ULTRASONUNUN KISITLILIKLARI VE DİKKAT EDİLMESİ GEREKENLER

Diyafram ultrasonografisi son derece yararlı bir yöntem olmakla birlikte, uygulanması ve yorumlanması konusunda bazı kısıtlılıklar bulunmaktadır:

• Operatör Bağımlılığı ve Eğitim

Ultrason, kullanıcıya bağımlı bir görüntüleme yöntemidir. Diyaframın doğru görüntülenmesi ve ölçümlerin tutarlı yapılabilmesi için deneyim gereklidir. Tecrübeli uygulayıcılar arasında ölçümler yüksek tutarlılıkla tekrarlanabilirken, eğitimsiz kişilerde hatalı yorumlama riski vardır. Bu nedenle, bağımsız diyafram ultrasonu yapabilmek için özellikli eğitim önerilmektedir. Her merkezde diyafram US konusunda eğitimli bir uzman bulunmayabilir, bu da yöntemin yaygın kullanımını kısıtlar (23,32).

• Cihaz ve Erişilebilirlik

Diyafram ultrasonu için gereken cihaz temelde basit bir ultrason cihazı olsa da her yoğun bakım veya klinikte uygun prob ve cihaz bulunmayabilir. Ayrıca, aynı anda birden fazla hastada sürekli izlem yapmak, cihaz kısıtlılığı nedeniyle zor olabilir. Yöntemin yaygınlaşması için taşınabilir ultrason cihazlarının her yoğun bakım yatağında erişilebilir hale gelmesi idealdir.

• Görüntüleme Zorlukları (Özellikle Sol Diyafram)

Diyaframın sol hemikupolasını görüntülemek, sağ tarafa göre daha zordur. Bunun başlıca nedeni sol akciğer gibi akustik bir pencerenin olmaması, mide ve bağırsak gazının ultrasonik görüntüyü engelleyebilmesidir. Obez hastalarda da diyaframın her iki tarafı kötü görüntülenebilir; özellikle kalın karın duvarı ve yükselmiş diyafram pozisyonu görüntülemeyi güçleştirir. Bu durumlarda farklı pozisyonlar (örneğin; hasta oturur duruma yakın) veya alternatif ultrason pencereleri (örneğin; boyundan aşağı doğru yaklaşım gibi) denenebilir, ancak başarı her zaman garanti değildir. Sol diyafram paralizilerinin bu nedenle tanıda atlanabilme riski vardır (5,14,25).

• Hastaya Bağlı Değişkenlikler

Diyafram ekskürsionu ölçümü, hastanın eforuna ve iş birliğine çok bağımlıdır. Bilinci kapalı veya kas relaksanı alan bir hastada diyafram hareketi değerlendirmek mümkün olmaz. Sedasyon düzeyi, ağrı kontrolü gibi faktörler de hastanın spontan solunum yapmasını etkiler. Ayrıca, ölçümler hastanın pozisyonundan etkilenir; supin pozisyonundan oturur pozisyona geçmek diyaframın hareket amplitüdünü değiştirebilir. Bu nedenle, takip ölçümlerinde hastanın benzer klinik koşullarda olmasına dikkat edilmelidir (1,5,14,25).

• Abdominal Baskı ve Diğer Faktörler

Hastanın karın içi basıncının artmış olması (örneğin; aşırı distansiyon, ileus, asit varlığı) diyaframın hareketini mekanik olarak kısıtlayabilir. Böyle durumlarda

da diyafram kası aslında güçlü olsa da hareket azalmış görünebilir. Ultrason yaparken bu gibi faktörleri göz önünde tutmak gerekir. Örneğin; masif asiti olan bir siroz hastasında diyafram US yapıldığında düşük ekskürsion ölçülürse, bunun nedeninin sıvı baskısı mı yoksa gerçek kas güçsüzlüğü mü olduğunu ayırt etmek önemlidir (1,5,14,25).

