



# Toraks Bilgisayarlı Tomografi Kantitatif Ölçüm Parametreleri ile Solunum Fonksiyon Testi Arasındaki Korelasyonun İncelenmesi: Retrospektif Çalışma

## A Correlation Between Quantitative Measurement Parameters of Thorax Computed Tomography and Pulmonary Function Test: A Retrospective Study

● Hadi SASANI<sup>1</sup>, ● Levent Cem MUTLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim Dalı, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tıp Fakültesi, Göğüs Hastalıkları Anabilim Dalı, Tekirdağ, Türkiye

### ÖZ

**Amaç:** Pulmoner fonksiyonel ve hacimsel değerlendirme rutin olarak solunum fonksiyon testi (SFT) ile yapılmaktadır. Ancak bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülemeye hacimsel değerlendirme de mümkündür. Bu çalışmanın amacı, SFT ile BT hacimsel bulguları arasındaki ilişkiyi incelemektir.

**Gereç ve Yöntem:** Nisan 2017 ile Mayıs 2020 tarihleri arasında toraks BT (parankimal hastalığı olmayan) ve SFT yapılan toplam 69 hasta (34 erkek, 35 kadın) retrospektif olarak incelendi. Optimum kalitede görüntüler ve PFT incelemeleri kaydedildi. BT'de, her iki akciğerin hacmi ve yoğunluğu ile toplam akciğer hacmi (TLV) ve toplam akciğer yoğunluğu (TLD) hesaplandı. BT ile değerlendirme için bir saniyedeki zorlu ekspiratuvar hacim (FEV1), zorlu vital kapasite (FVC), FEV1/FVC oranı kaydedildi.

**Bulgular:** Toplam 69 hastada (34 erkek, %49,3; 35 kadın, %50,7) ortalama yaş 55±14,56 yıl, FEV1=2.12±0,87, FVC=2,92±1,05, FEV1/FVC oranı=72,19±13,07 sağ akciğer hacmi=2118,06±662,36, sağ akciğer yoğunluğu=-806,8±68,16, sol akciğer hacmi=1755,35±605,02, sol akciğer yoğunluğu=-774,80±248,98, TLV=3820±1272,35 ve TLD=-1597,17±295,70 idi. FEV1, FVC ve FEV1/FVC oranı bilateral (sağ ve sol) akciğer hacmi ve yoğunluğu ile pozitif korelasyon gösterdi (p<0,05).

**Sonuç:** SFT, solunum semptomlarına neden olan hastalıkların ciddiyetini ve seyrini değerlendirebilen önemli kantitatif pulmoner fonksiyonel veriler sağlar. Ancak, SFT'nin yapılamadığı durumlarda (koronavirüs hastalığı-19 gibi) BT kantitatif pulmoner hacimsel değerlendirme, ana pulmoner fonksiyonların değerlendirilmesinde alternatif bir yöntem olabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Akciğer hacmi ölçümleri, bilgisayarlı tomografi, solunum fonksiyon testi

### ABSTRACT

**Aim:** Pulmonary functional and volumetric evaluation is routinely performed with pulmonary function test (PFT). However, volumetric evaluation is also possible in computed tomography (CT) imaging. The aim of this study is to examine the relationship between PFT and CT volumetric findings.

**Materials and Methods:** Between April 2017 and May 2020, a total of 69 patients (34 males, 35 females) having thorax CT (without any parenchymal disease) and PFT were studied retrospectively. The images and PFT examinations with an optimum quality were enrolled. In CT, the volume and density of both lungs as well as total lung volume (TLV) and total lung density (TLD) were calculated. Forced expiratory volume in 1 second (FEV1), forced vital capacity (FVC), and FEV1/FVC ratio were recorded for the assessment with CT.

