

Diş Hekimliğinde Fraktal Analiz Kullanımı: Derleme

Fractal Analysis In Dentistry: Review

ÖZ

Giriş: Fraktal kelimesi Latince'de 'kırık, parça' anlamına gelen 'fractus' sözcüğünden türemiştir. Eğriler, birbiri ile ilişkisi bulunmayan dağınık noktalar, yüzeyler ve standart geometride benzeri bulunmayan amorf yapıları tanımlamak için kullanılmaktadır. Fraktal analiz (FA), görüntü boyunca desenler sergileyen karmaşık geometrik yapıların niceliksel olarak değerlendirilmesine yönelik bir yöntemdir. Bilgisayar algoritmasıyla hesaplanan fraktal boyut (FB), yapının karmaşıklığını tanımlar ve tek bir sayıyla temsil edilir. FB'nin hesaplanması amacıyla birçok yöntem kullanılmıştır. Mesafe ölçümüne bağlı FB hesabı yapılan yöntemler arasında Richardson metodu, kutu sayma metodu ve Flook tarafından geliştirilmiş olan dilatasyon metodu (piksel genişletme metodu) yer almaktadır. FB analizi için kullanılan en popüler yöntem kutu sayma yöntemidir. Genel olarak FB'un yüksek olması yapının daha karmaşık, FB'un düşük olması da yapının daha basit internal düzene sahip olduğu anlamına gelmektedir. Fraktal analizden günümüzde pek çok alanda yararlanılmaktadır. Diş hekimliğinde birçok sistemik patolojinin ve periapikal lezyonların tanısının konulması, antiepileptik, kortizon gibi kullanılan ilaçların ve diabetes mellitus, talesemi majör, osteoporöz gibi çeşitli sistemik hastalıkların çene kemikleri üzerine etkilerinin değerlendirilmesi, oral malign ve premalign lezyonların iç yapısının incelenmesi, endodontik tedavi sonrasında kemikteki iyileşmenin takibi ve implantların osseointegrasyonunun değerlendirilmesi gibi pek çok amaçla FB hesaplaması yapılmaktadır.

Sonuç: FA; non-invaziv olması, kolay uygulanabilirliği ve düşük maliyeti sebebiyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmakta olup, etkin bir diagnostik araçtır. Bu derlemenin amacı; FBA'nın diş hekimliğinde kullanım alanlarının güncel literatürler taranarak tek bir başlık altında toplanması ve bu konuda çalışma yapmak isteyen yazarlara genel bir bilgi vermesidir.

Anahtar Kelimeler: Fraktal Analiz, Fraktal Boyut, Diş Hekimliği.

ABSTRACT

Objective: The word 'Fractal' derives from the Latin word 'fractus', meaning 'broken, piece'. Fractal describes curves, unrelated scattered points, surfaces, and amorphous structures with no analogs in standard geometry. Fractal analysis (FA) is a method for quantitatively evaluating complex geometric structures that exhibit patterns throughout the image. The fractal dimension (FD), calculated by a computer algorithm, describes the complexity of the structure and is represented by a single number. Many methods have been used to calculate FB. Methods that calculate FB based on distance measurement include the Richardson method, the box-counting method, and the dilation method (pixel expansion method) developed by Flook. The most popular method used for FB analysis is the box-counting method. In general, a higher FB means that the structure is more complex, and a lower FB means that the structure has a simpler internal order. Fractal analysis is used in many areas today. In dentistry, FD calculation is performed for many purposes, such as diagnosing many systemic pathologies and periapical lesions, evaluation of the effects of drugs such as anti-epileptics and cortisone, and various systemic diseases such as diabetes mellitus, thalassemia major and osteoporosis on the jaw bones, examining the internal structure of oral malignant and premalignant lesions, monitoring of bone healing after endodontic treatment and evaluating osseointegration.

Conclusion: FA has been widely used in recent years due to its non-invasiveness, easy applicability, low cost, and effective diagnostic tool. This review aims to gather the areas of use of FBA in dentistry under a single heading by scanning the current literature and providing general information to authors who want to work on this subject.

Key Words: Fractal Analysis, Fractal Dimension, Dentistry,

Abdulkadir Kemal BİNİCİ¹

ORCID: 0000-0002-7654-1036

Fitnat Deniz ÖZBAY ÇETİNER¹

ORCID: 0000-0002-1903-2999

¹Gazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi,
Periodontoloji AD.
Ankara, Türkiye



Geliş tarihi / Received: 28.02.2024

Kabul tarihi / Accepted: 15.05.2024

İletişim Adresi /Corresponding Address:

Abdulkadir Kemal BİNİCİ

Gazi Üniversitesi,

Diş Hekimliği Fakültesi, Periodontoloji AD,

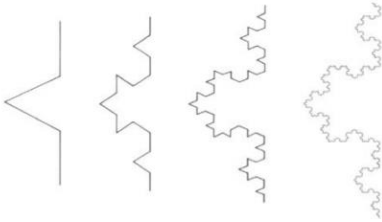
Ankara, Türkiye

E-posta/e-mail:kemalbinici07@gmail.com

1. Fraktal Analiz

'Fraktal' kelimesi Latince'de 'kırık, parça' anlamına gelen 'fractus' sözcüğünden türemiştir. Eğriler, birbiri ile ilişkisi bulunmayan dağınık noktalar, yüzeyler ve standart geometride benzeri bulunmayan amorf yapıları tanımlamak için kullanılmaktadır (1).

Fraktal geometri, 1977 yılında Fransız Amerikalı matematikçi B. B. Mandelbrot tarafından ortaya atılmıştır (2). Fraktallar sıklıkla kesirli veya tamsayı olmayan bir boyuta sahiptir (3). Öklid "topolojik" boyutları açısından; noktalar sıfır boyuta, düz çizgiler 1 boyuta (uzunluğa), düzlem yüzeyler iki boyuta ve hacimler üç boyuta sahiptir. Ancak fraktallar tipik olarak topolojik boyutlarını aşan boyutsal değerleri içerir (4). Fraktallar, bir desenin (çizgi, yüzey veya hacim) farklı boyutlarda tekrarlandığı, böylece bütün bir nesnenin her bir parçasının farklı ölçeklerde benzer görüldüğü matematiksel nesnelere; bu özelliğe "kendine benzerlik" (self-similarity) denir (Şekil 1.) (5).

