

Pektus ekskavatum hastalarında minimal invaziv cerrahinin akciğer hacimlerine olan etkisinin kantitatif BT volumetri ile değerlendirilmesi*

Evaluation of the effect of minimally invasive surgery on lung volumes with quantitative CT volumetry in pectus excavatum patients*

Hakan Cebeci¹, Mustafa Yasir Özlü¹, Abidin Kılınçer¹, Mehmet Öztürk¹, Hüseyin Yıldırım², Güven Sadi Sunam², Murat Öncel²

¹Selçuk Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Radyoloji Anabilim Dalı, Konya

²Selçuk Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Göğüs Cerrahisi Anabilim Dalı, Konya

Hakan Cebeci [orcid.org/ 0000-0002-2017-3166](https://orcid.org/0000-0002-2017-3166)

Mustafa Yasir Özlü [orcid.org/ 0000-0003-4940-7592](https://orcid.org/0000-0003-4940-7592)

Abidin Kılınçer [orcid.org/ 0000-0001-6027-874X](https://orcid.org/0000-0001-6027-874X)

Mehmet Öztürk [orcid.org/ 0000-0001-5585-1476](https://orcid.org/0000-0001-5585-1476)

Hüseyin Yıldırım [orcid.org/ 0000-0003-0126-2531](https://orcid.org/0000-0003-0126-2531)

Güven Sadi Sunam [orcid.org/ 0000-0001-9655-0012](https://orcid.org/0000-0001-9655-0012)

Murat Öncel [orcid.org/ 0000-0003-4302-9615](https://orcid.org/0000-0003-4302-9615)

Öz

Amaç: Pektus ekskavatum çocuklarda en sık görülen doğumsal göğüs duvarı anomalisidir. Bu çalışmada minimal invaziv cerrahi yapılan pektus ekskavatum hastalarında akciğer hacimlerinin kantitatif BT volumetri ile araştırılması amaçlanmıştır.

Gereç ve Yöntem: Etik kurul onayı alındıktan sonra, Ocak 2012 ile Şubat 2018 tarihleri arasında minimal invaziv pektus ekskavatum cerrahisi yapılmış hastalar retrospektif olarak tarandı. Preoperatif ve postoperatif BT incelemesi bulunan hastalar çalışmaya dahil edildi. BT görüntüleri iş istasyonuna aktarılarak akciğer hacimleri ve Haller indeksleri hesaplandı.

Bulgular: Çalışmaya dahil edilen hastaların (11 erkek, 1 kadın) ortalama yaşları $16,3 \pm 3,7$ bulundu. Postoperatif akciğer hacimlerinde anlamlı düzeyde artış saptandı. Total akciğer hacimlerindeki ortalama artış 695 ± 691 ml idi. Preoperatif Haller indeksi ortalaması 3,1'den 2,7'ye düştü ve arada anlamlı fark vardı ($p=0,002$).

Sonuç: Kantitatif BT volumetri, minimal invaziv cerrahi yapılan pektus ekskavatum hastalarında akciğer hacmindeki değişiklikleri değerlendirilmesinde yararlı bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarlı tomografi, kantitatif volumetri, pektus ekskavatum, haller indeksi

Abstract

Objective: Pectus excavatum is the most common congenital chest wall anomaly in children. In this study, we aimed to investigate lung volumes of patients with pectus excavatum who underwent minimally invasive surgery by quantitative CT volumetry.

Material and Methods: After the institutional review board approval, pectus excavatum patients who underwent minimal invasive surgery between January 2012 and February 2018 were searched retrospectively. Patients with preoperative and postoperative CT examinations were included in the study. CT images were transferred to the workstation and lung volumes and Haller's indices were calculated.

Results: The mean ages of the patients (11 male, 1 female) included in the study were 16.3 ± 3.7 . There was a significant increase in postoperative lung volumes. The mean increase in total lung volumes was 695 ± 691 ml. Preoperative mean Haller's index decreased to 2.7 from 3.1 with significant difference ($p = 0.002$).

Conclusion: Quantitative CT volumetry gives valuable data for evaluating lung volume changes in pectus excavatum patients that were applied minimally invasive surgery.

