

Tıpta ve Diş Hekimliğinde Fraktal Analiz*

Fractal Analysis in Medicine and Dentistry

Melike GÜLEÇ Melek TAŞSÖKER Sevgi ÖZCAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ağız, Diş ve Çene Radyolojisi Ana Bilim Dalı, Konya

Öz

Geometrideki kare, daire, üçgen gibi bilindik ve basit şekillerle tanımlanamayan, farklı ölçeklerden incelendiğinde kendine benzeme özelliği gösteren karmaşık yapılara 'fraktal' denmektedir. Fraktal boyut arttıkça incelenen yapının karmaşıklığı artmaktadır. Fraktal analiz; kolay ulaşılabilir olması, projeksiyon geometrisi ve radyodensite gibi değişkenlerden etkilenmemesi ve trabeküler iç yapı hakkında objektif veriler sunması gibi özellikleriyle son dönemlerde kullanımı gittikçe artan bir yöntemdir. Diş hekimliğinde fraktal analiz kullanılarak; alveolar kemikte meydana gelen erken dönem periodontal değişikliklerin saptanması, osteoporöze bağlı ortaya çıkan patolojilerin tanısı, implant bölgelerine komşu kemik dokunun değerlendirilmesi ve temporomandibular eklem disfonksiyonu bulunan hastalarda hastalığın şiddeti ile trabeküler kemik yapıdaki değişimlerin korelasyonunun incelendiği çok sayıda çalışma yapılmıştır. Benzer şekilde tıp alanında da mevcut hastalığın şiddeti ve ilerleyişi hakkında bilgi edinmede veya potansiyel bir hastalığın teşhisinde kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı; fraktal analiz yönteminin tanımlanmasının yanı sıra tıpta ve diş hekimliğinde kullanım alanlarının sunulmasıdır.

Anahtar sözcükler: fraktal analiz, fraktal boyut, tıp, diş hekimliği

Abstract

It is called 'fractal' which is a complex structure which can not be identified with simple shapes such as squares, circles, triangles in geometry, and shows its own resemblance when examined from different scales. As the fractal size increases, the complexity of the structure is increased. Fractal analysis is an increasingly common method because of its ease of accessibility, not being affected by variables such as projection geometry and radiodensity and providing objective data on the trabecular internal structure. Using fractal analysis in dentistry, a large number of studies have been conducted to determine the early periodontal changes in the alveolar bone, diagnose of osteoporosis-related pathologies, evaluate the bone tissue adjacent to the implant regions and determine the correlation of the severity of the disease of the trabecular bone structure in patients with temporomandibular joint dysfunction. Similarly, it is also used in medicine to learn about the severity and progress of the disease ortodiagnose a potential disease. The purpose of this study is to describe the method of fractal analysis as well as the areas of use in medicine and dentistry.

Keywords: fractal analysis, fractal dimension, medicine, dentistry

1. Fraktalin Tanımlanması ve Fraktal Analiz

İstatistiksel fiziğin ölçekleme yasalarına göre geniş bir sistemin özellikleri daha küçük ölçekli bir model üzerinden belirlenebilmektedir.¹ 1970'li yıllarda Polonya'lı ünlü matematikçi Benoit Mandelbrot, doğada standart geometrik şekillerden farklı biçimlerde bulunan, karmaşık yapıları sebebiyle Euclid geometrisiyle (doğru, düzlem, küre gibi) tanımlanamayan ama farklı ölçeklerden görüntülendiklerinde birbirlerine benzeyen objeleri 'fraktal' terimi ile açıklamıştır. 'Fraktal' kelimesi Latince'de 'kırık, parça' anla-

mına gelen 'fractus' sözcüğünden türemiştir ve eğriler, birbiri ile ilişkisi bulunmayan dağınık noktalar, yüzeyler ve standart geometride benzeri bulunmayan amorf yapıları tanımlamak için kullanılmaktadır. Fraktal geometriye göre farklı ölçeklerden görüntülenen şeklin her bir parçası, cismin bütününe benzemektedir.²

Mandelbrot,³ ölçümleri birim cinsinden ifade edilemeyen cisimlerin sahip olduğu düzensizlik derecesini ölçerek, ölçek değiştiğinde bu düzensizlik derecesinin (fraktal boyut, FB) sabit kaldığını belirtmiştir. Buradan yola çıkılarak

* Sorumlu yazar/Corresponding author: dishekmelek@gmail.com
Başvuru Tarihi/Received Date: 06.08.2018
Kabul Tarihi/Accepted Date: 04.12.2018

geliştirilen fraktal analiz, integral boyut ile ifade edilemeyen kompleks yapı ve şekillerin niceliksel olarak tanımlanmasını mümkün kılan matematiksel bir metottur. Sayısal olarak FB ile ifade edilmektedir. Genel olarak FB'un yüksek olması yapının daha karmaşık, FB'un düşük olması da yapının daha basit internal düzene sahip olduğu manasına gelmektedir.

Fraktallerin Özellikleri;

1. Fraktallerin en küçük parçası cismin bütününe benzer özellikler taşımaktadır (self similarity, kendine benzerlik kuralı).

Fraktaller kendi içlerinde birbirlerine belirli ölçülerde benzerlik gösteren yapılardır. Ancak bu benzerlik ölçüm yapılan araca bağlıdır. Ölçek büyüdükçe fraktallerin yapısal detayları daha belirgin hale gelmekte olup FB değerleri artmaktadır.³

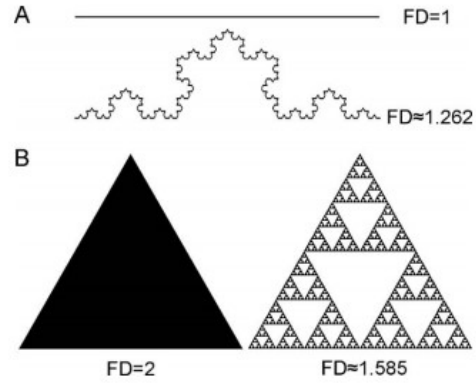
2. Fraktaller kendilerini sonsuza kadar tekrar ettikleri için çevrelerinin tam manasıyla ölçülmesi mümkün değildir.

Mandelbrot,³ yaptığı bir araştırmada İngiltere'nin sahil şeridi uzunluğunun fraktal yapı özelliği gösterdiğini düşünmüş ve kıyı şeridinin uzunluğunu gerçek manasıyla ölçmenin mümkün olmadığını belirtmiştir. Bu işlem ölçüm yapılan cihazın hassasiyetine bağlıdır. Örneğin; uzunluğu 1 m olan bir cetvel kullanıldığında hata payı 1 m'nin altındaki boyutlarda, daha hassas bir ölçüm aracı kullanıldığında da hata payı bu ölçüm aracının ölçemediği uzunlukların altındaki miktarda olacaktır. Dolayısıyla gerçek uzunluk değerini bulmak için atomik boyutlarda cihazlar gerektiğinden doğru sonuca varmak mümkün değildir.

3. Fraktal yapıların boyutları tam sayı değeri alamaz, rasyonel değerlerdir.

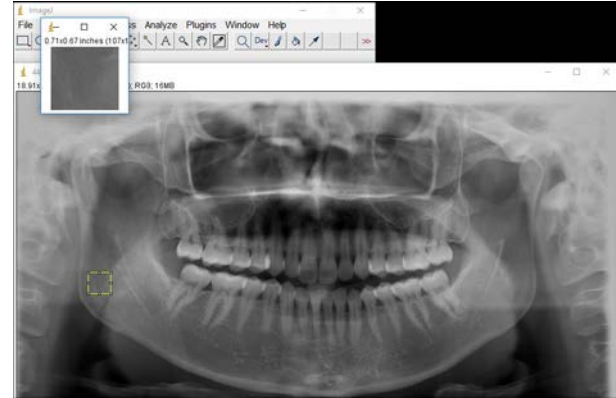
Bir noktanın 0 (sıfır), düz bir çizginin boyutunun 1, bir karenin boyutunun 2, bir kübün ise 3 boyutlu olması geometrik şekillerin boyutlarına örnek olarak gösterilebilir. Fraktallerin boyutları ise ne kadar bir alanda kırılıp

büküldüğüne bağlı olarak değişmektedir. Fraktaller bir düzlemi kapsadığında boyutu 1-2 arasında; çıkıntılı, bombeli bir yapıdaysa 2-3 arasında değerler alır (Resim 1).⁴

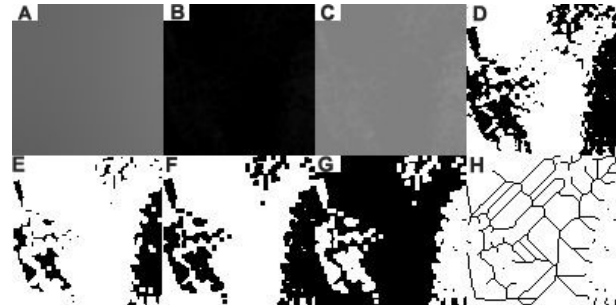


Resim 1: FB incelenen yapının karmaşıklığı hakkında fikir vermektedir. **A,** Düz bir çizgi ve Koch eğrisinin FB değerleri. **B,** Üçgen ve Sierpinski üçgeninin FB değerleri.