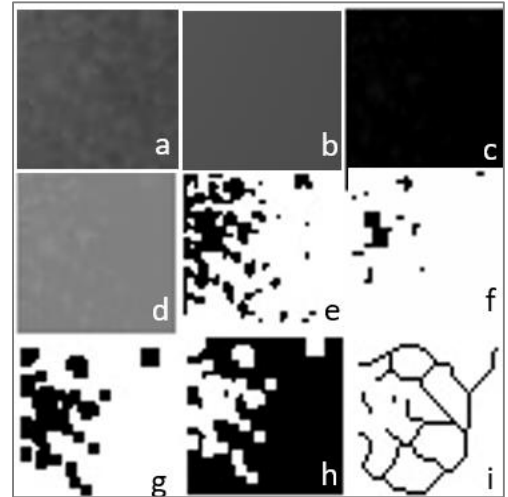


Şekil 1. Koch kar tanesi eğrisi (5).

Matematiksel fraktallar, her gözlem ölçeğinde tam bir kendine benzerlik izleyen teorik sonsuz nesnelere ve elektronik, meteoroloji ve ekonomi gibi birçok alanda matematiksel modelleme aracı olarak kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, bu kavram matematiksel olmayan nesnelere de genişletilebilir ve bu doğal fraktallar, sınırlı bir ölçek aralığı boyunca kendine benzer (veya çoğu durumda yarı veya istatistiksel olarak kendine benzer) tekrarlayan desenler olarak tanımlanır (6). Fraktal analiz, görüntü boyunca desenler sergileyen fraktallerin niceliksel olarak değerlendirilmesine yönelik bir yöntemdir. Bilgisayar algoritmasıyla hesaplanan fraktal boyut (FB), yapının karmaşıklığını tanımlar ve tek bir sayıyla temsil edilir (7). FB; düzensizliğin bir ölçüsü olarak tanımlanır. Ancak aynı boyutlara sahip fraktalların çok farklı görünümlere sahip olabilmeleri nedeniyle, aynı boyuttaki farklı dokulara sahip fraktalların özelliklerini tanımlamak için "lakünerlik" terimi ortaya çıkmıştır (8). Lakünerlik, doku heterojenliğinin ölçeğe bağlı bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir (9, 10). Mandelbrot; ölçümleri birim cinsinden ifade edilemeyen cisimlerin sahip olduğu düzensizlik derecesini ölçerek, ölçek değiştiğinde bu

düzensizlik derecesinin (fraktal boyut, FB) sabit kaldığını belirtmiştir(8). Bu şekilde doğal dünyadaki morfolojinin tanımlanmasına ve ölçülmesine büyük bir katkı yapmıştır (11). Genel olarak FB'un yüksek olması yapının daha karmaşık, FB'un düşük olması da yapının daha basit internal düzene sahip olduğu anlamına gelmektedir (12).

FA; FB'yi hesaplayarak trabeküler kemik dokusundaki değişiklikleri ölçen, kolay uygulanan, ucuz ve güvenilir bir tekniktir (13, 14). Bu analiz karmaşık yapıların sayısallaştırılmasına yardımcı olabilecek matematiksel bir tekniktir (15). FB'nin hesaplanması amacıyla birçok yöntem kullanılmıştır. Mesafe ölçümüne bağlı FB hesabı yapılan yöntemler arasında *Richardson metodu*, kutu sayma metodu ve Flook tarafından geliştirilmiş olan dilatasyon metodu (piksel genişletme metodu) yer almaktadır (12). FB analizi için kullanılan en popüler yöntem kutu sayma yöntemidir (2). Kutu sayma yöntemi, biyolojik veri analizi için FB analiz tekniğini kullanır. Bu teknik, bir cismin sınırlarını kapsayan kutuların ve bu kutuların boyutlarının logaritmalarının karşılaştırmalı bir grafiğini çizer. Grafiğin negatif eğimli düz bölümü, FB analiz sonucunu belirtir. Gri tonlama bir görüntüye bu yöntem uygulandığında, görüntü ikili formata dönüştürülür ve FB analizi için iskeletleştirilir (16)(Şekil 2.).



Şekil 2. Fraktal analiz basamakları, a) Duplike ROI görüntüsü, b) Gaussian Blur filtresi uygulanması, c) Duplike ROI görüntüsünden bulanıklaştırılan görüntünün çıkartılması, d) 128 gri tonu ekleme, e) Siyah-beyaz görüntüye çevirme, f) Erode işlemi, g) Dilate işlemi, h) Renkleri tersine çevirme, i) İskeletleştirme.

Kemik kalitesi, trabeküler devamlılık, kemik geometrisi, kemikte oluşmuş olan mikrohasarlar, kemik dokunun mimarisi, mineralizasyon miktarı ve kusurları gibi birçok faktöre bağlıdır. Kemik yapının analizinde geçmiş yıllarda sıklıkla kemik mineral

yoğunluğu ölçümü kullanılmaktaydı (17). Bilgisayarlı tomografinin yaygınlaşmasıyla beraber “kemik dansite” ya da “*Hounsfield Unit*” (HU) ölçümleri de kullanıldı. Ancak güncel çalışmalar kemik kalitesinin incelenmesinde sadece dansite ölçümlerinin yeterli olmadığını, trabeküler yapının değerlendirilmesini de gerektiğini ortaya koymaktadır (18, 19).

Trabeküler kemik; self similarity ve dallanmış yapısı nedeniyle “fraktal” karakteristik göstermektedir. Böylelikle fraktal geometrik uygulamalar ve fraktal boyut analizi (FBA) trabeküler kemiğin kompleks yapısını tanımlamak için kullanılabilir (20).

Fraktal analiz ve mandibular indeksler, mevcut panoramik görüntülerde ölçülebilen parametrelerdir (21). Radyograflar üzerinden tespit edilen FB'nin trabeküler kemik yoğunluğundaki değişimleri ve kemikteki mineral kaybını yansıttığı belirtilmektedir. Literatürdeki araştırmalarda, trabeküler kemik mimarisi ve FB arasında korelasyon olduğu gösterilmiştir (22).

2. Fraktal Analizin Diş Hekimliğinde Kullanım Alanları

Fraktal analizden günümüzde pek çok alanda yararlanılmaktadır. Tıp alanında hastalığın teşhisi ya da mevcut hastalığın şiddeti hakkında bilgi vermektedir. Radyograflar üzerinden tespit edilen FB'nin trabeküler kemik yoğunluğundaki değişimleri yansıttığı belirtilmektedir (23, 24). Diş hekimliğinde birçok sistemik patolojinin, periapikal lezyonların tanısının konulması ve osseointegrasyonun değerlendirilmesi amacıyla radyograflar üzerinde FB hesaplaması yapılmaktadır (25, 26).