**Results:** In a total of 69 patients (34 male, 49.3%; 35 female, 50.7%), the mean age was 55±14.56 years, FEV1=2.12±0.87, FVC=2.92±1.05, FEV1/FVC ratio=72.19±13.07, right lung volume=2118.06±662.36, right lung density=-806.8±68.16, left lung volume=1755.35±605.02, left lung density=-774.80±248.98, TLV=3820±1272.35 and TLD=-1597.17±295.70. FEV1, FVC and FEV1/FVC ratio showed a positive correlation with bilateral (right and left) lung volume and density (p<0.05).

**Yazışma Adresi/Address for Correspondence:** Dr. Hadi SASANI, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim Dalı, Tekirdağ, Türkiye

**Tel.:** +90 282 250 74 55 **E-posta:** hsasani@nku.edu.tr **ORCID ID:** orcid.org/0000-0001-6236-4123

**Geliş tarihi/Received:** 20.12.2020 **Kabul tarihi/Accepted:** 10.07.2021

**Conclusion:** PFT provides important quantitative pulmonary functional data that can evaluate the severity and course of diseases causing respiratory symptoms. However, in cases where PFT cannot be performed (such as Coronavirus Disease-2019), CT quantitative pulmonary volumetric evaluation can be an alternative in the evaluation of main pulmonary functions.

**Keywords:** Lung volume measurements, computed tomography, respiratory function test

## GİRİŞ

Akciğer hacimleri, toplam akciğer kapasitesinin (TLC) (inspiratuvar volüm), statik ekspiratuvar hacimlerin ve dinamik hacimlerin [bir saniyedeki zorlu ekspiratuvar hacim (FEV1)] değerlendirilebildiği solunum fonksiyon testleri (SFT) kullanılarak rutin olarak değerlendirilir. Ancak, tek taraflı veya bölgesel akciğer hacimlerinin ölçümü SFT'de zordur<sup>1</sup>.

Akciğer hacimleri arasında tidal volüm [(TV) normal solunum sırasında akciğer hacmindeki değişiklik], inspiratuvar rezerv hacim (normal TV inspirasyonunun sonunda solunabilen ekstra hacim), ekspiratuvar rezerv hacim (normal TV ekspirasyonunun sonunda solunabilen ekstra hacim) bulunur ve rezidüel hacim (maksimum ekspirasyonun sonunda akciğerlerde kalan hacim) bulunur. Vital kapasite, maksimum inspirasyonun sonu ile maksimum ekspirasyonun sonu arasındaki hacim değişikliğidir. Fonksiyonel rezidüel kapasite, normal ekspirasyon sonunda akciğerlerde kalan hacimdir. TLC, akciğerlerdeki toplam hacimdir<sup>2</sup>.

Toraks bilgisayarlı tomografisi (BT), mediastinal veya pulmoner parankimal hastalıkların değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan, bölgesel yoğunluğu yansıtan indeksler sağlayan, anatomik yapıların ve akciğerlerin yoğunluğunu veya hacmini ölçebilen bir modalitedir<sup>1,3</sup>.

Diffüz akciğer hastalığı olan hastaların takibinde SFT'ler görüntüleme ile birlikte kullanılmaktadır. Literatürde kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH)<sup>4-7</sup>, interstisyel akciğer hastalığı (İAH) veya pulmoner fibrozis<sup>8,9</sup>, akciğer transplantasyonu<sup>10</sup>, bronşiyal kapak tedavisi sonrası<sup>11</sup>, romatoid artrit<sup>12</sup>, akciğer kanseri<sup>13</sup> ve skolyoz<sup>14</sup> hastalarında SFT ve BT arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmalar bulunmaktadır.

Bu yazıda normal popülasyonda SFT ve BT volümetrik sonuçlarını değerlendirmeyi ve BT volümetrik değerlerinin özellikle Koronavirüs hastalığı-2019 (COVID-19) gibi SFT yapılmasının imkansız olduğu olağanüstü durumlarda SFT değerlendirmesi için iyi bir öngörücü olup olamayacağını değerlendirmeyi amaçladık.