Key words: Computed tomography, quantitative volumetry, pectus excavatum, haller's index.

Giriş

Pektus ekskavatum (PE), çocuklarda en sık görülen doğumsal göğüs duvarı anomalisidir. Canlı doğumlarda insidansı 1/400 olarak bildirilmiştir (1). PE deformitesinde sternum ve kostal kırıkdağlar arkaya doğru depresedirler ve göğüs kafesinin ön-arka çapı azalmıştır. Erkeklerde daha sık görülür. Anterior göğüs duvarındaki depresyon genellikle asimetriktir ve genellikle sağ taraf daha fazla depresedir. Bazı PE hastalarında sternumun depresyonuna rotasyon da eşlik etmektedir. PE deformitesi sıklıkla ergenlik döneminde daha belirgin olur, ancak hafif olgular da bulunmaktadır. Çoğunlukla klinik semptom oluşturmamakla birlikte, kozmetik ve psikososyal sorunlara yol açmaktadır. Hastaların cerrahiden beklentisi güzel kozmetik sonuçtur. Bununla birlikte, az sayıda olgu egzersiz intoleransı, göğüs ağrısı ve nefes darlığı gibi semptomlar tariflemektedir (2,3). Göğüs kafesindeki depresyonun şiddetli olduğu hastalarda hem dinlenme hem de egzersiz sırasında kardiyopulmoner problemler görülebilmektedir (4).

PE hastalarında, sternal depresyonun şiddetinin belirlenmesi ve cerrahinin gerekliliğinin değerlendirilmesi için çoğunlukla radyolojik incelemeler yapılmaktadır (5). Bu amaçla en sık kullanılan radyolojik görüntüleme yöntemi akciğer bilgisayarlı tomografisidir (BT). BT ile göğüs kafesinin kantitatif ölçümleri cerrahlara operasyon öncesi değerli bilgiler sağlamaktadır. Haller indeksi (HI), PE deformitesinin tanısında ve şiddetinin belirlenmesinde eskiden beri kullanılan kantitatif bir parametredir. Akciğer tomografisi kesitlerinde, depresyonun en belirgin olduğu kesitte, göğüs kafesinin transvers çapının en dar antero-posterior çapa bölünmesiyle hesaplanır (6,7). PE hastalarında hastalık ciddiyetinin belirlenmesinde ve cerrahi gerekliliğine karar verilmesinde eskiden beri 3,25 değeri yaygın olarak kullanılmakla birlikte son on yılda yapılan çalışmalarda, Haller indeksinin preoperatif göğüs duvarı dinamik değerlendirmesiyle, klinik bulgularla ve deformitenin düzeltilmesiyle korele olmadığı bildirilmiştir. Bu nedenle, PE hastalarının preoperatif değerlendirilmesinde

göğüs duvarının farklı bölgelerinden çap ölçümleri ve BT ile akciğer hacminin ölçülmesinin daha doğru bir yaklaşım olarak görülmektedir (8,9).

PE cerrahisinde başarılı sonuçlar, hastalar ve cerrahlar için yüz güldürücü olmaktadır. Deformitenin cerrahi düzeltilmesi, yaşam kalitesini arttırdığı gibi, şiddetli depresyon bulunan hastalarda kardiyak ve fiziksel performansı da arttırmaktadır (10). Minimal invaziv cerrahi, diğer adıyla Nuss prosedürü, ilk olarak 1998 yılında tanımlanmıştır ve günümüzde PE deformitesinin düzeltilmesinde standart cerrahi yöntem olarak kabul edilmektedir (11-14).

Bu çalışmada, minimal invaziv PE cerrahisi uygulanmış hastalarda akciğer hacimlerindeki değişikliklerin kantitatif BT volumetri ile araştırılması amaçlanmıştır.