2.1. Sistemik Hastalıkların ve İlaç Kullanımının Kemik Metabolizmasına Etkisinin FA Yöntemiyle Değerlendirilmesi

Diabetes Mellitus (DM), dünya çapında 415 milyondan fazla kişiyi etkileyen kronik bir metabolik hastalıktır ve bu sayının 2040 yılına kadar iki katına çıkması beklenmektedir. Retinopati ve nefropati gibi mikrovasküler bozukluklar, DM'nin iyi bilinen başlıca komplikasyonlarıdır. Yakın zamana kadar kemik, diyabetle ilişkili komplikasyonlar açısından hedef organ olarak görülüyordu. Ancak geçtiğimiz on yılda, her iki tip DM'de de yüksek kırık riskini destekleyen güçlü kanıtlar bulunmuştur ve diyabet hastalarında görülen kırıkların sonuçları, iyileşmede görülen güçlükler sebebiyle, diyabetik olmayanlara göre daha yıkıcı olabilmektedir (27, 28). Çakmak ve ark. tip 1 ve tip 2 *diabetes mellitusun* çene kemikleri üzerine etkilerini FBA ile değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda trabeküler kemiğin FB ölçümlerinin DM hastaları-kontrol grupları ve tip1-tip 2 DM hastaları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark gösterdiğini bildirmişlerdir (29). Talasemi majör (TM),

bir veya daha fazla hemoglobin zinciri alt biriminin yokluğu veya eksik sentezinden kaynaklanan genetik bir hastalıktır. Bu hastalarda kemik mineral yoğunluğu azalabilmektedir ve kemik döngüsünde emilim kapasitesinde artış olabilmektedir. Bayrak ve ark. 59 TM hastası ve 59 sağlıklı kontrol grubunda dört farklı bölgenin FB'sini değerlendirmişlerdir. Mandibula açısının üzerindeki suprakortikal alanda, mental foramen anteriorunda ölçülen FB ortalaması ve dört farklı bölgenin ortalama FB'si TM hastalarında kontrol grubuna göre anlamlı derecede daha düşük kaydedilmiştir (30).

Osteoporoz, dünya çapında önemli ve giderek büyüyen bir sağlık sorunudur. Düşük kemik kütlesi ve kemiğin mikromimari yapısının bozulması sonucu kırık riskinin artmasıyla karakterize sistemik bir iskelet hastalığıdır (31). Franciotti ve ark. osteoporozun çene kemikleri üzerine etkisini FA ile değerlendiren çalışmalar ile ilgili meta-analiz yayınlamışlardır. Çalışmalardan elde ettikleri verilere göre, yayınlanan çalışmaların ortalama metodolojik kalitesinin düşük olduğunu ve FB'nin uygulanabilirliğinin çok dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir (32).

Kronik böbrek hastalığı (KBH), dünya çapında genel nüfusun %10'undan fazlasını etkileyen ilerleyici bir durumdur (33). Böbrek yapısı veya işlevinde üç aydan uzun süre ortaya çıkan ve sağlık açısından olumsuz etkileri olan anormallikler olarak tanımlanır. Böbrek nakli (BN), KBH'li hastalar için altın standart replasman tedavisidir. Ancak mevcut başarısına rağmen, hastalık sırasında meydana gelen metabolik kemik değişiklikleri kalıcıdır ve nakledilen organın reddedilmesini önlemek için vazgeçilmez olan immünsüpresif tedavilerle daha da kötüleşebilmektedir (34). Brat ve ark. 2022 yılında yaptıkları çalışmada; 17 sağlıklı bireyin 54 periapikal, 12 BN bireyinin 40 periapikal ve 48 KBH bireyinin 156 periapikal radyografisini diş çekiminden sonraki yedi ve 60. günlerde incelemişlerdir. Yedinci ve 60. günlerde yapılan diş çekimleri sonrasında ölçülen FB, kontrol grubu ve KBH olan kişilerle karşılaştırıldığında BN bireylerinde anlamlı derecede daha düşük olduğunu saptamışlardır (35). Antiepileptik ilaçlar (AEİ'ler) epilepsi tedavisinde tıbbi tedavinin temelini oluşturmaktadır. Ayrıca nörolojik bozukluklarda (örn. nöropatik ağrı, esansiyel tremor ve migren profilaksisi) ve demanstaki davranış bozukluklarında ve anksiyete, bipolar bozukluk, şizofreni gibi psikiyatrik bozukluklarda da kullanılırlar (36). Önceki araştırmalar, AEİ kullanımı ile kalsiyum, fosfat ve D vitamini düzeylerinin azalması ve kandaki paratiroid hormonu düzeylerinin artması arasında olası bir ilişki olduğunu ve geleneksel (fenobarbital, karbamazepin, valproat vb.) ve yeni nesil (okskarbazepin,

gabapentin) AEİ ile tedavi gören hastalarda kemik mineral yoğunluğunda (KMY) azalmalar olduğunu ortaya koymuştur (37).

Temur ve ark. 497 kişi ile yaptıkları çalışmada AEİ kullanımının çene kemikleri üzerine etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışma grubu sadece bir AEİ alan ve kemik metabolizmasını etkileyen başka ilaç kullanmayan hastalardan oluşurken, kontrol grubu ise kemiği etkileyen herhangi bir ilaç kullanmayan sağlıklı bireylerden oluşmuştur. Araştırma sonuçlarına göre çalışma grubunda hesaplanan FD değerleri ile kontrol grubu değerleri karşılaştırıldığında AEİ'lerin kemikte önemli değişikliklere neden olduğunu ve kullanılan farklı nesil ilaçların etkilerinin trabeküler kemikte belirgin olarak izlendiğini saptamışlardır. Bununla birlikte en az bir yıl süreyle AEİ kullanımının kısa süreli kullanıma göre mandibulayı daha fazla etkilediğini belirtmişlerdir (38). Maksilla ve mandibulada görülen ilaca bağlı osteonekroz (MRONJ), antirezorptif ve antianjiyogenik ajanların yan etkileri olan bir grup hastalık için kullanılan ortak terimdir. Bu nedenle MRONJ hastalarının erken evrede tanımlanması önemlidir. Tanı için en sık üç boyutlu radyografik görüntüleme önerilmektedir. MRONJ'un tipik radyografik belirtileri arasında çene kemiklerinin osteoskleroza, osteoliz, kalınlaşmış lamina dura, subperiosteal kemik birikimi ve kemik remodalizasyonun olmadığı diş çekimi sonrası kalıcı alveoler soket yer almaktadır (39).