## GEREÇ VE YÖNTEM

### Çalışma Popülasyonu

Nisan 2017-Mayıs 2020 tarihleri arasında herhangi bir endikasyonu olan, herhangi bir parankimal hastalığı olmaksızın

toraks BT tetkiki yapılan ve SFT olan toplam 69 hasta (34 erkek, 35 kadın) retrospektif olarak incelendi.

Malignite, kronik hastalık ve akciğer parankim hastalığı (infiltrasyon, konsolidasyon, tümör vb.) öyküsü olmayan, BT görüntüleri iyi kalitede ve inspirasyon olan, SFT yapılan 18 yaş ve üzeri hastalar çalışmaya alındı.

Dahil edilme kriteri, normal spirometrik değerlere sahip denekler olması.

Dışlama kriterleri aşağıdaki gibi idi:

- 1) Göğüs cerrahisi geçirenler,
- 2) BT'de pnömotoraks, plevral efüzyon, pnömoni, amfizem, İAH, kronik bronşit, bronşektazi, akciğer bülleri, akciğer apsesi veya akciğer kitlesi, akciğer neoplazmi bulgusu olan olgular,
- 3) Solunum veya BT görüntü kalitesi yetersiz, parankim hastalığı olan, 18 yaşından küçük ve SFT olmayan hastalar,
- 4) Aktif sigara içenler ve eskiden sigara içenler çalışma dışı bırakıldı.

Hastaların bilgileri hastanenin veri sisteminden alındı.

Görüntü arşivleme ve iletişim sisteminden (PACS) BT görüntüleri ve hastane veri sisteminden SFT'ler elde edildi.

Bu çalışma, üniversite/yerel insan araştırmaları etik komitesi tarafından onaylanmıştır ve insan katılımcıları içeren çalışmalarda gerçekleştirilen tüm prosedürler, kurumsal ve/veya ulusal araştırma komitesinin etik standartlarına ve 1964 Helsinki Deklarasyonu ve sonraki değişiklikleri veya benzerleri ile uyumludur. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu çalışma protokolünü onaylamıştır (onay no: 2020.148.06.10).

### Çalışma Protokolü

Herhangi bir endikasyonu olan 70 hastanın kontrastsız BT incelemeleri çalışmaya dahil edildi. BT taraması için 128-sıra çok dedektörlü bir BT tarayıcı (Aquilion™ Prime; Canon Medical Systems) kullanıldı. Tüm göğsün görüş alanı (FOV), tek bir nefes tutma ile akciğer apeksinden diyaframa kadar tarandı. Hastalar cihaz masasında sırtüstü yatar pozisyonda ve kolları başın üzerindeydi.

BT alımı aşağıdaki parametrelerle yapıldı: Kişisel vücut kitle indeksi (VKİ) dozu ile modüle edilen 100-250 mAs akımı;

100-140 kV tüp voltajı ve 0,5 mm x 80 kolimasyon, 0,35 sn gantri dönüş zamanı, 0,813 adım faktörü, FOV: 20x20 cm, kesit kalınlığı 1 mm ve kesit aralığı 0,8 mm.