Gereç ve Yöntem

Hastalar

Bu retrospektif çalışma yerel etik kurul tarafından onaylanmıştır. Hastane veri tabanı taramasında Ocak 2012 ile Şubat 2018 tarihleri arasında minimal invaziv PE cerrahisi uygulanmış 189 hasta saptanmıştır. Hastaların tamamını aynı göğüs cerrahisi ekibi tarafından opere edilmiştir. Radyoloji arşivinde, cerrahi tarihinden önceki 3 aylık ve cerrahiden sonraki 6 aylık dönemde toraks BT'si bulunan hastalar çalışmaya dahil edilmiştir. Çekim kalitesi düşük olan veya ekspiratuar fazda elde edilen BT incelemeleri dışlanmıştır. Sonuç olarak, preoperatif ve postoperatif uygun kalitede BT tetkikleri bulunan 12 PE hastasının BT görüntüleri incelenmiştir.

Cerrahi Prosedür

Operasyon genel anestezi altında video-yardımcılı torakoskopik cerrahi ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sağ göğüs duvarında pektoralis majör kasının lateralinden cilt insizyonu yapılmıştır. Sternumun en deprese olduğu

seviye belirlendikten sonra, sağ pektoralis majör kasının lateralinden başlayarak, interkostal aralıkta introduser ile tünel açılmıştır. Ardından introduser ön mediastende sternum ile perikard arasına yerleştirilmiştir. Sol hemitorakta pektoralis majör kasının lateraline ikinci bir insizyon açılarak introduserin ucu bu insizyondan çıkartılmıştır. Bu introduser kılavuzluğunda deprese olan sternumun altına metal bar yerleştirilmiş olup dönme veya kaymasını engellemek için stabilize edilmiştir. Plevral kavitedeki hava aspire edilip pozitif basınçla akciğer havalandırılarak operasyon sonlandırılmıştır. Operasyon sonrası erken dönemde hastalar günlük iki yönlü akciğer grafileri ile pnömotoraks açısından takip edilmiştir. Hasta 3, 6, 12 ve 24. aylarda kontrole çağırılmıştır.

Çekim Protokolü ve Akciğer Hacim Ölçümleri

Tüm BT incelemeleri 128 sıralı multi-detektör BT cihazı (Siemens, Erlangen, Almanya) ile çekilmiştir. BT çekimleri inspirasyon fazında ve supin pozisyonda gerçekleştirilmiştir. Çekim parametreleri; 120 kVp, 150 mA, 2.5-mm kolimasyon, 3 mm kesit kalınlığı olarak belirlendi. Standardizasyon açısından ekspiratuar BT incelemeleri dışlandı. Elde edilen BT görüntüleri iş istasyonuna aktarılarak Pulmo-3D (Syngo via, Siemens Medikal Sistemleri) analiz paket programı ile akciğer hacimleri hesaplandı.

Total akciğer hacmi (TLV), sağ akciğer hacmi (RLV), sol akciğer hacmi (LLV) ve Hİ hesaplamaları yapıldı. Hİ, göğüs kafesindeki depresyonun en belirgin olduğu aksiyal BT kesitinde, transvers çapın anteroposterior çapa bölünmesiyle elde edilmiştir. Akciğer parankimi hesaplamalarında pencere ayarları olarak -992 ile -198 Hounsfield ünitesi arası kullanılmıştır ve programın ölçümlere dahil ettiği vokseller görsel olarak konfirme edilmiştir.

İstatistiksel Analiz

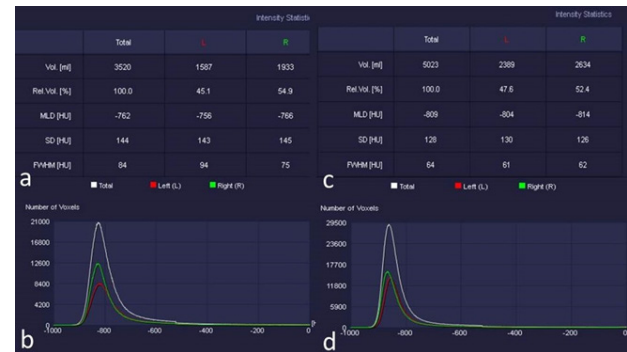
Tüm istatistiksel analizler için SPSS versiyon 23 programı (Statistical Package of the Social Sciences version 23) kullanılmıştır. Verilerin dağılımı Kolmogorov Smirnov testi ile analiz edilmiştir. Veriler anormal dağıldığı için sayısal veriler median (minimum-maksimum) olarak belirtilmiştir. Minimal invaziv cerrahinin akciğer hacimlerine etkisini araştırmak için preoperatif ve postoperatif TLV, RLV,

LLV ve HI değerleri Wilcoxon testi kullanılarak karşılaştırılmıştır. P'nin 0,05'ten küçük olduğu değerler anlamlı kabul edilmiştir.