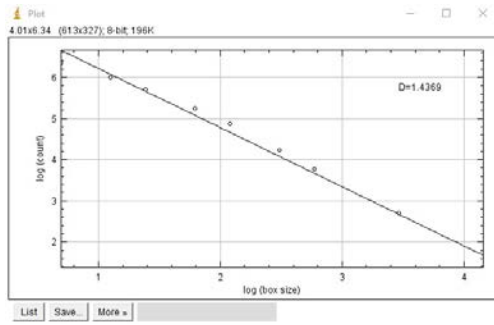
Sánchez I, Uzcátegui G. Fractals in dentistry J Dent. 2011;39:273-292.



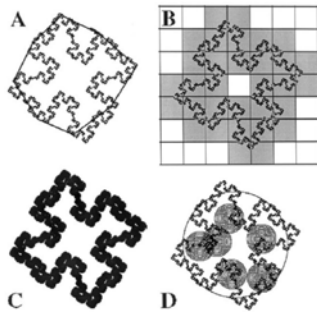
Resim 2: Fraktal analiz yapılırken kullanılacak ilgi alanı (region of interest, ROI) seçilmesi.



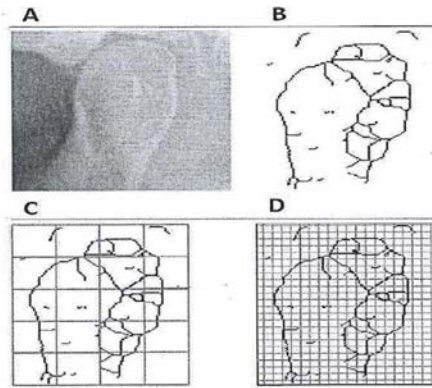
Resim 3: Fraktal analiz için kutu sayma metoduna göre hesaplanmasında kullanılan basamaklar.



Resim 4: Uygulanan aşamalar sonrasında çizilen doğrunun eğimi FB'ü vermektedir (D: FB).

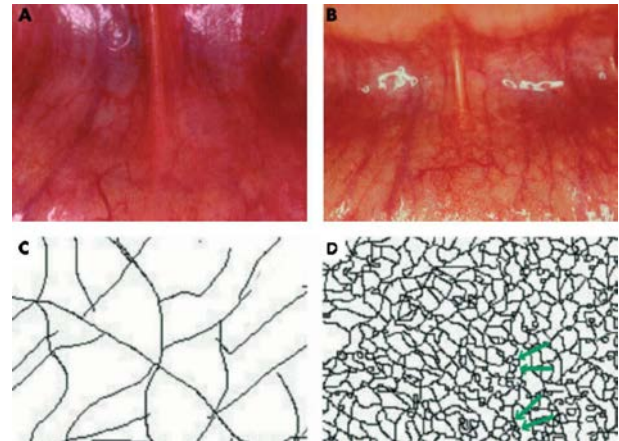


Resim 5: FB hesabında kullanılan yöntemler. **A**, Richardson metodu, **B**, Kutu sayma metodu, **C**, Piksel genişletme metodu, **D**, FB hesabını hacim ölçümüne göre yapan yöntem. Smith TG, Lange GD, Marks WB. Fractal methods and results in cellular morphology — dimensions, lacunarity and multifractals. *J Neurosci Methods* 1996;69:123-136.

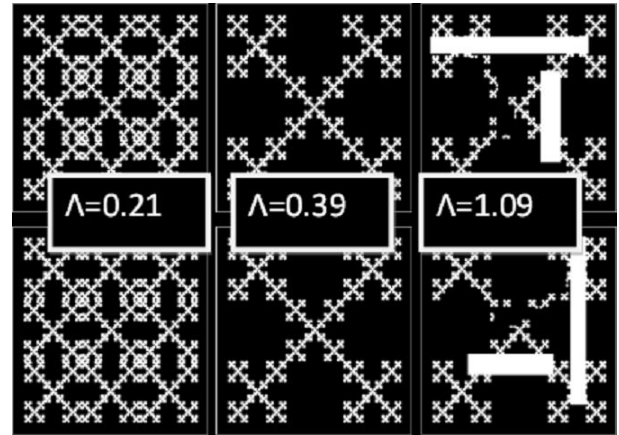


Resim 6: Mandibular kondilin trabeküler yapısının kutu sayma metodu ile incelenmesi. **A**, Panoramik radyografide sol mandibular kondil. **B**, Görüntünün işlenmesiyle kondilin tek pikseli ana hattının belirlenmesi. **C ve D**, Çeşitli boyutlardaki kutuların görüntü sınırına uygulanması.

Arsan B, Köse TE, Çene E, Özcan İ. Assessment of the trabecular structure of mandibular condyles in patients with temporomandibular disorders using fractal analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2017;123:382-391.



Resim 7: **A**, Sağlıklı vestibüler oral mukoza görüntüsü. **B**, Kalıtsal non-polipoziskolorekral kanser hastasının vestibüler oral mukoza görüntüsü. **C**, A'daki görüntünün fraktal analiz yöntemi ile iskeletsel forma dönüştürülmesi. **D**, B'deki görüntünün fraktal analiz yöntemi ile iskeletsel forma dönüştürülmesi. Yeşil oklar çok sayıda loop (kavis) oluşan alanları işaret etmektedir. Karperien A, Jelinek H, Milosevic N, Cracow P, editors. Reviewing lacunarity analysis and classification of microglia in neuroscience. 8th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology; 2011.



Resim 8: Lakünerite λ ile gösterilir. Ortadaki resim soldakine göre daha fazla boş alan içerdiği için ortadaki resmin lakünerite değeri soldakine göre daha yüksektir. En sağdaki resim diğerlerine göre daha fazla düzensiz boşluk içerdiğinden en yüksek lakünerite değerine sahiptir.

İzotropi-Anizotropi Kavramları

Matematiksel fraktaller farklı ölçeklerde incelendiğinde birbirlerine benzer özellikler sergileyen izotropik yapılardır. Trabeküler kemik, pulmoner dallanma gösteren akciğerler

gibi doğal ve biyolojik fraktaller ise anizotropik yapıda olup farklı gözlem şartlarında farklı özellikler sergilerler. Biyolojik fraktaller sınırlı bir ölçekte kendine benzeme özelliği gösterirler.^{4,5}

Mandelbrot³ tarafından 1983'te yayımlanan 'Doğanın Fraktal Geometrisi' adlı yayında doğada da standart geometrik şekillerle tanımlanamayan fraktal yapıların olduğu belirtilmiştir. Dünyanın etrafını 6-7 kez dolaşabilecek uzunlukta olan damarların vücudumuza, açıldığında 2 m'yi bulabilen DNA zincirinin mikrometrelik çekirdeğin içine, birkaç tenis kortu kadar alan kaplayabilen alveollerin akciğerlere sığdırılmasının arkasında fraktal geometri kuralları etkili olmuştur. Kemiğin trabeküler iç yapısı da radyograflarda belli çözünürlüklerde görüntülediğinde kendine benzeme özelliği göstermesi sebebi ile fraktal yapı karakteri sergilemektedir.

2. Fraktal Boyutun Hesaplanmasında Kullanılan Yöntemler

Fraktal analiz başta borsa fiyatlarının hesaplanmasında, bir hücrenin dış sınırlarının belirlenmesinde, pulmoner dallanmayı incelemek amacıyla, kalp ve temporomandibular eklem (TME) seslerini dinlemek amacıyla olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmıştır.⁶⁻¹⁰ Özellikle tıp alanında mevcut hastalığın şiddeti ve ilerleyişi hakkında bilgi edinmede veya potansiyel bir hastalığın teşhisinde kullanılmaktadır. Radyograflar üzerinden tespit edilen FB'un trabeküler kemik yoğunluğundaki değişimleri ve kemikteki mineral kaybını yansıttığı belirtilmektedir.^{5,11-14} Literatürdeki araştırmalarda, trabeküler kemik mimarisi ve FB arasında korelasyon olduğu gösterilmiştir.¹⁵⁻¹⁷ Trabeküler kemik kortikal kemikten sekiz kat daha yüksek metabolik aktiviteye sahip olduğu için kemik yapısında meydana gelen değişikliklerin değerlendirilmesinde daha belirleyici olmaktadır.¹⁸

FB'un hesaplanması amacıyla birçok yöntem kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerde genel olarak uygulanan basamakların logaritmik ölçekte grafiği çizilir ve elde edilen değerlere uygun olarak bir doğru çizilir. Çizilen doğrunun eğimi yapının FB'unu verir (Resim 2-4).^{1,4,19}

FB hesabı için kullanılan yöntemler genel olarak iki ana grupta toplanabilir; FB'ü belirlenen iki nokta arasındaki mesafe ölçümüne bağlı olarak hesaplayan yöntemler ve FB'ü hacim ölçümüne bağlı olarak hesaplayan yöntemler.