### Görüntülemenin Değerlendirilmesi

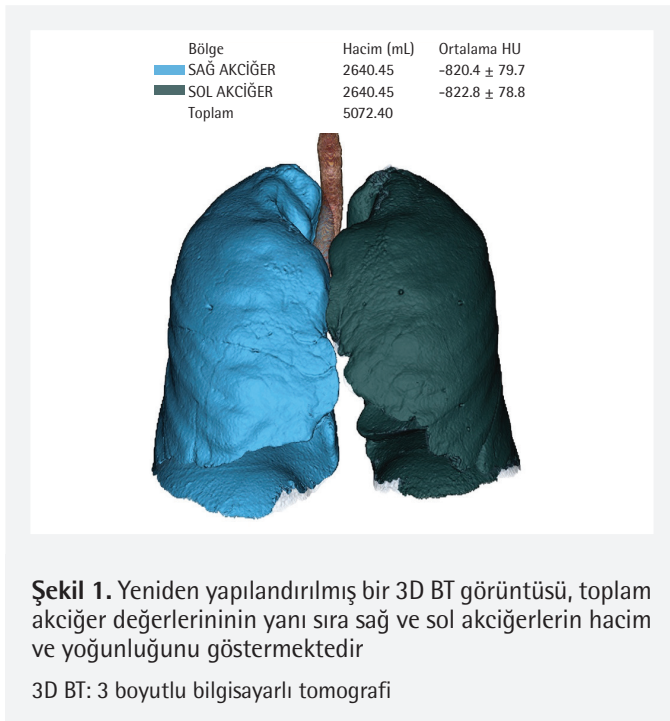
Elde edilen BT görüntüleri PACS'ye (Sectra 7.0, Sectra AB, Linköping, İsveç) aktarıldı ve bir iş istasyonunda (Vitrea 2 iş istasyonu; Vital Images, Canon, Minnetonka, MN, ABD) analiz edildi. Değerlendirme sekiz yıllık bir deneyimi olan bir radyolog tarafından yapıldı.

İş istasyonunda yarı otomatik piksel tabanlı görüntü segmentasyon yöntemi (bölge büyütme algoritması) ve manuel çizim araçları kullanılarak her iki akciğerin hacmi ve yoğunluğu ile toplam akciğer hacmi (TLV) ve yoğunluğu (TLD) hesaplandı. Yarı otomatik segmentasyonda yoğunluk eşikleri aralığı -1062 HU ile -138 HU arasındaydı (Şekil 1).

### SFT Değerlendirmesi

SFT değerlendirmesi, analizde kullanılan teknik olarak kabul edilebilir en az iki spirometrik ölçümden seçilen en büyük FEV1 ve zorlu vital kapasiteye (FVC) sahip spirogramlardan oluşan bir cihaz (MasterScreen PFT System; Jaeger, VIASYS Healthcare, Hoechberg, Almanya) kullanılarak yapıldı.

İyi kalite ve yeterliliğe sahip SFT incelemeleri dahil edildi. BT ile değerlendirme için FEV1, FVC, FEV1/FVC oranı değerleri kaydedildi. Ayrıca kilo, boy ve VKİ değerleri kaydedildi. SFT ve BT arasındaki medyan aralık 1 gün idi. (aralık: 1-2 gün). Sonuçları etkilemiş olabilecek herhangi bir terapötik uygulama veya uygulanan herhangi bir işlem olmamıştır.



### İstatistiksel Analiz

Tüm veriler istatistiksel bir paket programı kullanılarak analiz edildi (SPSS sürüm 17.0; SPSS, Inc., Chicago, IL, ABD). Değişkenler, normal dağılım gösterip göstermediklerini belirlemek için görsel (histogramlar, olasılık çizimleri) ve analitik yöntemler kullanılarak araştırıldı. Normal dağılmayan ve/veya sıralı değişkenler arasındaki ilişkiler araştırılarak, korelasyon katsayıları ve önemleri parametrik olmayan test (Spearman korelasyon testi) kullanılarak hesaplandı. İstatistiksel anlamlılığı çıkarmak için %5 tip-1 hata düzeyi kullanıldı.

### BULGULAR

#### BT Volümetrik Görüntü

Derin nefes tutma halinde çekilen BT görüntüleri iş istasyonunda (Vitrea 2 iş istasyonu; Vital Images, Canon) çok düzlemli rekonstrüksiyon ve üç boyutlu görünümde değerlendirildi, işlem sonrası analizde hacim ve yoğunluk hesaplandı (Şekil 1).