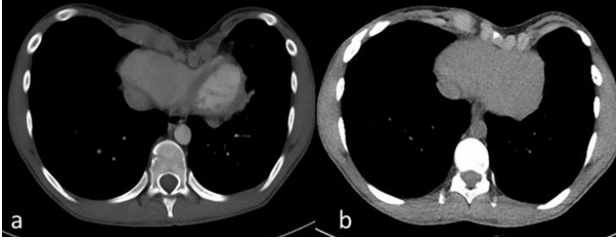
Bulgular

Çalışmada grubunda 11-23 yaş aralığında (ortalama yaş: 16,3 ± 3,7) 11 erkek ve 1 kadın olmak üzere 12 hasta vardı. Cerrahiye bağlı mortalite saptanmadı. 12 hastadan 10'unda (%83,3) toplam akciğer hacimlerinde anlamlı düzeyde artış olmakla birlikte, 2 hastada belirgin bir değişiklik saptanmadı. Akciğer hacimlerindeki ortalama artış TLV, RLV ve LLV için sırasıyla 695 ml, 363 ml ve 324 ml olarak hesaplandı. Akciğer hacimlerindeki artış her üç parametre için de istatistiksel olarak anlamlı bulundu (p < 0,05). Resim1'de çalışma grubunda yer alan 14 yaşında erkek hastada, Pulmo 3D programıyla yapılan preoperatif ve postoperatif akciğer hacim hesaplamaları gösterilmiştir.

Hastaların tamamında Haller indeksinin azaldığı görülmüş olup ortalama azalma 0,59 hesaplanmıştır. Çalışma grubundaki bir hastanın aksiyal BT kesitleri Resim 2'de gösterilmiştir. Çalışma grubunun karakteristik özellikleri ile operasyon öncesi ve sonrası akciğer hacimleri tablo 1'de gösterilmiştir. Ortalama akciğer hacimleri ve Hİ değerleri tablo 2'de gösterilmiştir.



Resim 1. 14 yaşında erkek pektus ekskavatum hastasında preoperatif (a,b) ve postoperatif (c,d) BT volumetri hesaplamaları gösterilmiştir. Total akciğer hacmi 3520 ml'den 5023 ml'e çıkmıştır.



Resim 2. 14 yaşında erkek pektus ekskavatum hastasında preoperatif (a) ve postoperatif (b) aksiyal BT kesitleri gösterilmiştir. Operasyon sonrasında Haller indeksi 3.84'ten 3'e düşmüştür.

Tablo 1. Hastaların demografik verileri, preoperatif ve postoperatif akciğer hacimleri ve Haller indeksi ölçümleri.

| No | Yaş | Cinsiyet | Preoperatif (ml) | | | | Postoperatif (ml) | | | |
|----|-----|----------|------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|
| | | | TLV | RLV | LLV | HI | TLV | RLV | LLV | HI |
| 1 | 17 | K | 4459 | 2426 | 2033 | 4,8 | 4693 | 2557 | 2136 | 4 |
| 2 | 16 | E | 6197 | 3211 | 2987 | 2,79 | 6666 | 3469 | 3196 | 2,57 |
| 3 | 16 | E | 3957 | 2150 | 1807 | 2,98 | 4430 | 2356 | 2074 | 2,54 |
| 4 | 23 | E | 4593 | 2449 | 2145 | 2,73 | 5541 | 2863 | 2578 | 2,32 |
| 5 | 13 | E | 2668 | 1463 | 1204 | 2,87 | 2658 | 1447 | 1211 | 2,82 |
| 6 | 23 | E | 4178 | 2365 | 1813 | 3,94 | 4639 | 2729 | 1910 | 3,8 |
| 7 | 16 | E | 5686 | 3089 | 2596 | 3,72 | 5898 | 3193 | 2705 | 3,5 |
| 8 | 12 | E | 2853 | 1511 | 1341 | 3,3 | 4639 | 2395 | 2244 | 2,45 |
| 9 | 18 | E | 6118 | 3248 | 2870 | 2,4 | 6449 | 3426 | 3023 | 2,32 |
| 10 | 17 | E | 5851 | 3028 | 2822 | 3,01 | 5829 | 3002 | 2828 | 2,6 |
| 11 | 11 | E | 1643 | 984 | 659 | 6,11 | 3606 | 2147 | 1459 | 3,58 |
| 12 | 14 | E | 3520 | 1933 | 1587 | 3,84 | 5023 | 2634 | 2389 | 3 |