Bachtler ve ark. 77 MRONJ hastasının KIBT görüntüleri üzerinde yaptıkları çalışmada hastaların kemik yapılarının kontrol grubuyla karşılaştırıldığında daha az karmaşık hale gelmesini beklediklerini belirtmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre; kontrol grubuyla karşılaştırıldığında çalışma grubunda FB'de oldukça anlamlı bir azalma olduğunu ve sonucun hipotezleri ile uyumlu olduğunu bildirmişlerdir. Buna göre FB'nin potansiyel olarak hastalıklı bireyleri erken dönemde teşhis etmede sayısal bir ölçüt olarak kullanılabilirliğini belirtmişlerdir (40). Kortikosteroidlerin (KS) belirli tedavi dozlarında immünsupresif ve antiinflamatuvar etkileri vardır. KS kullanımı sırasında kemik metabolizması üzerine birçok yan etkiyle karşılaşmaktadır. Osteoporoz sık görülen bir yan etkidir, avasküler nekroz ise daha az olasıdır (41, 42). Belgin ve ark. 60 hastanın panoramik radyografları ile yürüttükleri çalışmada intravenöz KS kullanımının çene kemikleri üzerine etkisini FA ile değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre KS grubunda kondil, mandibula açısı ve mental foramen bölgesindeki FB değerlerinin anlamlı derecede düşük olduğunu bulmuşlardır ve FB değerlerinin, intravenöz kortikosteroid alan hastalardaki kemik değişikliklerinin niceliksel ve objektif olarak değerlendirilmesinde yardımcı olabileceğini bildirmişlerdir (43).

2.2. Fraktal Analiz Yönteminin Ağız, Diş ve Çene Cerrahisi Alanında Kullanımı

Heo ve ark. yaptıkları çalışmada ortognatik cerrahi operasyon bölgelerindeki radyografik değişiklikleri değerlendirmek için FA kullanmışlar ve FB'nin operasyondan hemen sonra azaldığını ve daha sonra kademeli olarak arttığını gözlemlemişlerdir. 12 ay sonra (mandibular iyileşme ve kemiğin yeniden şekillenmesine eşdeğer) FB'nin ameliyat öncesi değerlere benzer olduğunu ve kemik iyileşme sürecini değerlendirmek için FBA'nın kullanılabilirliği sonucuna varmışlardır (44).

Southard ve ark. FB ile alveol kemiğinin yoğunluğu arasında pozitif bir ilişki olduğunu ve kemik yoğunluğu arttıkça FB'nin de arttığını belirtmişlerdir (45). Nair ve ark. konvansiyonel radyografide fraktal analizler kullanarak tavşan mandibulalarındaki oluşturulan defektlerde kemik iyileşmesini değerlendirmişlerdir. İyileşme sürecinde FB'nin arttığını bildirmişlerdir (46).

2.3. Fraktal Analiz Yönteminin Periodontoloji Alanında Kullanımı

Periodontal hastalık diş kaybının en önemli nedenlerinden biridir ve birçok sistemik hastalıkta değiştirici bir faktör olarak düşünülebilir (47). Alveoler kemik değişiklikleri periodontal hastalıkların başlangıcını ve ilerlemesini göstermektedir. Bu nedenle alveolar kemik yapısındaki değişikliklerin değerlendirilmesi; periodontal hastalıkların önlenmesinde, tedavi planlamasında ve prognozunda vazgeçilmez adımdır. Soltani ve ark. 2021 yılında periodontitisli hastaların periapikal radyografileri üzerinden FBA ile trabeküler kemiği değerlendirmiştir. Orta ve şiddetli periodontitis ile sağlıklı periodontal kemik arasında FB değerlerinin anlamlı derecede farklı olduğunu belirtmişlerdir ve FBA'nın orta ve şiddetli periodontitiste kemik değişikliklerini değerlendirmek için yararlı bir araç olduğunu, bununla birlikte periodontitisin başlangıç radyografik kemik belirtilerini tespit edemediğini bildirmişlerdir (48). Mishra ve ark. periodontitisli hastalarda FBA kullanarak kansellöz değişiklikleri değerlendirmişlerdir ve FB ile periodontitisin artan evresi arasında negatif bir korelasyon olduğunu bildirmişlerdir (49). Gingivitis ve periodontitisli hastaların periapikal radyografilerinden FB değerlerini karşılaştıran Shroot ve ark. periodontitis grubunun anlamlı derecede daha düşük bir ortalama FB değerine sahip olduğunu bildirmiştir. Bu durum periodontal sağlığın fraktal indeks ile pozitif korelasyon gösterdiğini ve periodontal sağlık kötüleştiğinde fraktal indeksin azaldığını göstermektedir (50).

2.4. Fraktal Analiz Yönteminin İmplantoloji Alanında Kullanımı

Primer implant stabilitesi, osseointegre implantlar için başarılı uzun vadeli tedavi sonuçlarının olmazsa olmaz koşuludur (51). Başarılı implant prosedürü, klinisyenin primer implant stabilitesinin derecesini ve kemik değişikliklerini değerlendirme yeteneğine bağlıdır (52). İmplantın stabilitesi ise kemiğin kalitesine ve miktarına, cerrahi tekniğe ve implant özelliklerine bağlıdır (53, 54). Zayıf kemik kalitesi ve miktarının, implantların uzun vadeli başarısızlık oranı üzerinde büyük etkisi vardır; ancak başlangıçtaki implant stabilitesi ile kemik kalitesi arasındaki ilişki belirsizliğini korumaktadır (55).