En çok kullanılan yöntem olan mesafe ölçümüne bağlı FB hesabı yapan yöntemlerde, uzunluk birimi olarak pikselin bir kenar uzunluğu kullanılır. FB'ü hacim ölçümüne göre hesaplayan grupta ise hacim birimi olarak pikselin çevresi kullanılmaktadır. Bu yöntemde çeşitli çaplardaki daireler görüntü içerisine rastgele yerleştirilerek dairelerin içerisindeki görüntü sınırına ait pikseller sayılmaktadır (Resim 5).¹⁹

Mesafe ölçümüne bağlı FB hesabı yapılan yöntemler arasında Richardson metodu, kutu sayma metodu ve Flook²⁰ tarafından geliştirilmiş olan dilatasyon metodu (piksel genişletme metodu) yer almaktadır (Resim 5).¹⁹

Richardson metodunda incelenecek olan fraktal yapının çevresi çeşitli uzunluklardaki cetveller aracılığıyla ölçülür. Ölçülen çevre ile ölçüm yapılan her bir cetvelin logaritmik ölçekte grafiği çizilir ve grafikteki noktalar birleştirildiğinde elde edilen doğrunun eğimi FB değerini verir.¹⁹

Trabeküler kemik morfolojisinin ve kemik iliği boşluklarının incelenebildiği kutu sayma metodu en fazla kullanılan yöntemdir. Kutu sayma metodunda kutular içeren bir ölçek, boyutu hesaplanacak olan trabeküler yapının üzerine yerleştirilir. Boyutları 2-64 piksel arasında değişen kutulardan oluşturulan kılavuzlarda trabeküler kemik içeren kutular sayılır (Resim 6). Trabeküler kemik içeren kutu sayısı ile kılavuzdaki toplam kutu boyutunun logaritmik ölçekte grafiği çizilir ve elde edilen doğrunun eğimi ile FB hesaplanır.⁵ FB'un büyük olması kemik mimarisinin daha karmaşık, kemik içindeki boşlukların daha az olduğunu gösterirken, küçük değerdeki FB, kemiğin daha gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.^{5,11,19,21-23}

Piksel genişletme metodunda ilk olarak incelenecek olan görüntünün bir piksel genişliğinde ana hattı oluşturulur. Sonrasında görüntü içeri-

sine gelişigüzel olarak yerleştirilen çeşitli çaplardaki daireler kullanılarak görüntü sınırları dilate edilir. Görüntü sınırındaki genişleme miktarı ile dairelerin çaplarının logaritmik ölçekte grafiği çizilir, elde edilen noktalara uyan doğrunun eğimi FB'ü verir (Resim 5/C).^{2,4,11,19,21}

FB'ü hacim ölçümüne bağlı olarak hesaplayan yöntemde (Resim 5/D), görüntü üzerine merkezi görüntü sınırlarında olacak şekilde çeşitli boyutlardaki daireler yerleştirilir. Sonrasında dairelerin içerisindeki görüntü sınıra ait toplam piksel sayısı hesaplanır. Dairenin çapı ve o çaptaki dairenin içerisindeki görüntü piksel sayısının logaritmik ölçekte grafiği çizilir. Elde edilen noktalara uyan doğrunun eğimi FB'ü verir.

3. Tıpta Fraktal Analiz

a. Onkoloji

Fraktal analiz ile incelenen tümöral yapıların FB'larının lezyonun kendi topolojik boyutundan büyük olması patolojik bir durumun varlığı olarak değerlendirilmiştir. Oral kavitedeki epitel ve bağ dokusu arasındaki sınırın fraktal analizinin yapıldığı araştırmalarda, iki doku arasındaki sınırın düzensizliği arttıkça FB'un arttığı görülmüştür. FB artışı displastik değişikliğin ve karsinom gelişiminin göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Resim 7).^{24,25}

Meme kanseri tanısı ve takibinde yararlanılan mamografilerde yapılan FB hesabı ile meme dokusunun glandüler yapısının değerlendirilmesi ve neoplastik dokular ile mikrokalsifikasyonların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ancak, hesaplanan FB değerinin yapının normal sınırlardan ne kadar saptığını ve yapı içerisinde değişiklik meydana gelip gelmediğini gösterdiği bilinmelidir.²⁶

Beyin tümörlerinin tespiti amacıyla manyetik rezonans görüntüleme (MRG) yöntemi üzerinde fraktal analiz yapıldığı bir çalışmada, fraktal analiz ile ilgili üç farklı algoritma tanımlanmıştır. Bunlar; parçalı-threshold kutu sayma (PTKS), parçalı-modifiye kutu sayma (PMKS) ve parçalı üçgen prizma yüzey alanı (PTPSA, piecewise

triangular prism surface area) yöntemleridir. Bu yöntemlerden PTBC'nin normal doku ve tümöral doku ayrımını yapabildiği ancak, tümörün lokalizasyonunu tam tespit edemediği belirtilirken, PMBC ve PTPSA yöntemlerinin tümör tanısında daha tatmin edici veriler sunduğu vurgulanmıştır.²⁷

2013 yılında yayınlanan bir çalışmada, vücudumuzdaki damarlanma yapısının fraktal yapı özelliği gösterdiğinden yola çıkılarak, mesane kanserlerinde mikrovasküler damarlanma yoğunluğu (MVD) yöntemi ve fraktal analiz arasındaki ilişki incelenmiştir. Sunulan verilerde; tümör damarlanmasının, boyutunun artmasının ve metastazının anjiogenezisle ilgili olduğu belirtilirken; damarlanmanın kantitatif olarak değerlendirilebilmesi için, önceki çalışmalarda tümörün büyümesi, metastazı, rekürrensi ve prognozu ile ilişkili olduğu belirtilen MVD yöntemi açıklanmıştır. Ancak damarlanma yapısının fraktal özelliği sergilemesinden dolayı ve anjiogenezisin dinamik bir süreç olmasından dolayı MVD yönteminin belirli limitasyonları bulunduğu, bunun yerine FB analizinin daha sağlıklı sonuçlar vereceği vurgulanmıştır.²⁸

b. Oftalmoloji

Fraktal analiz vasküler dallanma gösteren yapılarda kullanılabilirliğinden yola çıkılarak 729 adet Tip 1 diyabet hastasında yapılan bir çalışmada, diyabetik mikrovasküler hasarın erken tespiti amacıyla, retinal FB ve retinopati arasındaki ilişki incelenmiştir. Hastaların her iki gözünden çekilen stereoskopik retinal fotoğraflara fraktal analiz uygulanmıştır. Sonuç olarak 137 hastada diyabetik retinopati bulguları tespit edilmiştir. Retinal FB'un yüksek olması, retinal vaskülaritedeki geometrik karmaşıklığın yüksek olduğunu göstermektedir, bu durum da retinopati gelişme olasılığında artış olarak yorumlanmıştır.²⁹

c. Kardiyoloji

Bu alanda yapılan çalışmalarda fraktal analiz genellikle kalp seslerinin dinlenmesinde kullanılmış, kalp krizine bağlı mortalite oranları belirlenmeye çalışılmıştır. 2002 yılında yapılan bir

çalışmada, art arda kalp krizi geçiren hasta bireylerden oluşturulan geniş bir örneklem büyüklüğünde, kalp atışı değişkenliğinin fraktal analizi ile hasta prognozu arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuç olarak kalp atışı değişkenliğinin fraktal analizinin akut miyokard infarktüsü geçiren hastalar arasında mortalite oranının belirlenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir.³⁰ Yapılan bir başka çalışmada da 65 yaş ve üstü bireylerde ani kardiyak ölüm riski araştırılmış, kalp atışı değişkenliğinin fraktal yapısının yaşlı bireylerde kardiyak mortalite oranının belirleyicisi olduğu savunulmuştur.³¹

d. Fraktal Analiz Yöntemiyle Sistemik Hastalıkların Çene Kemiklerine Etkisinin İncelenmesi

Yapılan bir çalışmada, Tip 1 ve Tip 2 diyabet hastaları arasındaki mandibular kemik değişikliklerinin incelenmesi amacıyla panoramik radyograf üzerinden bazı morfometrik analizler (panoramik mandibular indeks, mandibular kortikal indeks ve mandibular kortikal genişlik) ve fraktal analiz yapılmış sonrasında bu yöntemler karşılaştırılmıştır. Sonuçta, Tip 1 ve Tip 2 diyabet hastaları arasında trabeküler ve kortikal kemik mimarisinde anlamlı bir fark tespit edilememiş olup, Tip 1 diyabet hastalarının kontrol grubuna göre daha düşük kortikal değerlere sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, FB ile mandibular kortikal genişlik arasında pozitif korelasyon olduğu sonucu vurgulanmıştır.³²

Orak hücreli anemi hastalarındaki mandibular kemik yapısındaki değişikliklerin incelenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, 35 adet orak hücreli anemi hastasının panoramik radyografı alınmış ve sağ mandibulada ikinci premolar diş ve birinci molar diş arasından 64x64 piksel boyutlarında olacak şekilde seçilen ROI'lere (region of interest, ilgi alanı) fraktal analiz uygulanmıştır. Sonuçta 20 yaşın altındaki hasta bireylerin FB değerleri kontrol grubuna göre daha düşük olarak bulunmuş, bu durum hasta bireylerde trabeküler yapıda azalma olduğu ve trabeküler alanın daha gözenekli bir yapı sergilediği olarak yorumlanmıştır.³³