• Referans Değer Eksikliği ve Heterojenlik

Diyafram ultrasonu parametreleri için standart normal değerler ve evrensel eşikler tam olarak konsensus halinde değildir. Literatürde farklı merkezler farklı eşikler kullanmıştır ve hasta popülasyonları heterojendir. Örneğin; weaning başarısını öngörmekte bazı çalışmalar $TF < \%20$ derken bazıları $< \%30$ demiştir. Bu farklılıklar, çalışmalardaki metodolojik çeşitlilikten kaynaklanır. Bu nedenle klinisyenler ultrason bulgularını mutlak bir karar olarak değil, klinik bağlam içinde yorumlamalıdır. Zamanla daha fazla çalışma ve rehber geliştikçe referans aralıkları netleşecektir (1,5,14,25).

• Teknik Sınırlamalar

Ultrasonun çözünürlüğü ve penetrasyonu, probun frekansına bağlı olduğundan çok zayıf veya çok obez hastalarda sınırlı kalabilir. Ayrıca, diyafram hareketinin çok hızlı olduğu ani öksürük, çarpıntı anları gibi durumlarda M-modu bile sınırlı kalabilir. Bu gibi teknik sınırlamalar ölçüm hatalarına yol açabileceğinden, mümkün olan en iyi pencere ve ayarlarla ölçüm yapmaya çalışılmalıdır (1,5,14,25).

Özetle, diyafram ultrasonu dikkatli uygulama ve yorumlama gerektirir. Tecrübeli ellerde güvenilirliği yüksek olsa da sonuçlar hasta ve operatör faktörlerinden etkilenir. Klinik kararlar verilirken ultrason bulguları mutlaka diğer klinik verilerle birlikte değerlendirilmelidir.

7. GELECEĞE YÖNELİK TEKNOLOJİLER VE GELİŞMELER

Diyafram ultrasonografisindeki yeni gelişmeler, yonemin gelecekte daha da etkin kullanılabileceğine işaret etmektedir. Son dönemde operatör bağımsız sürekli izleme cihazları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; göğüs duvarına sabitlenebilen ve diyafram hareketini otomatik olarak ölçen bir ultrasound sensör sistemi (DXT gibi) geliştirilmiştir. Bu sayede yoğun bakım hastalarında 7/24 diyafram hareketini izlemek ve gerçek zamanlı alarm eşiklerini kullanmak mümkün olabilecektir. Bu alandaki ilerlemeler, yakın gelecekte diyafram monitörizasyonunu tıpkı EKG

monitörizasyonu gibi standart bir yoğun bakım izlemi haline getirebilir (33,34).

Bir diğer yenilik alanı, ultrason görüntü analizi tekniklerindeki gelişmelerdir. Speckle tracking ultrasonografi, diyafram kas dokusundaki doğal “speckle” desenlerini takip ederek kasın deformasyonunu (strain) ölçmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bu teknik ile diyaframın belirli bir noktadaki kasılma miktarı ve hızını kantitatif olarak değerlendirmek mümkün olabilecektir. Özellikle kardiyak ultrasonografide miyokard strain ölçümü yaygınlaşmışken, benzer şekilde diyafram için de speckle tracking uygulamaları araştırılmaktadır. İlk bulgular, diyaframın strain (gerilme) ve strain-rate ölçümlerinin, geleneksel kalınlaşma ölçümüne göre kas fonksiyonunu daha doğru yansıtabileceğini düşündürmektedir. Bu parametreler yardımıyla diyafram kasının bölgesel fonksiyon bozuklukları veya yorgunluğu daha erken tespit edilebilir (35).

Elastografi de diyafram değerlendirmesinde ufuk açıcı bir teknoloji olarak görülmektedir. Shear-wave elastografi, ultrason dalgalarıyla dokuda oluşturulan kesme dalgalarının yayılım hızını ölçerek doku sertliğini belirler. Diyafram kasının elastografik ölçümü ile fibrozis, kas sertliği veya pasif gerilim hakkında bilgi edinmek mümkün olabilir. Örneğin; kronik KOAH’lı hastalarda diyafram kasının sertlik profili ile sağlıklı bireylerinki karşılaştırılarak, diyaframın adaptif değişimleri değerlendirilebilir. Ayrıca, elastografi ile kas kontraksiyonu sırasında oluşan sertlik değişimi takip edilerek kasın güç üretme kapasitesi dolaylı olarak ölçülebilir. Henüz araştırma safhasında olan bu yöntemler için ilk sonuçlar, diyafram fonksiyonunun daha güvenilir göstergelerini sunabileceklerini göstermiştir (35).

