

Mimarlıkta Fraktal Geometrinin Kullanım Potansiyelleri

Potential Usage of Fractal Geometry In Architecture

ÖZET

Tarihten günümüze kadar, mimarlık ve geometri ilişkisinde sayılar, oranlar ve biçimsel etkileşimlerle ilgili araştırmalar yoğun olarak yapılmış gerek klasik mimaride gerekse modern mimaride, inşa edilecek yapıların oranları için arayışlar devam etmiştir. 1970'lerde matematikçi Benoit Mandelbrot, doğal sistemlerin genellikle birden fazla gözlem ölçeğinde karakteristik geometrik veya görsel karmaşıklığa sahip olduğunu iddia ederek, Euclid ile başlayan geometrik araştırmaları, 20. yüzyılın sonlarına doğru düzensiz yapılar ile ilgili olarak geliştirilmiştir. Doğayı modellemenin zorluğu, kullanılan ve en doğru kabul edilen geometrinin (Euclid) bu konuda yetersiz oluşu bunda en büyük etkidir. Bu noktada Fraktal geometri düzensiz, geometrik yapıları formlarda, karmaşık matematiksel düzlemde, dinamik sistemlere dair çözüm olanakları sunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında fraktal geometri özelinde mimarlık alanında geçmişten günümüze fraktal geometrinin mimaride kullanımı ile ilgili kronolojik bir çerçevenin çizilmesi ve fraktal geometrinin gelişen teknolojiler paralelinde kullanım alanlarının ve geleceğe dair sunduğu potansiyellerin araştırılmasına odaklanılmıştır. Birçok çalışma, fraktal oluşumların mimari ürünler üzerinde net bir yansımaları olduğunu göstermektedir. Bu çerçevede fraktal geometrinin; Organik ve Biyomorfik Yapı Tasarımı, Karmaşık ve Dinamik Yapı Tasarımı, Etkileşimli ve Duyarlı Tasarımlar, Sürdürülebilir ve Enerji Etkin Yapı Tasarımı, Estetik ve Deneyimsel Tasarım konu başlıkları özelinde yoğun olarak çalışıldığı görülmektedir. Sonuç olarak teknoloji ve fraktal geometri anlayışımız ilerlemeye devam ettikçe mimari ve kentsel tasarımda yenilikçi ve etkileyici uygulamaların artacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fraktal geometri, mimarlık, kentsel tasarım

ABSTRACT

From history to the present, research on numbers, ratios and formal interactions in the relationship between architecture and geometry has been intensively conducted, and searches for the ratios of structures to be built have continued in both classical and modern architecture. In the 1970s, mathematician Benoit Mandelbrot claimed that natural systems generally have characteristic geometric or visual complexity at more than one observation scale, and his geometric research, which began with Euclid, was developed towards the end of the 20th century in relation to irregular structures. The difficulty of modeling nature and the inadequacy of the geometry used and accepted as the most accurate (Euclid) in this regard are the biggest factors in this. At this point, fractal geometry offers solution opportunities for dynamic systems in irregular, geometrically structured forms, and complex mathematical planes.

Within the scope of this study, a chronological framework has been drawn regarding the use of fractal geometry in architecture from the past to the present, specifically in the field of fractal geometry. In addition, the focus has been on the research of the areas of use of fractal geometry in parallel with developing technologies and the potential it offers for the future. Many studies show that fractal formations have a clear reflection on architectural products. In this context, it is seen that fractal geometry is intensively studied under the headings of Organic and Biomorph Building Design, Complex and Dynamic Building Design, Interactive and Responsive Design, Sustainable and Energy Efficient Building Design, Aesthetic and Experiential Design. As a result, it is thought that as our understanding of technology and fractal geometry continues to advance, innovative and impressive applications in architecture and urban design will increase.

Keywords: Fractal geometry, architecture, urban design.