Kronik böbrek yetmezliği bulunan 25 hasta üzerinde yapılan bir çalışmada, panoramik radyograflar aracılığıyla mandibulanın trabeküler yapısındaki değişiklikler incelenmiş, sağlıklı kontrol grubu ile hasta bireylerin FB değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca hasta bireylerin panoramik radyografları alınmadan önce, 3 ay boyunca parathormon, kalsiyum, fosfor, alkalin fosfataz ve vitamin D gibi biyokimyasal parametreleri ölçülmüş, sonrasında bu değerler ile FB arasındaki korelasyona bakılmıştır. Sonuçta, önceki çalışmalarla uyumlu olarak hasta bireylerin FB değerlerinin kontrol grubuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiş ancak, ölçümü yapılan biyokimyasal parametreler ve FB değerleri arasında belirgin bir korelasyon saptanmadığı belirtilmiştir. Fraktal analizin, trabeküler kemik yapısını değerlendirmede ucuz, kolay ulaşılabilir ve umut vadeden bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.³⁴

Ergün ve ark.¹⁴ alveolar kemik demineralizasyonuna sebep olan primer hiperparatiroidizm teşhisi konan 65 yaşındaki bir hastanın iyileşme takibi açısından paratiroidektomi öncesi ve sonrasındaki takip radyograflarında fraktal analiz uygulamışlardır. Hastanın kemik metabolizmasının değerlendirmek amacıyla 2001-2006 yılları arasındaki biyokimyasal tahlil sonuçlarını ve fraktal analiz için 1997-2008 yılları arasında alınmış panoramik radyograflarını elde etmişlerdir. Klinik, radyografik ve biyokimyasal muayenelerden sonra paratiroidektomi planlanan hastada, cerrahi operasyondan kısa bir süre sonra alkalin fosfataz, parathormon ve kalsiyum seviyelerinin normale döndüğünü gözlemlemişlerdir. 1997-2006 yılları arasında alınmış olan panoramik radyograflara fraktal analiz uyguladıklarında kemiğin osteoporotik karakterde olduğunu görmüşler, ancak tedavi sonrasındaki 2006-2008 yılları arasında çekilen radyograflarda FB'un arttığını izlemişlerdir. Bu 2 yıldaki FB artışını operasyondan sonra mandibular kemikte meydana gelen demineralizasyon ve trabeküler yapıdaki gözeneklerin azalmasına bağlamışlar, bu sonucu kemik yoğunluğu ölçümlerinde kullanılan dual enerjili X ışını absorpsiyometrisi (DEXA) ile doğrulamışlardır.

Bisfosfonatla ilişkili osteonekrozun mandibular kemik üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla konik ışınli bilgisayarlı tomografi (KİBT) görüntüleri üzerinden fraktal analiz yapılan bir çalışmada, 36 hasta bireyde; mandibular foramenin hemen altından, mandibular foramenin hemen üstünden, mental foramenin anteriorundan, mandibular kanalın hemen üstünden ve kemiğin ekspoz olduğu sahadan alacak şekilde 5 farklı bölgeden ROI seçimi yapılmıştır. Sonuç olarak hasta bireylerin FB değer ortalamaları sağlıklı kontrol grubuna kıyasla daha yüksek bulunmuş, ROI'ler arasındaki en yüksek FB değerinin ekspoz sahasında olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkarak fraktal analizin bisfosfonatla ilişkili osteonekroz teşhis ve takibinde kullanılabileceği öngörülmüştür.³⁵

2016 yılında yayınlanan bir çalışmada Apolinário ve ark.³⁶ Tip 1, Tip 3 ve Tip 4 osteogenezis imperfekta teşhisi konan ve tedavi planlaması yapılan 62 çocuk hastanın tedaviden önceki ve sonraki panoramik radyografları üzerinde mandibular kortikal genişlik (MKG) ve FB analizi yapmışlardır. FB analizi hem kortikal hem trabeküler kemikten seçilen ROI'ler üzerine uygulanmıştır. Sonuç olarak, tüm tiplerdeki osteogenezis imperfekta çocukların tedavi başlangıcında mandibular kortekslerinin daha ince ve daha gözenekli olduğu, kortikal kemiğin MKG ve FB değerleri tedavi sonrasında yükselirken, trabeküler kemiğin FB değerlerinde hem osteogenezis imperfekta tipleri hem de tedavi siklusları bakımından istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülmediği belirtilmiştir. Osteogenezis imperfekta hastalarda tedavi etkinliğinin değerlendirilebilmesi için kortikal kemiğin morfometrik analizleri ve fraktal analizden yararlanılabileceği ifade edilmiştir.

Osteoporöz vakarında yapılan çalışmalara bakıldığında, bazı araştırmacılar osteoporöz hastalarından hesaplanan FB değerlerinde sağlıklı kontrol grubuna göre azalma olduğunu savunurken,^{37,38} diğerleri ise hasta grubun daha yüksek FB değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir.³⁹⁻⁴¹

Yaşar ve Akgünlü⁴² osteoporöz tanısı konmuş ve sağlıklı kontrol grubundaki bireylerden elde edilen FB değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık saptanmadığını bildirmişlerdir. Şener ve Baksı,⁴³ osteoporöz tanısı konmuş ve bisfosfonat tedavisi alan 20 adet hasta ve 20 adet sağlıklı bireyin panoramik radyografları üzerinde FB analizi yapmışlar ve hasta bireyler ile sağlıklı bireylerin FB değerleri arasında anlamlı bir farklılık olduğunu tespit etmişlerdir. White ve Rudolph¹² diş hekimine gelen 11 osteoporöz hastasında periapikal radyograflar üzerinden, maksilla ve mandibulanın trabeküler paternlerini incelemişler, özellikle anterior maksilla ve posterior mandibulada hasta bireyler ile sağlıklı bireyler arasında anlamlı derecede fark olduğunu görmüşlerdir. Yine Yaşar⁴⁴ 2002 yılında yaptığı araştırmasında, osteoporöz tanılı hastalarda panoramik ve direkt dijital radyograflar üzerinde fraktal analiz yapmış, hasta grubun FB ortalamasını sağlıklı gruba göre anlamlı derecede yüksek bulmuştur. Çalışmalarda farklı sonuçların elde edilmiş olması yöntemlerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kimi araştırmacılar fraktal analiz için; trabeküler ağda meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde yeterli olduğu belirtilen panoramik radyograf kullanırken,³⁹ bir kısım araştırmacı da daha yüksek çözünürlüğe sahip olan ve dolayısıyla sadece kalın trabeküllerin görüldüğü panoramik radyografin aksine daha çok detay veren periapikal radyografları kullanmayı tercih etmişlerdir.⁴⁵

4. Diş Hekimliğinde Fraktal Analiz

a. Periodontoloji

Updike ve Nowzari,⁴⁶ şiddetli periodontitis, hafif periodontitis ve sağlıklı olarak üç gruba ayrılan hastaların periapikal radyografları üzerinden kutu sayma yöntemi ile FB hesabı yapmışlar ve sonuçta periodontitisten etkilenen hastaların ortalama FB değerlerinin sağlıklı gruba göre anlamlı derecede düşük olduğunu görmüşlerdir. Fraktal analizde kullanılan kutu sayma yönteminin kemikte mevcut olan hastalığın şiddetini kantitatif biçimde ortaya koyduğunu ve var olan

diagnoz yöntemlerini geliştirmek amacıyla kullanılabilceğini öngörmüşlerdir. Periodontitis hastalarında kemik miktarında azalma ve trabeküler bütünlükte bozulma meydana geldiğinden, fraktal analizin kemik kaybı ilerlemeden küçük trabeküler değışikliklerin tespit edilmesinde ve mevcut hastalığın ilerleyişinin durdurulmasında faydalı olabileceğini belirtmişlerdir.

Shrout ve ark.'nın⁴⁷ gingivitisli ve periodontitisli olarak iki gruba ayırdığı 61 hastanın periapikal radyografları üzerinde yaptıkları fraktal analiz sonucunda, periodontitisli grubun FB değerlerinin diğer gruba göre anlamlı derecede düşük olduğunu tespit etmişler, bu farkı periodontal sağlığın bozulmasıyla FB'un azalması şeklinde korelasyon bulunduğunu yönünde yorumlamışlardır.

b. Endodonti

Chen ve ark.⁴⁸ periapikal lezyonlu dişleri, kök kanal tedavilerinden sonraki 3, 6 ve 12. ayda aldıkları periapikal radyograflar yardımıyla incelemişlerdir. Dijitize ettikleri radyograflar üzerinde kök ucundan belirledikleri ROI'lere, kutu sayma yöntemiyle fraktal analiz yapmışlar ve inceledikleri 27 hastanın 25'inde kök kanal tedavisinden 3 ay sonra alınan radyograflarda, kök kanal tedavisinden önce alınan radyograflara göre anlamlı ölçüde FB artışı olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, fraktal analizin kök kanal tedavisinden sonra periapikal trabeküler kemikteki değışikliklerin erken saptanmasında kullanılabilceğini vurgulamışlardır.