#### Çalışmanın Tanımlayıcıları

Toplam 69 hastada (34 erkek, %49,3; 35 kadın, %50,7), hesaplanan parametrelerin ortalama değerleri şu şekildeydi: Ortalama yaş=55±14,56 yıl (aralık: 18-86), FEV1=2.12±0,87 (aralık: 0,66-4,09), FVC=2,92±1,05 (aralık: 1,03-5,46), FEV1/FVC oranı=72,19±13,07 (aralık: 35,30-99,44), sağ akciğer hacmi (RLV)=2118,06±662,36 (aralık: 712,73-3668,26), sağ akciğer yoğunluğu=-806,8±68,6 (aralık: -904,20 -574,70), sol akciğer hacmi (LLV)=1755,35±605,02 (aralık: 357,06-3310,28), sol akciğer yoğunluğu=-774,80±248,98 (aralık: -918,30-654,10), TLV=3820±1272,35 (aralık: 1378,95-6418,38) ve TLD=-1597,17±295,70 (aralık: -1822,50 -630,00).

FEV1, FVC ve FEV1/FVC oranı, bilateral (sağ ve sol) akciğer hacmi ve yoğunluğu ile pozitif bir korelasyon gösterdi ( $p<0,05$ ), ancak TLV ve yoğunluğu ile korelasyon yoktu ( $p>0,05$ ). Çalışma popülasyonunun demografik ve laboratuvar verileri Tablo 1'de gösterilmiştir.

### TARTIŞMA

Literatür<sup>10,11,13,15</sup> ile uyumlu olan bu çalışmanın sonuçları, SFT (FEV1, FVC) ile BT pulmoner hacim ve yoğunluk parametreleri arasında pozitif korelasyon olduğunu düşündürmektedir.

Kauczor ve ark.'nın<sup>1</sup> çalışmasında, TLC'nin inspiratuvar BT hacmi ile korelasyonu ( $r=0,89$ ) ekspiratuvar BT hacminden ( $r=0,8$ ) daha yüksek bulunmuştur. Statik akciğer hacimleri ile iyi bir korelasyona sahip olarak TLC'yi %12 ile daha düşük oranda tahmin etmişlerdir ( $r=0,89$ ). Ekspiratuvar sarmal BT kullanarak, rezidüel hacmi 850 mL daha fazla tahmin etmişlerdir ( $r=0,77$ )<sup>1</sup>.

Pelzer ve Thomson<sup>16</sup> 17-82 yaşları arasındaki 82 normal denekte vücut pletismografisi ile yapılan ölçümlerden yaşa

**Tablo 1. Çalışma popülasyonunun demografik ve laboratuvar verileri**

| Parametreler          | Değerler                                   |
|-----------------------|--------------------------------------------|
| Yaş (ortalama)        | 55±14,56 yıl                               |
| Cinsiyet              | Erkek: %49,3 (n=34)<br>Kadın: %50,7 (n=35) |
| Sigara alışkanlıkları | Yok                                        |
| FEV1                  | 2.12±0,87                                  |
| FVC                   | 2,92±1,05                                  |
| Sağ akciğer hacmi     | 2118,06±662,36 mL                          |
| Sağ akciğer yoğunluğu | -806,87±68,16 HU                           |
| Sol akciğer hacmi     | 1755,35±605,02 mL                          |
| Sol akciğer yoğunluğu | -774,80±248,98 HU                          |
| Toplam hacim          | 3820±1272 mL                               |
| Toplam yoğunluk       | -1597,17±295,70 HU                         |

FEV1: Bir saniyedeki zorlu ekspiratuvar hacim, FVC: Zorlu vital kapasite

ve boy uzunluğuna karşı solunum hava akımı iletkenliği için regresyon hesaplamasını incelediler. Aynı gün tekrarlanan testlerde pletismografik torasik gaz hacmindeki ortalama varyasyon katsayısı %3,8 ve aynı günlerde tekrarlanan testlerde %10 olarak bulundu<sup>16</sup>.