Kemik kalitesini analiz etmek için iki noninvaziv klinik yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki preoperatif bir yöntem olarak fraktal boyut analizi, ikincisi ise postoperatif bir yöntem olan implant stabilite katsayısıdır (ISQ) (11). Sansare ve ark. 33 hastanın panoramik radyografilerinde implant yerleştirmeden önce ve sonra fraktal boyuttaki değişiklikleri araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, ortalama FB değerinde anlamlı bir artış görülmüştür. Bu durumun implantasyon sonrası peri-implant bölgelerde kemik mikroyapısındaki artıştan kaynaklanabileceğini düşündüklerini belirtmişlerdir (56). Abdulhameed ve ark. 22 implant tedavisi uygulanan hasta ile yaptıkları çalışmada, implantasyon sonrası implant stabilitesi ile peri-implant bölgedeki kemiğin FB ölçümlerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre düşük FB değerlerine sahip implantların stabilitede bir azalmaya işaret edebileceği sonucuna varmışlardır. Bu nedenle fraktal analizin trabeküler kemikteki değişiklikleri değerlendirmede ekonomik ve kolay ulaşılabilir bir yöntem olarak umut vaat ettiğini bildirmişlerdir (57). Hadzik ve ark. farklı lazer kaynaklı periyodik yüzey yapıları (LİPS) bazlı diş implantı deney yüzeylerinin örneklerini taramalı elektron mikroskobu görüntülerine dayanarak fraktal boyut analizi ve doku analizi ile değerlendirmişlerdir ve sonuçları standart yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesiyle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre doku ve fraktal boyut analizlerinin karmaşık geometriye sahip diş implantlarının değerlendirilmesinde umut verici yöntemler olduklarını bildirmişlerdir. Ayrıca yeni bir implant yüzeyinin fiziksel düzeyde değerlendirilmesinde uygulandığında hücre davranışının öngörülmesinin sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır (58). Alcaraz ve ark. 2023 yılında yaptıkları çalışmada yavaş ve standart şekilde yapılan implant yuvası hazırlama yöntemi ile yerleştirilen implantların çevresindeki kemiği panoramik radyograflar üzerinden FBA ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda iki grup arasında anlamlı bir fark bulunmadığının, delme tipinin kemiğin kalitesini veya osseointegrasyon sürecini etkilemediğini gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte FB'nin kemik trabeküllerinde görülen önemli değişiklikleri

değerlendirmek için iyi bir gösterge olduğunu, böylece klinisyene osseointegrasyon sürecinde üretilen değişiklikleri değerlendirmede değerli bir destek sunabileceğini belirtmişlerdir (59).

Jing Mu ve ark. yaptıkları çalışma sonucunda fonksiyonel yüklemekten sonra implantların etrafındaki artan fraktal boyutun, çevredeki kemiğin adaptif yeniden şekillenme tepkisini gösterdiği ve FBA'nın, klinikte peri-implant alveolar trabeküler kemik modellerindeki değişiklikleri tespit etmede yardımcı olabileceği sonucuna varmışlardır (60).

Son yıllarda implant diş hekimliğinin en önemli odak noktalarından biri; öngörülebilir, uzun vadeli estetik ve sağlıklı sonuçlara daha iyi ulaşmak için marjinal kemik kaybı (MBL) modellerinin incelenmesi olmuştur (61, 62). MBL, peri-implant sağlığının önemli bir göstergesini temsil eder ve peri-implant kemik kaybı cep oluşumuna neden olabileceğinden, seviyesinin ölçümü, hayatta kalma kalitesinin değerlendirilmesinde belirleyici bir faktör olarak kabul edilmektedir (63). Peri-implantitis, peri-implant dokuda inflamasyon ve ilerleyici kemik kaybı ile karakterizedir. Peri-implantitisin tanısı, prognozu ve tedavisi, klinik ve radyografik verilerin doğru bir şekilde değerlendirilmesine bağlıdır (61, 62). Yeon ve ark. 20 peri-implantitis hastası ile yaptıkları çalışmada peri-implant kemik dokusunu cerrahi tedavi öncesi ve sonrasında FBA ile değerlendirmişlerdir. Tedavisi başarılı olan hastalarda FB'de artış izlenirken, tedavisi başarısız olan hastalarda ölçülen FB'nin düştüğünü ortaya koymuştur (64). Lang ve ark. 104 hasta ile yaptıkları çalışma ile implant etrafında sağlıklı mukoza bulunan hastaların ve peri-implantitis hastalarının implant çevresini sondalamada kanama, klinik ataçman boyutu, cep derinliği ve FBA ile değerlendirmişlerdir. Yaptıkları istatistiksel değerlendirme sonuçlarında gruplar arasında anlamlı farklılık göstermeyen tek parametrenin FB olduğunu, diğer parametrelerin ise gruplar arasında anlamlı fark gösterdiğini bildirmişlerdir. Çalışma sonucunda periapikal radyografiden hesaplanan peri-implant kemiğin FB'si, sağlıklı ve hastalıklı implantlar arasında ayırım yapmak için geçerli bir yöntem gibi görünmediğini belirtmişlerdir (62).

2.5. Fraktal Analiz Yönteminin Endodonti Alanında Kullanımı

Periradiküler bölgedeki kemik yoğunluğu değişikliklerinin değerlendirilmesi, endodontik tedavi etkinliğinin değerlendirilmesinde önemli bir adım olmaya devam etmektedir ve değişikliklerin erken tespiti, ileri tedavi planlamasına yardımcı olmaktadır. Geleneksel radyografik yorumlamayla ilgili ve yüksek hata oranlarına yol açan problemler arasında şunlar yer alır: radyografilerin farklı kalitesi ve çekim

geometrisi, görüntülerde oluşan gürültü, değerlendirmenin öznel doğası ve duyarlılıktan daha yüksek özgüllük (65). Sonuç olarak, periradükler dokuların değerlendirilmesinde geleneksel radyografik görüntülemeye göre daha güvenilir ve hassas yöntemler aranmaktadır (66). Chen ve ark. 27 hasta ile yaptıkları çalışmada 25'inde kök kanal tedavisi sonrasında FB'de artış görüldüğünü ve kanal tedavisinden üç ay sonra FBA'da değişiklikler fark edildiğini bildirirken (67), Yu ve ark. reaktif kemik bölgelerinde FD'de azalma gözlemlediklerini belirtmişlerdir (68). Başka bir çalışma, daha düşük bir FB'nin daha fazla boşluk ve daha fazla kemik gözenekliliğini yansıttığını, daha yüksek bir FB'nin ise kemiğin daha az boşlukla daha yoğun ve daha karmaşık olduğunu gösterdiğini kaydetmişlerdir (69). Endodontik çalışmalar, apikal lezyonlu dişlerde kök kanal tedavisinden sonra FB değerlerinin arttığını ve daha fazla klinik iyileşme olduğunu bildirmiştir (69, 70). Buna karşılık başka bir çalışmada pulpası enfekte veya nekrotik olan dişlerde endodontik tedavi sonrası periapikal radyografilerde apikal FB'de azalma ve kemik yoğunluğunun azaldığı gösterilmiştir (67). Tosun ve ark. yaptıkları çalışmada kanal yenileme öncesinde ve kanal yeniledikten bir yıl sonra elde edilen periapikal radyografları FBA ile değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda tedavi öncesinde alınan ve tedaviden sonra elde edilen radyografiler arasında iyileşen vakalarda FB değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğunu ve bununla birlikte iyileşmeyen olgularda ise FB'de anlamlı azalma gördüklerini bildirmişlerdir (71).