Huang ve ark.'nın⁴⁹ 2012 yılında 20 yaş üstü 26 hasta üzerinde yaptıkları çalışmada, kronik apikal periodontitisli dişlerin her birinden, biri kök kanal tedavilerinden veya apikal cerrahiden önce, diğeri 1 yıl sonra olmak üzere ikişer adet periapikal radyograf almışlar ve bu radyograflar üzerinde belirledikleri 8 farklı ROI'de fraktal analiz yapmışlardır. Seçilen ROI'ler, bir pikselinin boyutu 0.2 mm olan 400x400 piksel olacak şekilde ayarlanmıştır. ROI'lerden biri kök apeksinin hemen altından olacak şekilde (T1), diğeri apikal lezyona komşu sağlıklı kemikten (T2) seçilmiş ve lezyonlu diş komşu dişlerden

bu iki ROI'nin kontrol grubu olarak görev yapacak olan C1 ve C2 ROI'leri belirlenmiştir. Ek olarak, iki farklı zamanda alınan radyografların benzer projeksiyon açısı ve doz parametreleri ile alındığından emin olmak için her radyografıta sağlıklı kemik bölgesinden H1-H4 olacak şekilde 4 farklı ROI seçimi yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda tedaviden önce ve sonraki H1-H4 ROI'lerinin FB değerleri arasında anlamlı fark bulunamamıştır. T1 ROI'lerinin FB değerlerinde artış olduğu, apikal lezyona komşu T2 ROI'lerinin FB değerlerinde ise azalma gözlemlendiği belirtilmiştir. Sağlıklı dişler bölgesinden seçilen C1 ve C2 ROI'lerinin FB değerlerinde ise anlamlı bir değışiklik izlenmemiştir. Sonuç olarak kök kanal tedavisi sonrası iyileşmenin takip edilmesinde fraktal analizin kantitatif bir metot olduğu savunulmuş, FB'un iyileşme ve inflamasyon gibi süreçlerde trabeküler kemiğin yapısal değışikliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir belirteç olduğu vurgulanmıştır.

c. Cerrahi

Literatürde fraktal analiz yöntemi ile implant cerrahisi sonrasındaki iyileşmeyi inceleyen araştırmalar mevcuttur. İmplant cerrahisi öncesi ve sonrasında alınan panoramik radyograflar fraktal analiz ile incelendiğinde, implant çevresindeki kemiğin fraktal boyutundaki artışın osteoentegrasyonun başarılı olduğu ve trabeküler kemiğin iyileştiği yönünde korelasyon gösterdiği belirtilmiştir.⁵⁰

Sansare ve ark.¹⁵ implant tedavisi yapılmış 33 hastanın implanttan önceki ve sonraki panoramik radyografları üzerinde, implantın apikal kısmından 84x84 piksel boyutlarında olacak şekilde ROI seçimi yapmışlar ve bu ROI'lere fraktal analiz uygulamışlardır. Sonuç olarak implant yerleştirildikten sonra alınan radyograflardan elde edilen FB değerleri anlamlı derecede yüksek bulunmuş ve bu sonuç, cerrahiden sonra implant çevresindeki kemik trabekülasyonunun artmış olmasına bağlanmıştır. İmplant çevresinde trabeküler yapı ve kemik miktarındaki artış implantın daha sağlam ve stabil hale gelmesinde ilk faktör olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla implant prognozunun

tahmini ve osteoentegrasyonun başarısı için fraktal analizin uygulanabileceğini belirtmişlerdir.

Zeytinoğlu ve ark.²² 2014 yılında yaptıkları bir araştırmada, 76 sağlıklı bireye yapılan 198 adet implantın çevresindeki trabeküler kemik değişikliklerini incelemek amacıyla; her hastadan, ilki protetik yükleme başlangıcında (implantın yerleştirilmesinden yaklaşık olarak 3 ay sonra), diğeri yükleme sonrası 6. ayda ve sonuncusu yükleme sonrasındaki birinci yılda (\pm 2 hafta) olmak üzere üçer adet panoramik radyograf almışlar ve bu radyograflar üzerinde her implantın mezial, distal ve apikal bölgelerinden; lamina dura, periodontal ligament ve kök apeksi içermeyecek şekilde, ölçüm için maksimum kullanılabilir alan sağlamak amacıyla boyutları standart olmayan 3 farklı ROI seçimi yapmışlardır. Seçilen ROI'ler üzerinde kutu sayma yöntemi ile FB hesabı yapmışlar ve sonuç olarak; protetik yüklemenin 6. ayında alınan radyograflardan hesaplanan FB değerlerinde başlangıca göre anlamlı ölçüde azalma olduğunu tespit etmişler, yükleme sonrasındaki 12. ayda alınan radyograflardan elde edilen FB değerleri ile 6. aydaki FB değerleri arasında anlamlı bir fark gözlenmediğini belirtmişlerdir. Buradan yola çıkarak, implant cerrahisinde hayati öneme sahip olan osteoentegrasyon başarısının değerlendirilebilmesi için, projeksiyon geometrisi ve ışınlama dozu gibi radyografik değişkenlerden etkilenmediği belirtilen FB analizinin umut veren bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

İmplant cerrahisinin yanı sıra ortognatik cerrahi vakalarında da iyileşme aşamaları FB hesabı ile takip edilebilmektedir. Heo ve ark.⁵¹ mandibular prognatizm teşhisi ile bilateral sagittal splint ramus osteotomisi planlanan 35 hastanın; operasyondan önce (Evre 0), 1-2 gün sonra (Evre 1), 1 ay sonra (Evre 2), 6 ay (Evre 3) ve sonrasında 1 yıl sonraki (Evre 4) takip radyograflarını elde etmişlerdir. Panoramik radyograflar üzerinde operasyon sahalarından olacak şekilde bilateral mandibulada 200x200 piksel boyutlarında ROI'ler belirlemişler ve FB hesabı yapmışlardır. Sonuç olarak, Evre 1'de Evre 0'a

göre istatistiksel olarak anlamlı derecede FB'ta azalma olduğu görülürken, sonrasındaki evrelerde FB'un tekrar arttığını gözlemlemişlerdir. Son olarak Evre 4 ile Evre 0'ın FB değerlerinde anlamlı bir fark tespit edilemediğini belirtmişlerdir. Takip radyograflarında yapılan fraktal analiz sonucunda FB'ta artış gözlenmesi osteotomi sahasındaki iyileşme neticesinde trabeküler kemik mimarisinin operasyon zamanından daha karmaşık hale geldiği şeklinde yorumlanmıştır.⁵¹

d. Temporomandibular Bozuklukların Fraktal Analiz Yöntemiyle Değerlendirilmesi

TME bölgesinde yapılan araştırmalar incelendiğinde, fraktal analizin bu bölgede meydana gelen değişimlerin erken tespit edilmesine yardımcı olduğu görülmektedir. Dejeneratif osteoartriti bulunan 35 hastanın KIBT görüntüleri üzerinde yapılan bir çalışmada, dejeneratif osteoartrit sebebiyle mandibular kondilin trabeküler yapısında meydana gelen değişiklikler incelenmiştir. Sonuçta, temporomandibular osteoartriti bulunan hastaların ortalama FB değerleri, subkondral kemik altındaki trabeküler yapıda meydana gelen osteoporotik değişiklikler sebebiyle, sağlıklı kontrol grubuna göre daha düşük olarak bulunmuştur.⁵²

Arsan ve ark.⁵³ TME rahatsızlığı bulunan 100 hasta üzerinde yaptığı araştırmalarında, panoramik radyograf aracılığıyla, mandibular kondil üzerinden 84x84 piksel boyutlarında kare şeklinde ROI seçimi yapmış ve bu ROI'lere kutu sayma metodunu kullanarak fraktal analiz uygulamışlardır. Sonuç olarak hasta bireylerin ortalama FB değerlerinin kontrol grubuna göre daha düşük olduğunu tespit etmişler ve bu sonucu hasta bireylerde görülen şiddetli dejeneratif değişikliklere bağlamışlardır.

e. Dental Materyal Analizi

Oshida ve ark.⁵⁴ kumlanma yapılmış metal yüzeylerinin alüminyum oksit parçacıklarından nasıl etkilendiğini incelemişler, yüzeyin FB değerlerine bakarak alüminyum oksit kullanılan

materyallerde optimal çalışma süresini belirlemiştir.