BT'deki en yüksek görüntü çözünürlüğü ve nicelleme olanaklarına rağmen, değerlendirmede bazı artılar ve eksiler vardır. BT taramalarında sırtüstü pozisyon, vücut pletismografisine kıyasla gerçek akciğer hacminin olduğundan daha az tahmin edilmesine neden olabilir, bu da sırtüstü pozisyonundaki submaksimal inspirasyona bağlı olabilir<sup>17</sup>. O'Donnell ve ark.<sup>18</sup> tarafından yapılan çalışmada, ortalama vital kapasitede azalma bir dik pozisyonunda sırtüstü pozisyona göre %3'ten az bulundu. Bu nedenle, BT modalitesi ile ölçülen akciğer hacimlerinden elde edilen sonuçlar, diğer tekniklerden elde edilen sonuçlarla doğrudan karşılaştırılmaz. Ayrıca BT'de hasta açısından radyasyona maruz kalma söz konusudur.

Mevcut çalışmaya benzer şekilde, Tanabe ve ark.<sup>7</sup> KOAH olan 147 hastada SFT kombinasyonu ile BT'de bronş ağacı/akciğer hacmi oranı arasındaki ilişkileri araştırdılar. Sağ akciğer loblarındaki bronş ağaç hacminin (%AWV) RLV'ye yüzde oranı hesaplandı. Çalışmalarında, kardiyak hareket artefaktlarının bu alanın segmentasyonunu etkileyebileceğinden, sol akciğerdeki bronş ağacı dahil edilmedi. FEV1'i %61±20, FEV1/FVC oranını %51±13 olarak buldular. KOAH spirometrik derecesi arttıkça %AWV azaldı. %AWV, FEV1 ve rezidüel hacmin TLC'ye oranı ile daha yakından ilişkiliydi. Çalışmaları, RLV, RLV/pTLC (tahmin edilen TLC), %AWV, AWV/pTLC ve FEV1, %FEV1 ve RLV/TLC arasında bir korelasyon gösterdi. Kolayca ölçülebilir bir BT biyobelirteci olan %AWV'nin KOAH hastalarında hava yolu-akciğer etkileşiminin klinik etkilerini açıklayabileceği sonucuna varmışlardır<sup>7</sup>.

Bizim çalışmamızda da SFT parametreleri ile akciğer BT yoğunluk-hacim arasında benzer korelasyon bulguları vardı, bu da literatür ile uyumluydu<sup>5,7,11,19</sup>. Mevcut çalışmada TLV ve TLD sırasıyla 3820±1272,35 ve -1597,17±295,70 olarak bulunmuştur. Literatürde TLV, 3380±1010 ile 4668±1192 mL<sup>10,19</sup> arasında bildirilmiştir. Hacim değerlerindeki fark muhtemelen hasta seçimi ile ilgili olabilir. Akciğer hacimleri yaş ve cinsiyetle birlikte azalır. Hasta grubumuz nispeten yaşlı olduğu için değerler düşük çıkmış olabilir.

Yoğunluk ayrıca patolojilerin [örneğin; İAH, pulmoner enfeksiyon, akut solunum sıkıntısı sendromu (ARDS)] değerlendirilmesinde ve sınıflandırılmasında önemli bir parametredir. İAH için, -700-200 HU (-700 HU eşiği) atenuasyon ile akciğer hacminin oranı<sup>20</sup>; buzlu cam opasitesinin tespiti için -800 ila -500 HU arasındaki atenuasyon değerleri<sup>21</sup>; ARDS için -1000 ve -900 HU arasındaki atenuasyon ile akciğer oranı kullanılabilir. -900 ile -500 HU arasındaki atenuasyon ile akciğer oranı normal havalandırılmış olarak tanımlanırken, -500 HU üzerindeki akciğer atenuasyonu kötü havalandırılmış veya havalandırılmamış bir alandır<sup>22</sup>. Çalışmamızda RLV, LLV ve TLV yoğunlukları, iş istasyonundaki yarı otomatik algoritma ile sırasıyla -806,8±68,16, -774,80±248,98 ve -1597,17±295,70 olarak hesaplanmıştır.