Son olarak, yapay zekâ ve görüntü tanıma alanındaki ilerlemelerin de diyafram ultrasonuna entegre olması beklenmektedir. Otomatik kenar tespiti ve ölçüm algoritmaları, kullanıcı bağımsız niceliksel diyafram ölçümleri sağlayabilir. Böylece aynı anda birden fazla hastanın ultrason ile takibi yapılabilir ve veriler klinik karar destek sistemlerine entegre edilebilir. Gelecekte, yoğun bakım monitörlerinde diyaframın gerçek zamanlı kalınlık veya hareket eğrilerini görmek mümkün olabilecektir. Tüm bu teknolojik gelişmeler, diyaframın “unutulmuş” solunum kası olmaktan çıkıp, solunum yetmezliği yönetiminin merkezinde izlenen bir parametre haline gelmesini sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Santana PV, Cardenas LZ, Albuquerque ALP, et al. Diaphragmatic ultrasound: a review of its methodological aspects and clinical uses. *J Bras Pneumol*. 2020;46(6):e20200064.
2. Gransee HM, Mantilla CB, Sieck GC. Respiratory muscle plasticity. *Compr Physiol*. 2012;2(2):1441-62.
3. McCool FD, Tzelepis GE. Dysfunction of the diaphragm. *N Engl J Med*. 2012;366(10):932-42.
4. Caleffi-Pereira M, Pletsch-Assuncao R, Cardenas LZ, et al. Unilateral diaphragm paralysis: a dysfunction restricted not just to one hemidiaphragm. *BMC Pulm Med*. 2018;18(1):126.
5. Dres M, Goligher EC, Heunks LMA, et al. Critical illness-associated diaphragm weakness. *Intensive Care Med*. 2017;43(10):1441-52.
6. Boussuges A, Rives S, Finance J, et al. Assessment of diaphragmatic function by ultrasonography: Current approach and perspectives. *World J Clin Cases*. 2020;8(12):2408-24.
7. Testa A, Soldati G, Giannuzzi R, et al. Ultrasound M-mode assessment of diaphragmatic kinetics by anterior transverse scanning in healthy subjects. *Ultrasound Med Biol* 2011;37:44-52.
8. Boon AJ, Harper CJ, Ghahfarokhi LS, et al. Two-dimensional ultrasound imaging of the diaphragm: quantitative values in normal subjects. *Muscle Nerve*. 2013;47(6):884-9.
9. Jiang JR, Tsai TH, Jerng JS, et al. Ultrasonographic evaluation of liver/spleen movements and extubation outcome. *Chest*. 2004;126(1):179-85.
10. Spadaro S, Grasso S, Mauri T, et al. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index. *Crit Care*. 2016;20(1):305.
11. Mariani LF, Bedel J, Gros A, et al. Ultrasonography for Screening and Follow-Up of Diaphragmatic Dysfunction in the ICU: A Pilot Study. *J Intensive Care Med*. 2016;31:338-43.
12. Kim WY, Suh HJ, Hong SB, et al. Diaphragm dysfunction assessed by ultrasonography: influence on weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med*. 2011;39(12):2627-30.
13. Lerolle N, Guerot E, Dimassi S, et al. Ultrasonographic diagnostic criterion for severe diaphragmatic dysfunction after cardiac surgery. *Chest*. 2009;135(2):401-7.
14. Hermans G, Demoule A, Heunks L. How I perform diaphragmatic ultrasound in the intensive care unit. *Intensive Care Med*. 2024;50(12):2175-8.
15. Carrillo-Esper R, Perez-Calatayud AA, Arch-Tirado E, et al. Standardization of Sonographic Diaphragm Thickness Evaluations in Healthy Volunteers. *Respir Care*. 2016;61:920-4.
16. Cardenas LZ, Santana PV, Caruso P, et al. Diaphragmatic Ultrasound Correlates with Inspiratory Muscle Strength and Pulmonary Function in Healthy Subjects. *Ultrasound Med Biol*. 2018;44(4):786-93.