Literatürde fraktal analizin dental porselen gibi kırılğan materyallerde oluşan fraktürleri incelemek amacıyla kullanıldığını gösteren çalışmalar mevcuttur. FB analizi kırık yüzeylerin karmaşıklık derecesini ortaya çıkarır. Çalışmaların çoğu FB değerindeki artış ile maddenin kırılma dayanımı arasındaki orantısal ilişkiyi incelemiştir.^{55,56}

Çalışmalarda fraktal yapı özelliği gösteren materyaller de incelenmiştir. Pefferkorn ve ark.⁵⁷ rezin içerikli restoratif materyallerdeki polimerizasyon büzülmesini azaltabilmek için, polimetilmetakrilat ile kaynaşabilen, fraktal yapı karakteri sergileyen Aerosil materyalini kompozit rezin içine ilave etmişlerdir. Sonuçta kompozit rezin içeriğine bu fraktal yapının dahil edilmesiyle polimerizasyon büzülmesinin azaldığına dair kanıtlar bulunmuşlardır.

f. Çürük Tayini

Umemori ve ark.⁵⁸ çürük tespiti için dişlerin okluzal yüzeylerindeki pit ve fissürlerde meydana gelen renk değişimlerini incelemiştir. Dijital görüntüler üzerinde yapılan FB analizinden sonra, pit ve fissürlerin FB'unun çürük derinliğiyle birlikte arttığını tespit etmişlerdir. Gutierrez ve ark.⁵⁹ mine partikülleri üzerinde çalışmışlar, çürük risk düzeyi farklı olan grupların FB değerlerinin de farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Bu farklılığı, hidroksiapatit kristalleri arasındaki gözeneklerde var olan organik madde miktarındaki farklılığa bağlamışlardır.

g. Oral Kanserlerin Fraktal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi

Goutzanis ve ark.⁶⁰ 2008 yılında yayımlanan araştırmalarında, oral skuamöz hücreli karsinom hastalarından aldıkları doku örneğinin çekirdeğinden elde ettikleri histolojik kesitler üzerinde yaptıkları fraktal analiz sonucunda hasta bireylerin çekirdeklerinden elde edilen FB değerlerinin, normal bir epitelyum dokusundan elde edilen değerlere göre daha yüksek olduğunu tespit etmişler, neoplastik çekirdeklerin

boyutu ile FB'ları arasında korelasyon bulunduğunu belirtmişlerdir.

Margaritescu ve ark.⁶¹ dilin lenfatik damarları üzerinde yaptıkları fraktal analiz sonucunda, skuamöz hücreli karsinomlu olgularda normal dokuya göre FB'un daha yüksek olduğunu tespit etmişler, fraktal analiz yardımıyla normal, pre-malign ve tümöral doku arasında ayırım yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Ultrason görüntüleri üzerinde 28 benign, 15 malign tükürük bezi tümörünün incelendiği bir araştırmada, lezyon içerisinden seçilen ROI'lere fraktal analiz uygulanmış, malign ve benign tümörlerde farklı FB değerleri bulunmuştur.⁶²

5. Diğer Dijital Görüntü Analiz Yöntemleri

Konvansiyonel radyograflar, hekimin yorumlama kapasitesine bağlı olduğundan subjektif veriler sağlamaktadır. Bu sebeple araştırmacılar radyografların değerlendirilmesinde daha kantitatif veriler elde etmeye yönelik farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Dijital çıkartma radyografisi (subtraction) bu amaçla kullanılan yöntemlerden biridir. Teknik, farklı zamanlarda alınan radyograflardaki görüntülerin üst üste çakıştırılarak birbirinden çıkartılması prensibine dayanmaktadır.⁶³ Belirlenen periyotlarda değişiklik göstermeyen anatomik oluşumlar görüntüden uzaklaştırılmakta, bu süreçte kemik yapıda meydana gelen densite değişikliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Kemik dokusunda %30-60 oranında mineral kaybı olmadan radyografik yorumlamanın mümkün olmadığı konvansiyonel radyografların aksine, bu tekniğin %5'ten daha az mineral kaybını %90 doğrulukla ortaya çıkardığı belirtilmiştir.⁶⁴ Projeksiyon geometrisi ile ışınlama parametrelerindeki farklılık ve görüntülerin çakıştırılması aşamalarının komplike olması sebebiyle kullanımını kısıtlıdır.⁶⁵ Fraktal analiz ise projeksiyon geometrisinden etkilenmediği bildirildiği için trabeküler yapıyı değerlendirmede bu yöntem alternatifidir.⁶⁶

Piksel yoğunluğu (PY), bir pikselin siyahlık ya da beyazlığının ölçüsüdür ve bu analizde 12 bit'lik

gri skala bir dijital görüntü kullanıldığında 0 (sıfır) tamamen siyahı, 4096 tamamen beyazı temsil eder. Soğur ve ark.⁶⁷ 2013 yılında yaptıkları in vitro bir çalışmada, 12 kadavra mandibulasından seçtikleri 21 adet premolar dişe 0.05 ml %70'lik perklorik asidin 30 ve 60 dk uygulanmasıyla oluşturdukları periapikal lezyonları incelemek amacıyla aldıkları periapikal radyograflarda FB analizi ile PY ölçümü metodunu kıyaslamışlardır. Sonuç olarak, FB analizinde her iki asit uygulaması arasında anlamlı bir fark bulunmuş, PY ölçümü metodunun ise sadece 60 dk asit uygulanan periapikal lezyonları tespit edebildiği belirtilmiştir. Kemikteki deminerlizasyonun erken tespitinde fraktal analizin daha güvenilir bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Literatürde bu iki yöntemin kıyaslandığı önceki çalışmalarda^{66,68} ise PY analizinin FB analizine göre daha sensitif bulunmasının olası sebebinin önceki iki çalışmada panoramik radyografların kullanılmış olmasına bağlamışlardır.

Alan fraksiyonu (area fraction) metodu trabeküler kemik kalitesini değerlendirmede kullanılmış ve binary görüntüde trabeküler paterni temsil eden piksellerin yüzdesi olarak tanımlanmıştır.⁶⁹ Mağat ve Şener⁷⁰ 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada, panoramik radyograf ve KIBT görüntüleri üzerinde belirledikleri ROI'lere FB ve alan fraksiyonu analizlerini uygulamışlar, sonuç olarak alan fraksiyonu analizinin, FB analizi ile korelasyon gösterdiğini tespit etmişler, bu yöntemin de trabeküler kemiğin mikro yapısının belirlenmesinde kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

FB'un yüksek olması yapının daha kompleks olduğunu gösterir ancak aynı FB değerlerine sahip yapılar birbirinden tamamen farklı iç dizilime sahip olabilmektedirler. Bu yapısal farklılığı belirtmek amacıyla tanımlanan laküarite terimi ilk kez Mandelbrot tarafından farklı yapısal görünüme sahip olan aynı boyuttaki fraktalleri tanımlamak için kullanılmıştır.⁵ Laküarite boşluk büyüklüklerinin dağılımı ile ilişkilidir ve λ ile sembolize edilir.⁷¹ Düşük laküarite değerleri yapının homojen olduğunu

gösterirken (boşluk büyüklükleri aynı olduğu için), yüksek laküarite değerleri heterojenitenin (farklı boşluk büyüklüklerine sahip olma) göstergesidir (Resim 8). FB yapının karmaşıklığını ölçerken, laküarite analizi heterojenitesini ölçer. Laküarite fraktaller gibi kendine benzeme (self-similarity) özelliği sergilemez, yapıdaki alt birimlerin uzaysal dağılımı ile ilgilidir.⁷² Yaşar ve Akgünlü⁷³ 51 hastanın periapikal radyografında dişli ve dişsiz bölgeden belirledikleri 37x119 piksel boyutlarındaki ikişer tane ROI üzerinde FB ve laküarite analizi yapmışlardır. Sonuç olarak, FB ve laküarite analizinin dişli ve dişsiz bölge arasındaki trabeküler yapısal farklılığı kantitatif biçimde belirleyebildiği ve aralarında negatif korelasyon bulunduğunu tespit etmişlerdir. Dişli bölgeden hesaplanan FB değerlerinin düşük, laküarite değerlerinin ise yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonucu dişli bölgenin okluzal güçlerden daha fazla etkilenmesi sebebiyle, farklı boyutlara sahip trabeküllerin düzensiz dağılımına bağlamışlardır.