### Çalışmanın Kısıtlılıkları

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları vardı. Çalışmanın retrospektif doğasına bağlı olarak, BT görüntüleri FEV1 öncesi hacim olarak akciğer hacimsel değerlendirme ile bağlantılı olarak sadece derin nefes fazında (inspirasyon) elde edildi ve BT incelemesinde ekspiratuvar faz görüntüleri yoktu. Bu nedenle SFT değerlendirmesinde sadece FVC, FEV1/FVC oranı gibi bazı parametreler anlamlı bulundu. Mevcut retrospektif çalışmada, BT statik ve SFT dinamik bir inceleme iken, her ikisinde de TLC'leri hesaplandı ve her iki incelemenin (BT, SFT) korelasyonu yapıldı. Çalışma popülasyonunda, akciğerin karbon monoksit için difüzyon kapasitesi çalışılmamıştır.

### SONUÇ

SFT, solunum semptomlarından sorumlu patolojik durumları netleştirebilen ve hastalıkların şiddetini ve seyrini değerlendirebilen önemli kantitatif pulmoner fonksiyonel veriler sağlamaktadır. Ancak COVID-19 gibi SFT yapılamayan durumlarda BT kantitatif pulmoner volümetrik değerlendirme, ana akciğer fonksiyonlarının değerlendirilmesinde bir alternatif olabilir. Hesaplanan hacim ve yoğunlukları kullanarak hasta hakkında karar verebilmek için karşılaştırılabilecek referans değerlere ihtiyacımız vardır. Bu amaçla spirometrinin referans değerlerini kullanabiliriz.

## Etik

**Etik Kurul Onayı:** Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmalar Etik Kurulu'ndan etik izin alınmıştır (onay numarası: 2020.148.06.10).

**Hasta Onamı:** Retrospektif çalışmadır.

**Hakem Değerlendirmesi:** Editörler kurulunun dışında olan kişiler tarafından değerlendirilmiştir.

## Yazarlık Katkıları

Konsept: H.S., Dizayn: H.S., L.C.M., Veri Toplama veya İşleme: H.S., L.C.M., Analiz Veya Yorumlama: H.S., L.C.M., Literatür Arama: H.S., Yazan: H.S., L.C.M.

**Finansal Destek:** Yazarlar bu çalışma için herhangi bir finansal destek almadığını beyan etmişlerdir.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