17. Goligher EC, Laghi F, Detsky ME, et al. Measuring diaphragm thickness with ultrasound in mechanically ventilated patients: feasibility, reproducibility and validity. *Intensive Care Med*. 2015;41(4):642-9.
18. Grosu HB, Lee YI, Lee J, et al. Diaphragm muscle thinning in patients who are mechanically ventilated. *Chest*. 2012;142(6):1455-60.
19. Schepens T, Verbrugghe W, Dams K, et al. The course of diaphragm atrophy in ventilated patients assessed with ultrasound: a longitudinal cohort study. *Crit Care*. 2015;19:422.
20. Santana PV, Prina E, Caruso P, et al. Dyspnea of unknown cause. Think about diaphragm. *Ann Am Thorac Soc*. 2014;11(10):1656-9.
21. Summerhill EM, El-Sameed YA, Glidden TJ, et al. Monitoring recovery from diaphragm paralysis with ultrasound. *Chest*. 2008;133(3):737-43.
22. Jung B, Moury PH, Mahul M, et al. Diaphragmatic dysfunction in patients with ICU-acquired weakness and its impact on extubation failure. *Intensive Care Med*. 2016;42(5):853-61.
23. DiNino E, Gartman EJ, Sethi JM, et al. Diaphragm ultrasound as a predictor of successful extubation from mechanical ventilation. *Thorax*. 2014;69(5):423-7.
24. Ferrari G, De Filippi G, Elia F, et al. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J*. 2014;6(1):8.
25. Zambon M, Greco M, Bocchino S, et al. Assessment of diaphragmatic dysfunction in the critically ill patient with ultrasound: a systematic review. *Intensive Care Med*. 2017;43(1):29-38.
26. Zambon M, Beccaria P, Matsuno J, et al. Mechanical Ventilation and Diaphragmatic Atrophy in Critically Ill Patients: An Ultrasound Study. *Crit Care Med*. 2016;44(7):1347-52.
27. Benditt JO, Boitano LJ. Pulmonary issues in patients with chronic neuromuscular disease. *Am J Respir Crit Care Med*. 2013;187(10):1046-55.
28. Fromageot C, Lofaso F, Annane D, et al. Supine fall in lung volumes in the assessment of diaphragmatic weakness in neuromuscular disorders. *Arch Phys Med Rehabil*. 2001;82(1):123-8.
29. Hiwatani Y, Sakata M, Miwa H. Ultrasonography of the diaphragm in amyotrophic lateral sclerosis: clinical significance in assessment of respiratory functions. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener*. 2013;14(2):127-31.
30. Fantini R, Tonelli R, Castaniere I, et al. Serial ultrasound assessment of diaphragmatic function and clinical outcome in patients with amyotrophic lateral sclerosis. *BMC Pulm Med*. 2019;19(1):160.
31. Sartucci F, Pelagatti A, Santin M, et al. Diaphragm ultrasonography in amyotrophic lateral sclerosis: a diagnostic tool to assess ventilatory dysfunction and disease severity. *Neurol Sci*. 2019;40(10):2065-71.
32. Garofalo E, Bruni A, Pelaia C, et al. Comparisons of two diaphragm ultrasound-teaching programs: a multicenter randomized controlled educational study. *Ultrasound J*. 2019;11(1):21.
33. Demoule A, Fosse Q, Mercat A, et al. Operator independent continuous ultrasound monitoring of diaphragm excursion predicts successful weaning from mechanical ventilation: A prospective observational study. *Crit Care*. 2024;28(1):245.
34. Dres M, Demoule A. Monitoring diaphragm function in the ICU. *Curr Opin Crit Care*. 2020;26(1):18-25.
35. Bachasson D, Dres M, Nierat MC, et al. Diaphragm shear modulus reflects transdiaphragmatic pressure during isovolumetric inspiratory efforts and ventilation against inspiratory loading. *J Appl Physiol* (1985). 2019;126(3):699-707.