1. GİRİŞ

Mimarlığın oluşumu ve gelişimi farklı yaklaşımlar ile açıklanabilir. Bu yaklaşımlar çağımızın kültüründen, gereksinimlerinden, yaşantısından, teknolojisinden çıkan kavramların sonuçlarıdır. Bu kavramlar ise sürekli değişen, dönüşüm halinde olan zaman ile paralellik gösterirler. Bu süreç boyunca insanlar kendilerini doğaya bağlayan, bir şekilde evrenin uzantısı olma anlamında var olan zincirin bir parçası olarak görmüşlerdir. İnsanlar doğadaki oluşumları gözlemleyerek veya taklit ederek ilk inşa tekniklerini geliştirmeye başlamışlardır. Bu nedenle, tarih boyunca mimaride ve tasarımda doğanın taklidi/sentezi üzerinden birçok yapının inşa edildiği gözlemlenmektedir. Gaudi'nin, yapılarındaki farklılıkları ve estetiği yakalamak ve tasarımlara uygun yapısal sistemler inşa etmek için iskelet sistemleri ve kemikleri metafor olarak kullanması, doğanın tasarıma yansımalarının bir örneği olarak verilebilir (Ağırbaş, 2019). Ayrıca, Fariborz Sahba tarafından lotus çiçeğinden esinlenerek tasarlanan Hindistan'daki Lotus Tapınağı (1986) ve Chris Bosse, Rob Leslie-Carter tarafından, hücrelerden ve sabun köpüklerinden ilham alınarak tasarlanan Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi (2008) örnek olarak verilebilir. Geçmişten günümüze, doğa-biyoloji tasarım ilişkisi için biyomorfizm, biyomimetik ve biyomimikri gibi farklı isimler kullanılmaktadır. Janine M. Benyus, "Innovations Inspired by Nature" adlı çalışmasında bu kavram "Biyomimikri" olarak yer almıştır.

Doğadaki sistemleri ve süreçleri taklit ederek insan problemlerine çözümler üreten bir disiplin (Attia, 2021) olan Biyomimikri' nin matematiksel olarak formüle edilmesi, doğadaki karmaşık sistemlerin daha iyi anlaşılmasına ve daha etkili biyomimetik tasarımların oluşturulmasına olanak tanır. Biyomimikriyi matematiksel olarak formüle etmek için kullanılan başlıca yöntemler arasında; Genetik Algoritmalar, Yapay Sinir Ağları ile birlikte Fraktal Geometri yer almaktadır.

Form tabanlı tekrarlama özelliği ile birçok tasarımcıya tasarımlarını geliştirmeleri için ilham veren fraktal geometri bu çalışmadaki başlıca araştırma konusudur. Bu yönüyle çalışmanın amacı, mimarlar ve matematikçiler tarafından araştırılan fraktal kurgunun, geçmişten günümüze mimarlık alanındaki yöntem ve kullanım alanları ile ilgili genel bir çerçevenin oluşturulmasıdır. Çalışma kapsamında, fraktal kurgu özelinde değerlendirilen bazı yapı örnekleri sunulmuştur. Bu literatür incelemesi ile mimarlık alanındaki araştırmacılar için gerek yöntem gerekse kullanım alanlarının anlaşılması noktasında teorik bir temel oluşturulması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda aşağıda ifade edilen araştırma sorularına cevaplar aranmıştır.

- Geçmişten günümüze fraktal geometrinin mimarlık alanında kullanım örnekleri nelerdir?
- Fraktal geometrinin kullanım alanları nelerdir?

Fraktal geometrinin mimarlık alanındaki uygulamalarına dair kuramsal bir çerçevenin araştırılmasına odaklanılan bu çalışma üç bölümde ele alınmıştır. Buna göre çalışmanın ikinci bölümünde fraktal, fraktal geometri kavramları kısaca tanımlanmış, üçüncü bölümde fraktal geometrinin mimari ölçekte ve kentsel ölçekteki araştırma ve uygulamalarına yer verilmiştir.

Tartışma ve sonuç bölümünde fraktal geometrinin mimari tasarımdaki kullanım alanları ortaya konulmuş ve gelecekteki çalışmalar için fraktal geometrinin olası potansiyelleri ifade edilmiştir.

2. KURAMSAL ARKA PLAN

İlk kez Benoit Mandelbrot tarafından kullanılan Fraktal terimi, birçok farklı sınıflardaki nesnelere-objelere kapsayan bir kavramdır. "Fraktal" kelimesi, kırılma veya parçalanma anlamına gelen Latince "frangere" kelimesinden türetilmiştir. Matematikte "fraction" kelimesi, "frangere" nin geçmiş katılımcısı olan Latin fractus'tan türetilmiş olup kesir, bölüntü anlamına gelmektedir. Bir kesir, bir sayıyı diğerine bölerek üretilen bir değer ve daha büyük bir bölüntünün parçasıdır (Mandelbrot, 1983). Fraktal kelimesinin anlamı hem orijinal Latince hem de matematiksel varyasyonundan alınmıştır. Konvansiyonel kullanımda, fraktal kelimesi iki bağlamda kullanılır; ilk kullanımı düzensiz boyutsallık türünü, ikincisi ise sonsuz derin geometrik seti tanımlar (Ostwald & Vaughan, 2016; Palabıyık& Demircan, 2020).