Baksı ve ark. çekilmiş dişler üzerinde yaptıkları çalışmada farklı büyütmelerdeki elektron mikroskobu görüntülerini kullanarak, smear tabakasının varlığında veya yokluğunda dentinin fraktal boyutunu (FD) ve lakünerliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda lakünerliğin, mikroskop görüntülerinin büyütülmesinden bağımsız olarak smear tabakasının varlığının veya yokluğunun belirlenmesinde potansiyel bir araç olarak hizmet edebileceğini bildirmişlerdir. FB'nin ise büyütmeden etkilendiğini ve mikroskop görüntülerinde smear tabakasının varlığını veya yokluğunu ayırt edemediğini kaydetmişlerdir (10).

2.6. Oral Malign ve Premalign Lezyonların Fraktal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi

Archana ve ark. yaptıkları çalışmada oral malignite tanısı almış ve mandibula ve maksillada kemik erozyonu görülen 10 hastanın panoramik radyograflarını FBA ile incelemiştir. Çalışma sonuçlarında etkilenmiş bölgelerin sağlıklı bölgelere göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük FB'ye sahip olduklarını bulmuşlardır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre FB analizinin oral malignitelerde kemik invazyonu durumlarında kullanılabilecek yenilikçi bir yöntem olduğu belirtmişlerdir. Bununla birlikte kemik invazyonunun

boyutunu belirlemede ve oral malignitelerde cerrahi rezeksiyon sınırlarının belirlenmesinde de yardımcı olabileceğini bildirmişlerdir (2). Salwaji ve ark. yaptıkları çalışmada 15 oral skuamoz hücreli karsinom (OSKK) hastasından alınan biyopsileri incelemiştir. Doku örneklerinin yarısını transmisyon elektron mikroskobu için, geri kalan yarısını ise sınıflandırma amacıyla H&E boyama için kullanmışlardır. Sonuçlar normal mukoza ile karşılaştırıldığında OSKK'nın ortalama nükleer FB değerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğunu göstermiştir. Bu durumun FBA'nın kanser tanısında yeni ve ilginç bir araç olabileceğini ortaya koymuşlardır (72). Sánchez ve ark. oral lökoplaki hastalarından alınan biyopsilerin görüntüleri üzerinde FBA ile yaptıkları çalışmada displazi olmayan/yüksek dereceli ve düşük dereceli/ yüksek dereceli gruplar arasında anlamlı farklar gözlemlendiğini saptamışlardır (73). Oral lökoplaki tanısı almış 121 bireyin ağız içi görüntülerinin incelendiği farklı bir çalışmada lökoplakinin morfolojisinin FB analizi ile etkili bir şekilde belirlenebileceği ve bu nedenle FBA'nın malign dönüşümün erken tespiti için noninvaziv, uygun maliyetli bir tanı aracı olarak kullanılabileceğini kaydetmişlerdir (74). Pandey ve ark. ise yaptıkları çalışmada FA'nın çeşitli premalign lezyonlar ve durumlar için etkili ve invaziv olmayan bir tanı ve prognostik araç olabileceğini belirtmişlerdir (75).

SONUÇ

FA; etkili ve non-invaziv diagnostik ve prognostik bir araç olarak hem tıpta hem de diş hekimliğinde kullanılmaktadır. Kemik metabolizmasının değerlendirilmesinde kıymetli bir yöntemdir. Premalign lezyonların mimarisini incelemeye, implantların yerleştirilmesinden sonra stabilizasyonun değerlendirilmesinde, kök kanal tedavisi sonrası apikal lezyonların iyileşme takibinde gibi pek çok alanda fraktal analiz kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde yapay zekâ tekniği ile birleştirildiğinde FA'nın doğruluk ve uygulanabilirliği artabileceği göz önünde bulundurularak bu konuda yapılacak çalışmalar artırılmalıdır.

1. Sanchez I, Uzcategui G. Fractals in dentistry. *J Dent.* 2011;39(4):273-92.
2. Archana M, Jayachandran S. Diagnostic application of fractal dimension analysis of bone invasion in oral malignancy-A preliminary retrospective study. *Annals of the Ann Natl Acad Med Sci.* 2020;56(01):42-5.
3. Landini G. Fractals in microscopy. *J Microsc.* 2011;241(1):1-8.
4. Mancardi D, Varetto G, Bucci E, Maniero F, Guiot C. Fractal parameters and vascular networks: facts & artifacts. *Theor Biol Med Model.* 2008;5:12.
5. Krzysztofik WJ. Fractal Geometry in Electromagnetics Applications—from Antenna to Metamaterials. *Microwave Review.* 2013;19(2).
6. Dohan Ehrenfest DM. Fractal patterns applied to implant surface: definitions and perspectives. *J Oral Implantol.* 2011;37(5):506-9.
7. Ruttimann UE, Webber RL, Hazelrig JB. Fractal dimension from radiographs of peridental alveolar bone. A possible diagnostic indicator of osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1992;74(1):98-110.
8. Degiorgio V. Mandelbrot, BB The Fractal Geometry Of Nature. 1984;78(119):27.
9. Plotnick RE, Gardner RH, O'Neill RV. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology.* 1993;8:201-11.
10. Baksı BG, Şen BH. Fractal Dimension and Lacunarity Analyses of Root Canal Dentin with or without Smear Layer. *Meandros Med Dent J.* 2023;24(2).
11. Hayek E, Aoun G, Bassit R, Nasseh I. Correlating radiographic fractal analysis at implant recipient sites with primary implant stability: an in vivo preliminary study. *Cureus.* 2020;12(1): e6539.
12. Güleç M, Taşşöker M, Şener S. Tıpta ve Diş Hekimliğinde Fraktal Analiz. *EÜ Dişhek Fak Derg.* 2019;40(1):17-31.
13. Small RE. Uses and limitations of bone mineral density measurements in the management of osteoporosis. *Med Gen Med.* 2005;7(2):3.
14. Savic Pavicin I, Dumancic J, Jukic T, Badel T, Badanjak A. Digital orthopantomograms in osteoporosis detection: mandibular density and mandibular radiographic indices as skeletal BMD predictors. *Dentomaxillofac Radiol.* 2014;43(7):20130366.
15. Apolinario AC, Sindeaux R, de Souza Figueiredo PT, Guimaraes AT, Acevedo AC, Castro LC, et al. Dental panoramic indices and fractal dimension measurements in osteogenesis imperfecta children under pamidronate treatment. *Dentomaxillofac Radiol.* 2016;45(4):20150400.
16. Haidekker MA, Andresen R, Evertsz CJ, Banzer D, Peitgen HO. Assessing the degree of osteoporosis in the axial skeleton using the dependence of the fractal dimension on the grey level threshold. *Br J Radiol.* 1997;70(834):586-93.
17. Cakur B, Sahin A, Dagistan S, Altun O, Caglayan F, Miloglu O, et al. Dental panoramic radiography in the diagnosis of osteoporosis. *J Int Med Res.* 2008;36(4):792-9.
18. Ibrahim N, Parsa A, Hassan B, van der Stelt P, Aartman IH, Wismeijer D. Accuracy of trabecular bone microstructural measurement at planned dental implant sites using cone-beam CT datasets. *Clin Oral Implants Res.* 2014;25(8):941-5.
19. Gümüşsoy İ. Panoramik Radyografilerde Fraktal Analiz Metodunun Uygulanması ve Değişik Röntgen Cihazlarının Fraktal Boyut Değerine Etkisi. *Sakarya Tıp Dergisi.* 2019;9(3):492-8.
20. Furuncuoğlu ÖÜF, Gümüşsoy İ. Endodontik tedavi sonrası periapikal reaktif kemiğin fraktal boyut analizi ile değerlendirilmesi. *7tepe Klinik Dergisi.* 2022;18(2):4-9.
21. 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(5):20150389.
22. Oliveira ML, Pedrosa EFNC, Cruz AD, Haiter-Neto F, Paula FJA, Watanabe PCA. Relationship between bone mineral density and trabecular bone pattern in postmenopausal osteoporotic Brazilian women. *Clin Oral Investig.* 2013;17:1847-53.
23. Demirbas AK, Ergun S, Guneri P, Aktener BO, Boyacioglu H. Mandibular bone changes in sickle cell anemia: fractal analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2008;106(1):e41-8.