TLV; Total akciğer hacmi, RLV; Sağ akciğer hacmi, LLV; Sol akciğer hacmi, HI; Haller indeksi.

Tablo 2. Preoperatif ve postoperatif TLV, RLV, LLV ve HI ölçümleri.

| | TLV (mL) | RLV (mL) | LLV (mL) | HI |
|---------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Pre-operatif | 4318 (1643-6197) | 2395 (984-3248) | 1923 (659-2987) | 3,1 (2,4-6,1) |
| Post-operatif | 4858 (2658-6666) | 2681 (1447-3469) | 2316 (1211-3196) | 2,7 (2,3-4) |

Ardışık değişkenler median (min-maks) olarak verilmiştir. TLV; Total akciğer hacmi, RLV; Sağ akciğer hacmi, LLV; Sol akciğer hacmi, HI; Haller indeksi.

Tartışma

PE, en sık rastlanılan göğüs duvarı anomalisidir. Minimal invaziv cerrahi (Nuss prosedürü), PE düzeltilmesinde standart haline gelmiştir (5,15).

Literatürde minimal invaziv PE cerrahisinin etkinliğini değerlendiren değişik çalışmalar yer almaktadır

(2,3,11,15-17). Bu çalışmalar genellikle göğüs kafesindeki morfolojik değişiklikleri ve spirometri ile yapılan akciğer fonksiyon değişikliklerini içermektedir. PE deformitesinin akciğer ve kalp fonksiyonları gerçekten etkileyip etkilemediği tartışmalı bir konudur. PE'nin solunum fonksiyonlarını azalttığı ve egzersiz performansını azalttığı uzun yıllardır tartışılmaktadır. Genel olarak, PE hastalarında yapılan spirometri testleri normal sınırlarda ya da normalin alt sınırına yakın sonuçlar vermektedir. Bu hastalar çoğunlukla asemptomatiktir. Semptom bulunan hastaların şikayetleri ise dispne, göğüs ağrısı ve azalmış egzersiz toleransını içermektedir. Sternumun içeri depresyonuna ve kalbe basısına bağlı sağ ventrikülün ejeksiyonunda azalma olduğunu savunulmaktadır. Bununla birlikte, PE deformitesinin kardiyovasküler ve solunumsal problemlere yol açmasıyla ilgili karşı görüşleri savunan çok sayıda çalışma bulunmaktadır (18-20). Daha önce yapılmış olan 2 farklı çalışmada, cerrahi sonrasında azalmış akciğer fonksiyon testleri bildirilmiştir (2,21). Bu çalışmalarda yazarlar, akciğer fonksiyonlarındaki bu azalmanın barların kaldırılmasından kısa bir süre sonra ölçüm yapılmasına bağlı olabileceğini belirtmektedirler. Aronson ve ark. tarafından yapılmış başka bir çalışmada ise, araştırmacılar akciğer fonksiyon testlerini barların çıkartılmasından 6 ay sonra ölçmüşler ve operasyon öncesi ile karşılaştırınca anlamlı farklılık bulmamışlardır (11). Biz bu çalışmada spirometri ile akciğerlerin fonksiyonunu değerlendirmedikimiz için bu açıdan bir karşılaştırma yapamıyoruz.