Önem ve ark.⁷⁴ 21 implant hastasında primer stabiliteyi değerlendirebilmek için dijital panoramik radyograflar üzerinde belirledikleri ROI'lerde FB, laküarite analizleri ile birlikte ROI'de bir hat üzerinde belirlenen herhangi iki nokta arasındaki en uzak mesafenin ölçümü olarak tanımlanan ve gözlemci faktöründen etkilenmeyen kantitatif bir yöntem olduğu belirtilen feret çapı analizi de yapmışlar, sonuçta implant çevresindeki alveolar kemikte belirlenen ROI'lerden hesaplanan FB ve feret çapı değerlerinin düşük, laküarite değerinin ise yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Alveolar kemikteki iyileşmenin takip edilmesi adına FB analizine alternatif olarak laküarite ve feret çapı analizlerinin de kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

6. Fraktal Analizin Limitasyonları

Fraktal analiz, klinik çalışmalar yardımıyla biyolojik sistemlerin özelliklerinin tanımlanmasını mümkün kılan non-invaziv bir metottur. Ayrıca fraktal analizin -10 ile +30 arasındaki projeksiyon açısından ve radyasyon dozu gibi

değişkenlerden etkilenmemesi, kolay ulaşılabilir olması da tekniğin uygulanabilirliğini artırmaktadır.^{5,14,15,22,75} FB'un, ROI seçimine ait parametrelerden, boyut, şekil ve yerleştirildiği bölgeden etkilendiği bildirilmiştir.⁷⁵⁻⁷⁷ Çizgisel ROI kullanımının trabeküler yapıyı değerlendirmede yetersiz kaldığı, bu sebeple düzlemsel ROI seçimi yapılması gerektiği belirtilmiştir.⁷⁸

Yapılan bir çalışmada aynı hastaya ait periapikal ve panoramik radyograflardan elde edilen FB'lar karşılaştırıldığında, panoramik radyograflardan elde edilen FB değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Panoramik radyograflarda periapikal radyograflara göre çözünürlük daha düşük olduğu için sadece kalın trabeküller görüntülenebilmektedir. Ancak panoramik radyograflardan elde edilen FB'un kemikteki osteoporotik değişiklikleri yansıtmada yeterli olduğu bildirilmiştir.¹¹

Literatürde FB ile trabeküler yapının karmaşıklığı arasındaki ilişki hakkında fikir birliğinin olmadığı görülmektedir. Bazı çalışmalar osteoporotik durumlarda FB'un arttığını savunurken, kimi araştırmacılar da hastalık durumunda trabeküler karmaşıklığın azaldığını ve FB'un azaldığını savunurlar. Trabeküler kemiğin iç yapısı ve mekanik özellikleri, kemiğe gelen yük miktarına ve fizyolojik fonksiyona bağlı olarak değişiklik gösterebileceğinden (trabeküler kemiğin anizotropik karakteri), hastalığın şiddetine göre etkilenen ince trabeküllerin hangi yönde ve açıda yer değiştirdiğine bağlı olarak ortaya çıkan FB değerleri de farklılık sergileyecektir. Bu nedenle farklı olan sonuçların ikisinin de doğru olabileceği akıld tutulmalıdır.^{5,14,15,22,79}

Fraktal analiz sonucunda farklı sonuçların elde edilmesi FB hesabında farklı tekniklerin kullanılmasına, bölge anatomisindeki varyasyonlara ve alveolar kemikte farklı sahaların incelenmesine bağlıdır. Sonuçlardaki farklılığı etkileyen bir diğer faktör de bazı çalışmalarda konvansiyonel filmler kullanılırken diğerlerinde dijital radyografların kullanılmış olmasıdır. Direkt dijital sistemlerde, konvansiyonel radyografların diji-

tize edilmesinden kaynaklanan veri kayıplarının önüne geçilebilmektedir. Chen ve ark.⁸⁰ dijitalizasyon yapılırken, tarama sürecindeki homojensizliğin ortaya çıkan sonuç üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

SONUÇ

Fraktal analiz kolay ulaşılabilir olması yönüyle kullanımını gün geçtikçe artan bir yöntemdir. Belirli limitasyonları olmasına rağmen projeksiyon geometrisi ve radyodensite gibi değişkenlerden etkilenmemesi, non-invaziv ve kolay ulaşılabilir bir yöntem oluşu da tıpta ve diş hekimliğinde kullanımını artıran sebeplerdendir.

KAYNAKLAR

1. Lopes R, Betrouni N. Fractal and multifractal analysis: a review. *Med Image Anal* 2009; 13: 634-649.
2. Geraets WGM, van der Stelt PF. Fractal properties of bone. *Dentomaxillofac Radiol* 2000; 29: 144-153.
3. Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature*. 3th Ed., W.H. Freeman & Co., New York, 1982, 3-468.
4. Sánchez I, Uzcátegui G. Fractals in dentistry. *J Dent* 2011; 39: 273-292.
5. Demirbaş AK, Ergün S, Güneri P, Aktener BO, Boyacıoğlu H. Mandibular bone changes in sickle cell anemia: fractal analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008; 106: 41-48.
6. Buckland-Wright JC, Lynch JA, Bird C. Microfocal Techniques in Quantitative Radiography: Measurement of Cancellous Bone Organization. *Rheumatology* 1996; 35: 18-22.
7. Buckland-Wright JC, Lynch JA, Rymer J, Fogelman I. Fractal signature analysis of macroradiographs measures trabecular organization in lumbar vertebrae of postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 1994; 54: 106-112.
8. Badwal RSS. The application of fractal dimension to temporomandibular joint sounds. *Comput Biol Med* 1993; 23: 1-14.
9. Lynch JA, Hawkes DJ, Buckland-Wright JC. Analysis of texture in macroradiographs of osteoarthritic knees using the fractal signature. *Phys Med Biol* 1991; 36: 709-722.

10. Weibel ER. Fractal geometry: a design principle for living organisms. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 1991; 261: 361-369.
11. Bollen AM, Taguchi A, Hujoel PP, Hollender LG. Fractal dimension on dental radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 2001; 30: 270-275.
12. White SC, Rudolph DJ. Alterations of the trabecular pattern of the jaws in patients with osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999; 88: 628-635.
13. Oliveira ML, Nascimento EF, Cruz AD, ve ark. Relationship between bone mineral density and trabecular bone pattern in postmenopausal osteoporotic Brazilian women. *Clin Oral Investig* 2012; 17: 1847-1853.
14. Ergün S, Saraçoğlu A, Güneri P, Özpınar B. Application of fractal analysis in hyperparathyroidism. *Dentomaxillofac Radiol* 2009; 38: 281-288.
15. Sansare K, Singh D, Karjodkar F. Changes in the fractal dimension on pre- and post-implant panoramic radiographs. *Oral Radiol* 2011; 28: 15-23.
16. Pothuaud L, Benhamou CL, Porion P, ve ark. Fractal dimension of trabecular bone projection texture is related to three-dimensional microarchitecture. *J Bone Miner Res* 2000; 15: 691-699.
17. Wilding RJ, Slabbert JC, Kathree H, ve ark. The use of fractal analysis to reveal remodelling in human alveolar bone following the placement of dental implants. *Arch Oral Biol* 1995; 40: 61-72.
18. Jolley L, Majumdar S, Kapila S. Technical factors in fractal analysis of periapical radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35: 393-397.
19. Smith TG, Lange GD, Marks WB. Fractal methods and results in cellular morphology — dimensions, lacunarity and multifractals. *J Neurosci Methods* 1996; 69: 123-136.
20. Flook A. The use of dilation logic on the quantimet to achieve fractal dimension characterisation of textured and structured profiles. *Powder Technol* 1978; 21: 295-298.
21. Sanchez-Molina D, Velazquez-Ameijide J, Quintana V, ve ark. Fractal dimension and mechanical properties of human cortical bone. *Med Eng Phys* 2013; 35: 576-582.
22. Zeytinoglu M, İlhan B, DüNDAR N, Boyacıoğlu H. Fractal analysis for the assessment of trabecular peri-implant alveolar bone using panoramic radiographs. *Clin Oral Investig* 2014; 19: 519-524.
23. Southard TE, Southard KA, Jakobsen JR, Hillis SL, Najim CA. Fractal dimension in radiographic analysis of alveolar process bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 82: 569-576.
24. Heymans O, Fissette J, Vico P, ve ark. Is fractal geometry useful in medicine and biomedical sciences? *Med Hypotheses* 2000; 54: 360-366.
25. Cross SS. Fractals in pathology. *J Pathol* 1997; 182: 1-8.
26. Lee KI, Choi SC, Park TW, You DS. Fractal dimension calculated from two types of region of interest. *Dentomaxillofac Radiol* 1999; 28: 284-289.
27. İftikharuddin KM, Jia W, Marsh R. Fractal analysis of tumor in brain MR images. *Mac Vis Appl* 2003; 13: 352-362.
28. Narter F, Köse O. Kanser geometrisi ve mesane kanserinde fraktallar. *Üroonkoloji Bülteni* 2013; 12: 11-17
29. Cheung N, Donaghue KC, Liew G, ve ark. Quantitative assessment of early diabetic retinopathy using fractal analysis. *Diabetes Care* 2008; 32: 106-110.
30. Tapanainen JM, Thomsen PEB, Køber L, ve ark. Fractal analysis of heart rate variability and mortality after an acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 2002; 90: 347-352.
31. Mäkikallio TH, Huikuri HV, Mäkikallio A, ve ark. Prediction of sudden cardiac death by fractal analysis of heart rate variability in elderly subjects. *J Am Coll Cardiol* 2001; 37: 1395-1402.
32. Kurşun-Çakmak EŞ, Bayrak S. Comparison of fractal dimension analysis and panoramic-based radiomorphometric indices in the assessment of mandibular bone changes in patients with type 1 and type 2 diabetes mellitus. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2018; 126: 184-191.
33. Demirbaş AK, Ergün S, Güneri P, Aktener BO, Boyacıoğlu H. Mandibular bone changes in sickle cell anemia: fractal analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008; 106: 41-48.
34. Gumussoy I, Miloglu O, Cankaya E, Bayrakdar IS. Fractal properties of the trabecular pattern of the mandible in chronic renal failure. *Dentomaxillofac Radiol* 2016; 45: 20150389.
35. Torres S, Chen C, Leroux B, ve ark. Fractal dimension evaluation of cone beam computed tomography in patients with bisphosphonate-associated osteonecrosis. *Dentomaxillofac Radiol* 2011; 40: 501-505.