## Kaynaklar

- Kauczor HU, Heussel CP, Fischer B, Klammer R, Mildnerberger P, Thelen M. Assessment of lung volumes using helical CT at inspiration and expiration: comparison with pulmonary function tests. *AJR Am J Roentgenol*. 1998;171:1091-5.
- Tseng HJ, Henry TS, Veeraraghavan S, Mittal PK, Little BP. Pulmonary Function Tests for the Radiologist. *Radiographics*. 2017;37:1037-58.
- Coxson HO, Mayo JR, Behzad H, Moore BJ, Verburgt LM, Staples CA, et al. Measurement of lung expansion with computed tomography and comparison with quantitative histology. *J Appl Physiol* (1985). 1995;79:1525-30.
- Mascalchi M. Pulmonary function tests and computed tomography lung attenuation in chronic obstructive pulmonary disease. *J Thorac Dis*. 2015;7:1882-4.
- Mocelin H, Bueno G, Irion K, Marchiori E, Sarria E, Watte G, et al. CT densitometry in children with obliterative bronchiolitis: correlation with clinical scores and pulmonary function test results. *J Bras Pneumol*. 2013;39:701-10.
- Shin JM, Kim TH, Haam S, Han K, Byun MK, Chang YS, et al. The repeatability of computed tomography lung volume measurements: Comparisons in healthy subjects, patients with obstructive lung disease, and patients with restrictive lung disease. *PLoS One*. 2017;12:e0182849.
- Tanabe N, Sato S, Oguma T, Shima H, Sato A, Muro S, et al. Associations of airway tree to lung volume ratio on computed tomography with lung function and symptoms in chronic obstructive pulmonary disease. *Respir Res*. 2019;20:77.
- Park J, Jung J, Yoon SH, Goo JM, Hong H, Yoon JH. Inspiratory Lung Expansion in Patients with Interstitial Lung Disease: CT Histogram Analyses. *Sci Rep*. 2018;8:15265.
- Xaubert A, Agustí C, Luburich P, Roca J, Montón C, Ayuso MC, et al. Pulmonary function tests and CT scan in the management of idiopathic pulmonary fibrosis. *Am J Respir Crit Care Med*. 1998;158:431-6.
- Konheim JA, Kon ZN, Pasirja C, Luo Q, Sanchez PG, Garcia JP, et al. Predictive equations for lung volumes from computed tomography for size matching in pulmonary transplantation. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2016;151:1163-9. e1.
- Coxson HO, Nasute Fauerbach PV, Storness-Bliss C, Müller NL, Cogswell S, Dillard DH, et al. Computed tomography assessment of lung volume changes after bronchial valve treatment. *Eur Respir J*. 2008;32:1443-50.
- Cortet B, Perez T, Roux N, Flipo RM, Duquesnoy B, Delcambre B, et al. Pulmonary function tests and high resolution computed tomography of the lungs in patients with rheumatoid arthritis. *Ann Rheum Dis*. 1997;56:596-600.
- Moloney F, McWilliams S, Crush L, Laughlin PD, Kennedy M, Henry M, et al. CT Densitometry as a Predictor of Pulmonary Function in Lung Cancer Patients. *Open Respir Med J*. 2012;6:139-44.
- Daghighi A, Tropp H. Computed tomography lung volume estimation and its relation to lung capacities and spine deformation. *J Spine Surg*. 2019;5:132-41.
- Haas M, Hamm B, Niehues SM. Automated lung volumetry from routine thoracic CT scans: how reliable is the result? *Acad Radiol*. 2014;21:633-8.
- Pelzer AM, Thomson ML. Effect of age, sex, stature, and smoking habits on human airway conductance. *J Appl Physiol*. 1966;21:469-76.
- Denison DM, Morgan MD, Millar AB. Estimation of regional gas and tissue volumes of the lung in supine man using computed tomography. *Thorax*. 1986;41:620-8.
- O'Donnell CR, Bankier AA, Stiebellehner L, Reilly JJ, Brown R, Loring SH. Comparison of plethysmographic and helium dilution lung volumes: which is best for COPD? *Chest*. 2010;137:1108-15.
- Cheng T, Li Y, Pang S, Wan H, Shi G, Cheng Q, et al. Normal lung attenuation distribution and lung volume on computed tomography in a Chinese population. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2019;14:1657-68.
- Salaffi F, Carotti M, Di Donato E, Di Carlo M, Ceccarelli L, Giuseppetti G. Computer-Aided Tomographic Analysis of Interstitial Lung Disease (ILD) in Patients with Systemic Sclerosis (SSc). Correlation with Pulmonary Physiologic Tests and Patient-Centred Measures of Perceived Dyspnea and Functional Disability. *PLoS One*. 2016;11:e0149240.
- Yabuuchi H, Matsuo Y, Tsukamoto H, Horiuchi T, Sunami S, Kamitani T, et al. Evaluation of the extent of ground-glass opacity on high-resolution CT in patients with interstitial pneumonia associated with systemic sclerosis: comparison between quantitative and qualitative analysis. *Clin Radiol*. 2014;69:758-64.
- Gattinoni L, Caironi P, Pelosi P, Goodman LR. What has computed tomography taught us about the acute respiratory distress syndrome? *Am J Respir Crit Care Med*. 2001;164:1701-11.