Bu çalışmada, kantitatif BT volumetri kullanılarak, PE cerrahisi geçirmiş hastalarda operasyon öncesi ve sonrası akciğer hacimleri analiz edilmiştir. Literatürde benzer alanda az sayıda çalışma bulunmaktadır. Zeng ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, yazarlar 377 PE hastasının akciğer hacimlerini kantitatif BT volumetri ile hesaplayarak sağlıklı kontrol grubuyla karşılaştırmıştır. Çalışmalarında PE hasta grubu ile sağlıklı kontrol grubu arasında akciğer hacimleri açısından anlamlı farklılık bulmamışlardır (15). Rha ve ark. ise Nuss prosedürü sonrası aksiyal BT kesitlerini kullanarak göğüs kafesindeki değişiklikleri tanımlamışlardır (17). Bu çalışmada, 3 farklı anatomik bölgeden göğüs kafesinin anteroposterior ve transvers çaplarını ölçmüşler ve sonuç olarak postoperatif anteroposterior çapların anlamlı derecede arttığı ve en fazla artışın da ksifosternal bileşke düzeyinde olduğunu bildirmişlerdir. Sengul ve ark. (16) tarafından yapılan başka bir

çalışmada, Nuss prosedürü öncesi ve sonrası akciğer hacimleri hesaplanmıştır. Ancak çalışmalarında akciğer hacimlerini hesaplanan yüzey alanını kesit aralığı ile çarparak bulmuşlardır. Bizim çalışmamızda otomatik program kullanarak dansite temelli ölçüm yaptığımız için akciğer hacim ölçümlerinin daha doğru olacağını düşünüyoruz. Ayrıca kullandığımız hacim hesaplama programı, tanımlanan dansite aralığındaki akciğer hacmini saniyeler içerisinde hesaplaması nedeniyle pratik bir yöntemdir. Sengul ve ark.'ın sonuçlarında total akciğer hacimlerinde ortalama $417,6 \pm 747,6$ ml artış ve dahil edilen 20 hastadan 2'sinde akciğer hacimlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Bizim çalışma grubumuzda hacmi azalan hasta olmadı ancak 2 hastanın akciğer hacimlerinde anlamlı bir değişiklik gözlenmedi. Total akciğer hacimlerindeki ortalama artış bizim çalışma grubumuzda daha fazla bulundu (695 ml).

Çalışmamızın bazı limitasyonları bulunmaktadır. Retrospektif çalışma düzeni ve hasta sayısının az oluşu ilk limitasyondur. Daha fazla hasta sayısı ile yapılacak prospektif çalışmaların daha güzel sonuçlar vereceğini düşünüyoruz. İkincisi, çalışma grubundaki hastalar kardiyak ve akciğer fonksiyonları açısından klinik olarak değerlendirilmemiştir. Üçüncüsü, BT ile yapılan volumetrik analizler inspiratuar çekim temelinde yapılmıştır. Her ne kadar ekspiratuar çekimler dışlanmışsa da, çekim sırasındaki tam olmayan inspirasyon akciğer hacim hesaplarını etkileme potansiyeline sahiptir. Bu limitasyonlara rağmen, çalışmamızda kullanılan hacim hesaplama programının kullanıcıdan bağımsız olarak kantitatif veriler sağlaması önemli bir avantaj olarak görülebilir.

Sonuç

Minimal invaziv PE cerrahisi uygulanan hastalarda akciğer hacimlerindeki değişiklikleri göstermede kantitatif BT volumetri yararlı bilgiler sağlamaktadır. Cerrahi sonrasında akciğer hacimlerinde anlamlı düzeyde artış gösterilmiştir.

Pektus ekskavatum hastalarında minimal invaziv cerrahinin akciğer hacimlerine olan etkisinin kantitatif BT volumetri ile değerlendirilmesi - Cebeci H, Özlü MY, Kılınçer A, Öztürk M, Yıldırım H, Sunam GS. ve Öncel M.