36. Apolinário AC, Sindeaux R, de Souza Figueiredo PT, ve ark. Dental panoramic indices and fractal dimension measurements in osteogenesis imperfecta children under pamidronate treatment. *Dentomaxillofac Radiol* 2016; 45: 20150400.
37. Southard TE, Southard KA, Krizan KE, ve ark. Mandibular bone density and fractal dimension in rabbits with induced osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2000; 89: 244-249.
38. Fazzalari NL, Parkinson IH. Fractal properties of cancellous bone of the iliac crest in vertebral crush fracture. *Bone* 1998; 23: 53-57.
39. Law AN, Bollen AM, Chen SK. Detecting osteoporosis using dental radiographs: a comparison of four methods. *J Am Dent Assoc* 1996; 127: 1734-1742.
40. Ruttimann UE, Webber RL, Hazelrig JB. Fractal dimension from radiographs of periodontal alveolar bone. A possible diagnostic indicator of osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992; 74: 98-110.
41. Bollen AM, Taguchi A, Hujoel PP, Hollender LG. Case-control study on self-reported osteoporotic fractures and mandibular cortical bone. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 90: 518-524.
42. Yaşar F, Akgünlü F. The differences in panoramic mandibular indices and fractal dimension between patients with and without spinal osteoporosis. *Dentomaxillofac Radiol* 2006; 35: 1-9.
43. Şener E, Baksı BG. Sağlıklı Ve Osteoporoz Tanılı Hastalarda Fraktal Boyut Ve Mandibular Kortikal İndeks Değerlendirilmesi. *EÜ Dışhek Fak Derg* 2016; 37: 159-167.
44. Yaşar F. Osteoporotik kemik trabekül bulgularının radyografik, dijital analiz ve kemik mineral densite yöntemleriyle karşılaştırılması. Selçuk Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2002, Doktora Tezi.
45. Park GM, Jung YH, Nah KS. Prediction of osteoporosis using fractal analysis on periapical radiographs. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2005; 35: 41-46.
46. Updike SX, Nowzari H. Fractal analysis of dental radiographs to detect periodontitis-induced trabecular changes. *J Periodontal Res* 2008; 43: 658-664.
47. Shrout MK, Roberson B, Potter BJ, Mailhot JM, Hildebolt CF. A comparison of 2 patient populations using fractal analysis. *J Periodontol* 1998; 69: 9-13.
48. Chen S-K, Oviir T, Lin C-H, ve ark. Digital imaging analysis with mathematical morphology and fractal dimension for evaluation of periapical lesions following endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005; 100: 467-472.
49. Huang C, Chen J, Chang Y, Jeng J, Chen C. A fractal dimensional approach to successful evaluation of apical healing. *Int Endod J* 2013; 46: 523-529.
50. Lee DH, Ku Y, Rhyu IC, ve ark. A clinical study of alveolar bone quality using the fractal dimension and the implant stability quotient. *J Periodontal Implant Sci* 2010; 40: 19-24.
51. Heo M-S, Park K-S, Lee S-S, ve ark. Fractal analysis of mandibular bony healing after orthognathic surgery. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2002; 94: 763-767.
52. Kayıpmaz S, Akçay S, Sezgin ÖS, Çandirli C. Trabecular structural changes in the mandibular condyle caused by degenerative osteoarthritis: a comparative study by cone-beam computed tomography imaging. *Oral Radiol* 2018; 1-8.
53. Arsan B, Köse TE, Çene E, Özcan İ. Assessment of the trabecular structure of mandibular condyles in patients with temporomandibular disorders using fractal analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2017; 123: 382-391.
54. Oshida Y, Munoz CA, Winkler MM, Hashem A, Itoh M. Fractal dimension analysis of aluminum oxide particle for sandblasting dental use. *Biomed Mater Eng* 1993; 3: 117-126.
55. Drummond JL, Thompson M, Super BJ. Fracture surface examination of dental ceramics using fractal analysis. *Dental Materials* 2005; 21: 586-589.
56. Drummond JL. Fractals, surface roughness, and fracture toughness of dental composite and unfilled resin fracture surfaces. *Cells and Materials* 1997; 7: 2.
57. Pefferkorn A, Pefferkorn E, Haikel Y. Influence of the colloidal crystal-like arrangement of polymethylmethacrylate bonded aerosil particles on the polymerization shrinkage of composite resins. *Dent Mater* 2006; 22: 661-670.
58. Umemori S, Tonami K-i, Nitta H, Mataka S, Araki K. The possibility of digital imaging in the diagnosis of occlusal caries. *Int J Dent* 2010.
59. Gutierrez P, Piña C, Lara VH, Bosch P. Characterization of enamel with variable caries risk. *Arch Oral Biol* 2005; 50: 843-848.
60. Goutzanis L, Papadogeorgakis N, Pavlopoulos P, ve ark. Nuclear fractal dimension as a prognostic factor in oral squamous cell carcinoma. *Oral Oncol* 2008; 44: 345-353.

61. Margaritescu C, Raica M, Pirici D, ve ark. Podoplanin expression in tumor-free resection margins of oral squamous cell carcinomas: an immunohistochemical and fractal analysis study. *Histol Histopathol* 2010; 25: 701.
62. Chikui T, Tokumori K, Yoshiura K, ve ark. Sonographic texture characterization of salivary gland tumors by fractal analyses. *Ultrasound Med Biol* 2005; 31: 1297-1304.
63. Mol A, Dunn SM. The performance of projective standardization for digital subtraction radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003; 96: 373-382.
64. Ortman L, Dunford R, McHenry K, Hausmann E. Subtraction radiography and computer assisted densitometric analyses of standardized radiographs: a comparison study with 125I absorptiometry. *J Periodontal Res* 1985; 20: 644-651.
65. Benn D. Limitations of the digital image subtraction technique in assessing alveolar bone crest changes due to misalignment errors during image capture. *Dentomaxillofac Radiol* 1990; 19: 97-104.
66. Law AN, Bollen A-M, Chen S-K. Detecting osteoporosis using dental radiographs: a comparison of four methods. *J Am Dent Assoc* 1996; 127: 1734-1742.
67. Soğur E, Baksı BG, Gröndahl H-G, Şen BH. Pixel intensity and fractal dimension of periapical lesions visually indiscernible in radiographs. *J Endod* 2013; 39: 16-19.
68. Tosoni GM, Lurie AG, Cowan AE, Burleson JA. Pixel intensity and fractal analyses: detecting osteoporosis in perimenopausal and postmenopausal women by using digital panoramic images. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2006; 102: 235-241.
69. Amer ME, Heo M-S, Brooks SL, Benavides E. Anatomical variations of trabecular bone structure in intraoral radiographs using fractal and particles count analyses. *Imaging Sci Dent* 2012; 42: 5-12.
70. Mağat G, Şener SÖ. Evaluation of trabecular pattern of mandible using fractal dimension, bone area fraction, and gray scale value: comparison of cone-beam computed tomography and panoramic radiography. *Oral Radiol* 2018; 1-8.
71. Karperien A, Jelinek H, Milosevic N, Cracow P, editors. Reviewing lacunarity analysis and classification of microglia in neuroscience. 8th European Conference on Mathematical and Theoretical Biology; 2011.
72. Gefen Y, Aharony A, Mandelbrot BB. Phase transitions on fractals. III. Infinitely ramified lattices. *J Phys A Math Gen* 1984; 17: 1277.
73. Yaşar F, Akgünlü F. Fractal dimension and lacunarity analysis of dental radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 2005; 34: 261-267.
74. Önem E, Baksı G, Soğur E. Changes in the fractal dimension, feret diameter, and lacunarity of mandibular alveolar bone during initial healing of dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2012; 27: 1009-1013.
75. Shrout MK, Hildebolt CF, Potter BJ. The effect of varying the region of interest on calculations of fractal index. *Dentomaxillofac Radiol* 1997; 26: 295-298.
76. Baksı BG, Fidler A. Fractal Analysis of Periapical Bone from Lossy Compressed Radiographs: A Comparison of Two Lossy Compression Methods. *J Digit Imaging* 2011; 24: 993-998.
77. Shrout MK, Farley BA, Patt SM, ve ark. The effect of region of interest variations on morphologic operations data and gray-level values extracted from digitized dental radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999; 88: 636-639.
78. Lee KI, Choi SC, Park TW, You DS. Fractal dimension calculated from two types of region of interest. *Dentomaxillofac Radiol* 1999; 28: 284-289.
79. Shrout MK, Potter BJ, Hildebolt CF. The effect of image variations on fractal dimension calculations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1997; 84: 96-100.
80. Chen SK, Oviir T, Lin CH, ve ark. Digital imaging analysis with mathematical morphology and fractal dimension for evaluation of periapical lesions following endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005; 100: 467-472.