24. Bollen AM, Taguchi A, Hujuel PP, Hollender LG. Fractal dimension on dental radiographs. *Dentomaxillofac Radiol.* 2001;30(5):270-5.
25. Zheng K, Makrogiannis S, editors. Bone texture characterization for osteoporosis diagnosis using digital radiography. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC); 2016: IEEE.
26. Onem E, Baksi BG, Sogur 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(5):1009-13.
27. Bonds DE, Larson JC, Schwartz AV, Strotmeyer ES, Robbins J, Rodriguez BL, et al. Risk of fracture in women with type 2 diabetes: the Women's Health Initiative Observational Study. *J Clin Endocrinol Metab.* 2006;91(9):3404-10.
28. Rubin MR. Skeletal fragility in diabetes. *Ann N Y Acad Sci.* 2017;1402(1):18-30.
29. Kursun-Cakmak ES, 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(2):184-91.
30. Bayrak S, Goller Bulut D, Orhan K, Sinanoglu EA, Kursun Cakmak ES, Misirli M, et al. Evaluation of osseous changes in dental panoramic radiography of thalassemia patients using mandibular indexes and fractal size analysis. *Oral Radiol.* 2020;36(1):18-24.
31. WA P. Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis. *Am J Med.* 1993;94(6):646-50.
32. Franciotti R, Moharrami M, Quaranta A, Bizzoca ME, Piattelli A, Aprile G, et al. Use of fractal analysis in dental images for osteoporosis detection: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int.* 2021;32(6):1041-52.
33. Kovesdy CP. Epidemiology of chronic kidney disease: an update 2022. *Kidney Int Suppl (2011).* 2022;12(1):7-11.
34. Keronen S, Martola L, Finne P, Burton IS, Kroger H, Honkanen E. Changes in Bone Histomorphometry after Kidney Transplantation. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2019;14(6):894-903.
35. Lins PJB, Zambrana JRM, Costa C, Caliento R, Andrade NS, Gallottini M. Fractal Dimension and Pixel Intensity in the Alveolar Bone Healing after Tooth Extractions in Individuals with Kidney Diseases. 2023;1:1-13.
36. Lee R, Lyles K, Sloane R, Colon-Emeric C. The association of newer anticonvulsant medications and bone mineral density. *Endocr Pract.* 2012:1-22.
37. Sato Y, Kondo I, Ishida S, Motooka H, Takayama K, Tomita Y, et al. Decreased bone mass and increased bone turnover with valproate therapy in adults with epilepsy [RETRACTED]. *Neurology.* 2001;57(3):445-9.
38. Temur KT, Magat G, Ozcan S. A retrospective comparative fractal and radiomorphometric analysis of the effect of 3 generations of anti-epileptic drugs on the mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2023;136(2):255-62.
39. Arce K, Assael LA, Weissman JL, Markiewicz MR. Imaging findings in bisphosphonate-related osteonecrosis of jaws. *J Oral Maxillofac Surg.* 2009;67(5 Suppl):75-84.
40. Bachtler R, Walter C, Schulze RK. Fractal dimension in CBCT images as predictor for MRONJ: a retrospective cohort study. *Clin Oral Inves.* 2021;25:2113-8.
41. Fardet L, Kassar A, Cabane J, Flahault A. Corticosteroid-induced adverse events in adults: frequency, screening and prevention. *Drug Saf.* 2007;30(10):861-81.
42. LoCascio V, Bonucci E, Imbimbo B, Ballanti P, Adami S, Milani S, et al. Bone loss in response to long-term glucocorticoid therapy. *Bone Miner.* 1990;8(1):39-51.
43. Belgin CA, Serindere G. Fractal and radiomorphometric analysis of mandibular bone changes in patients undergoing intravenous corticosteroid therapy. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology.* 2020;130(1):110-5.
44. Heo MS, Park KS, Lee SS, Choi SC, Koak JY, Heo SJ, et al. Fractal analysis of mandibular bony healing after orthognathic surgery. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002;94(6):763-7.