Kaynaklar

1. Mak SM, Bhaludin BN, Naaseri S, Di Chiara F, Jordan S, Padley S. Imaging of congenital chest wall deformities. The British journal of radiology. 2016;89(1061):20150595.
2. Jeong JY, Ahn JH, Kim SY, Chun YH, Han K, Sim SB, et al. Pulmonary function before and after the Nuss procedure in adolescents with pectus excavatum: correlation with morphological subtypes. Journal of cardiothoracic surgery. 2015;10(1):37.
3. Kuru P, Dudaklı A, Mursaloglu H, Arikan H, Oktay A, Yuksel M. How pulmonary function changes after pectus excavatum correction surgery. Asian Cardiovascular and Thoracic Annals. 2015;23(8):945-9.
4. Kelly RE, Mellins RB, Shamberger RC, Mitchell KK, Lawson ML, Oldham KT, et al. Multicenter study of pectus excavatum, final report: complications, static/exercise pulmonary function, and anatomic outcomes. Journal of the American College of Surgeons. 2013;217(6):1080-9.
5. Kim KH, Lee KY, Lee JB, Yang K-S, Hwang J, Je BK, et al. Radiologic factors related to double-bar insertion in minimal invasive repair of pectus excavatum. World Journal of Pediatrics. 2015;11(2):148-53.
6. Daunt SW, Cohen JH, Miller SF. Age-related normal ranges for the Haller index in children. Pediatric radiology. 2004;34(4):326-30.
7. aller JA, Kramer SS, Lietman SA. Use of CT scans in selection of patients for pectus excavatum surgery: a preliminary report. Journal of pediatric surgery. 1987;22(10):904-6.
8. Binazzi B, Bruni GI, Gigliotti F, Coli C, Romagnoli I, Messineo A, et al. Effects of the Nuss procedure on chest wall kinematics in adolescents with pectus excavatum. Respiratory physiology & neurobiology. 2012;183(2):122-7.
9. Sujka JA, Peter SDS, editors. Quantification of pectus excavatum: anatomic indices. Seminars in pediatric surgery; 2018: Elsevier.
10. Pilegaard HK. Short Nuss bar procedure. Annals of cardiothoracic surgery. 2016;5(5):513.
11. Aronson DC, Bosgraaf RP, Merz E-M, van Steenwijk RP, van Aalderen WM, van Baren R. Lung function after the minimal invasive pectus excavatum repair (Nuss procedure). World journal of surgery. 2007;31(7):1518-22.
12. Nuss D, Kelly RE, Croitoru DP, Katz ME. A 10-year review of a minimally invasive technique for the correction of pectus excavatum. Journal of pediatric surgery. 1998;33(4):545-52.
13. Pilegaard HK, Licht PB. Early results following the Nuss operation for pectus excavatum—a single-institution experience of 383 patients. Interactive Cardiovascular and thoracic surgery. 2008;7(1):54-7.
14. Uemura S, Nakagawa Y, Yoshida A, Choda Y. Experience in 100 cases with the Nuss procedure using a technique for stabilization of the pectus bar. Pediatric surgery international. 2003;19(3):186-9.
15. Zeng Q, Lai J-Y, Wang C-J, Cheng H-Y, Chu C-C, Chang C-J, et al. A cross-sectional study of lung volume develop-

ment in pectus excavatum patients: estimating the total lung volume from chest computed tomograph using 3-dimensional volumetric reconstruction. *Journal of pediatric surgery*. 2010;45(12):2322-7.

16. Sengul AT, Sahin B, Celenk C, Basoglu A, Sengul B. The effect of minimally invasive surgical repair on the lung volumes of patients with pectus excavatum. *The Thoracic and cardiovascular surgeon*. 2014;62(03):226-30.
17. Rha EY, Kim JH, Yoo G, Ahn S, Lee J, Jeong JY. Changes in thoracic cavity dimensions of pectus excavatum patients following Nuss procedure. *Journal of thoracic disease*. 2018;10(7):4255.
18. Shamberger RC. Cardiopulmonary effects of anterior chest wall deformities. *Chest surgery clinics of North America*. 2000;10(2):245-52, v-vi.
19. Lawson ML, Mellins RB, Tabangin M, Kelly Jr RE, Croitoru DP, Goretsky MJ, et al. Impact of pectus excavatum on pulmonary function before and after repair with the Nuss procedure. *Journal of pediatric surgery*. 2005;40(1):174-80.
20. Zhao L, Feinberg MS, Gaides M, Ben-Dov I. Why is exercise capacity reduced in subjects with pectus excavatum? *The Journal of pediatrics*. 2000;136(2):163-7.
21. Sigalet DL, Montgomery M, Harder J. Cardiopulmonary effects of closed repair of pectus excavatum. *Journal of pediatric surgery*. 2003;38(3):380-5.