- 45.** 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(5):569-76.
- 46.** Nair MK, Seyedain A, Webber RL, Nair UP, Piesco NP, Agarwal S, et al. Fractal analyses of osseous healing using tuned aperture computed tomography images. *Eur Radiol.* 2001;11(8):1510-5.
- 47.** Larvin H, Kang J, Aggarwal VR, Pavitt S, Wu J. Risk of incident cardiovascular disease in people with periodontal disease: A systematic review and meta-analysis. *Clin Exp Dent Res.* 2021;7(1):109-22.
- 48.** Soltani P, Sami S, Yaghini J, Golkar E, Riccitiello F, Spagnuolo G. Application of Fractal Analysis in Detecting Trabecular Bone Changes in Periapical Radiograph of Patients with Periodontitis. *Int J Dent.* 2021;2021:3221448.
- 49.** Mishra S, Kumar M, Mishra L, Panda S, Panda S, Lewkowicz N, et al. Estimation of Cancellous Changes Using Fractal Analysis in Patients with Periodontitis. *Biomedicines.* 2023;11(9):2547.
- 50.** Shrouf MK, Roberson B, Potter BJ, Mailhot JM, Hildebolt CF. A comparison of 2 patient populations using fractal analysis. *J Periodontol.* 1998;69(1):9-13.
- 51.** Lioubavina-Hack N, Lang NP, Karring T. Significance of primary stability for osseointegration of dental implants. *Clin Oral Implants Res.* 2006;17(3):244-50.
- 52.** Sennerby L, Meredith N. Implant stability measurements using resonance frequency analysis: biological and biomechanical aspects and clinical implications. *Periodontol.* 2008;47(1):51-66.
- 53.** Karl M, Grobecker-Karl T. Effect of bone quality, implant design, and surgical technique on primary implant stability. *Quintessence Int.* 2018;49(3):189-98.
- 54.** Song YY, Cha JY, Hwang CJ. Mechanical characteristics of various orthodontic mini-screws in relation to artificial cortical bone thickness. *Angle Orthodontist.* 2007;77(6):979-85.
- 55.** Herrmann I, Lekholm U, Holm S, Kultje C. Evaluation of patient and implant characteristics as potential prognostic factors for oral implant failures. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2005;20(2):220-30.
- 56.** Sansare K, Singh D, Karjodkar F. Changes in the fractal dimension on pre- and post-implant panoramic radiographs. *Oral Radiology.* 2012;28(1):15-23.
- 57.** Abdulhameed EA, Al-Rawi NH, Uthman AT, Samsudin AR. Bone Texture Fractal Dimension Analysis of Ultrasound-Treated Bone around Implant Site: A Double-Blind Clinical Trial. *Int J Dent.* 2018;2018:2672659.
- 58.** Hadzik J, Kubasiewicz-Ross P, Simka W, Gebarowski T, Barg E, Ciesla-Niechwiadowicz A, et al. Fractal Dimension and Texture Analysis in the Assessment of Experimental Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) Dental Implant Surface-In Vitro Study Preliminary Report. *Materials (Basel).* 2022;15(8):2713.
- 59.** Soler-Alcaraz S, Guerrero-Sánchez Y, Pérez-Sayáns M, Bernabeu-Mira JC, Peñarrocha-Oltra D, Camacho-Alonso F. Evaluation of Change in Radiographic Fractal Dimension around Dental Implants Placed with Low-Speed Drilling and Standard Drilling Protocols. *J Clin Med.* 2023;12(6):2244.
- 60.** Mu T-J, Lee D-W, Park K-H, Moon I-S. Changes in the fractal dimension of peri-implant trabecular bone after loading: a retrospective study. *J J Periodontal Implant Sci.* 2013;43(5):209-14.
- 61.** Rosen P, Clem D, Cochran D, Froum S, McAllister B, Renvert S, et al. Peri-implant mucositis and peri-implantitis: a current understanding of their diagnoses and clinical implications. *J Periodontol.* 2013;84(4):436-43.
- 62.** Lang MS, Miyamoto T, Nunn ME. Validity of fractal analysis of implants in individuals with healthy and diseased peri-implant mucosa. *Clin Oral Implants Res.* 2020;31(11):1039-46.
- 63.** Wada M, Mameno T, Otsuki M, Kani M, Tsujioka Y, Ikebe K. Prevalence and risk indicators for peri-implant diseases: A literature review. *Japanese Dental Science Review.* 2021;57:78-84.
- 64.** Teh-Jing Mu, Dong-Won Lee, Kwang-Ho Park, Ik-Sang Moon. Changes in the fractal dimension of peri-implant trabecular bone after loading: a retrospective study. *J Periodontal Implant Sci.* 2013; 43(5): 209-214.

- 65.** Gröndahl H-G, Gröndahl K, Webber RL. A digital subtraction technique for dental radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1983;55(1):96-102.
- 66.** Delano EO, Ludlow JB, Ørstavik D, Tyndall D, Trope M. Comparison between PAI and quantitative digital radiographic assessment of apical healing after endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2001;92(1):108-15.
- 67.** Chen S-K, Oviir T, Lin C-H, Leu L-J, Cho B-H, Hollender L. 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(4):467-72.
- 68.** Yu Y-Y, Chen H, Lin C-H, Chen C-M, Oviir T, Chen S-K, et al. Fractal dimension analysis of periapical reactive bone in response to root canal treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009;107(2):283-8.
- 69.** Aktuna Belgin C, Serindere G. Evaluation of trabecular bone changes in patients with periodontitis using fractal analysis: A periapical radiography study. *J Periodontol.* 2020;91(7):933-7.
- 70.** 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(6):523-9.
- 71.** Tosun S, Karataslioglu E, Tulgar MM, Derindag G. Retrospective fractal analyses of one-year follow-up data obtained after single-visit nonsurgical endodontic retreatment on periapical radiographs. *Clin Oral Investig.* 2021;25:6465-72.
- 72.** Salwaji S, Ananthaneni A, Kuberappa PH, Bagalad B, Pasupuleti MK, Guduru VS. Fractal Analysis of Nuclear Architecture in Oral Squamous Cell Carcinoma by Using Transmission Electron Microscopy: An Original Research. *Meandros Med Dent J.* 2023;24(4):343-8.
- 73.** Guerrero-Sánchez Y, Gómez García F, Chamorro-Petronacci CM, Suárez-Peñaranda JM, Pérez-Sayáns M. Use of the fractal dimension to differentiate epithelium and connective tissue in oral leukoplakias. *Cancers.* 2022;14(11):2697.
- 74.** Iqbal J, Patil R, Khanna V, Tripathi A, Singh V, Munshi M, et al. Role of fractal analysis in detection of dysplasia in potentially malignant disorders. *J Family Med Prim Care.* 2020;9(5):2448.
- 75.** Pandey PB, Kandakurti S, Saxena VS, Tripathi P, Pamula R, Yadav M. Fractal analysis in oral leukoplakia. *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology.* 2015;27(3):354-8.