Euclid ile başlayan geometrik araştırmalar, 20. yüzyılın sonlarına doğru Mandelbrot tarafından düzensiz yapılar ile ilgili olarak geliştirilmiştir. Mandelbrot, "Les Objects Fractals" adlı metninde, bilimin doğal nesnelere tanımlamak için kullandığı geleneksel araç olan Öklid geometrisinin temelde bu amacı yerine getiremediğini öne sürmektedir. Bulutları, ağaçları, dağları vb. tanımlama noktasında Euclid geometrisinin yeterli olmadığı; bulutları küre, dağları koni, sahil şeritlerini dikdörtgen olarak betimlemenin mümkün olmadığı görülür ve Mandelbrot yaptığı bu işi geometrisi olmayan şeylerin geometrisini inşa etmek olarak tanımlamaktadır (Mandelbrot, 1983). Bilimde, tarihsel olarak pürüzlülük ve düzensizliğin, sonlu değerlere

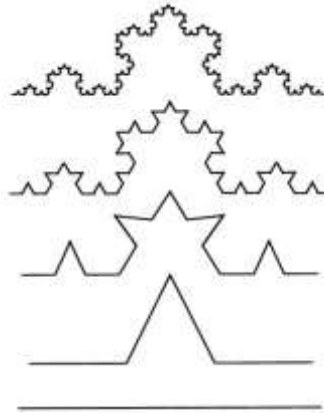
sahip altta yatan sistemleri gizleyen bir sapma olduğu düşünülürken, Mandelbrot bu ikilemi çözmek için, tüm doğal olarak meydana gelen olayların parçalanmasının bu kadar kolay göz ardı edilemeyeceğini ifade etmektedir (Ostwald & Tucker, 2007).

Fraktal geometri, doğadaki karmaşık formları analiz etmek, tanımlamak ve modeller geliştirmek için kullanılan yeni bir yaklaşımdır (Rian Vd., 2018). Bu yeni yaklaşım ile bir ağacı, bir dağı, bir mimarın Euclid geometrisi ile tasarladığı bir yapıyı betimlediği kadar betimleyebilmek mümkün olmaktadır (Patuano & Tara, 2020). Doğa ve fraktal geometri arasındaki ilişki genellikle bir kıyı şeridi uzunluğu örneği (şekil 1) ile ortaya konmaktadır. Bir kıyı şeridini ölçmek için kullanılan birim uzunluğu küçüldükçe, kıyı şeridinin ölçülen uzunluğu küçülür ve daha küçük koylar ölçüme dahil edildikçe uzar (Bovill, 1996).



Şekil 1. İngiltere Kıyılarının Uzunluğunun 200-100-50-25 Mil Düz Çizgisi ile Ölçülmesi (Bovill, 1996).

Fraktal geometri, doğadaki örneklerden yola çıkarak insan eliyle de üretilebilmektedir. Şekil 2’ de yer alan Koch eğrisi buna iyi bir örnek olarak gösterilebilir. Bu eğride her parça, birçok tekrar sonucunda oluşan orijinal kompozisyonlarla değiştirilir. Son tekrarda önemli olan şekle ne kadar yaklaşıldığı değil, her parçanın tüm şekli temsil etmesidir.



Şekil 2. Koch Eğrisi (Bovill, 1996).

Mandelbrot, Euclid geometrisi ile fraktal geometri arasında ayırım yapmak amacıyla mimari tarzları karşılaştırarak tartışmaya sunmuştur. Bu tartışmada “mimarlık bağlamında Mies van der Rohe binası, Euclid için ölçüğe bağlı bir geri dönüş iken, bir Beaux Arts binası fraktal açıdan zengindir” ifadesini kullanmıştır (Mandelbrot, 1982). Bu, mimariyi fraktal geometri ile birleştirme veya bağlama girişiminin açık bir şekilde tanınan ilk örneğidir. Ayrıca fraktal kurgular, mimari formların oluşturulmasında ve analizinde kullanılmaktadırlar.

3. FRAKTAL GEOMETRİNİN MİMARİ VE KENTSEL ÖLÇEKTEKİ UYGULAMALARI

Bu bölümde, tarih boyunca hem mimari hem de kentsel ölçekte fraktal geometrinin mimarideki etkisini inceleyen çalışmalara yer verilmiştir.

3.1. Fraktal Geometrinin Mimari Ölçekte Uygulamaları

Fraktallerin keşfi 20. yüzyıla dayansa da geçmişten günümüze mimari örnekler incelendiğinde fraktal kurgulara rastlanmaktadır. Her zaman doğa, toplum yapısı, sosyal-kültürel yapılar tasarım sürecinde yol gösterici olarak kullanılmış ve bu şekilde, doğada var olan fraktal kurgular mimari tasarımlar üzerinde

etkili olmuştur. Erken fraktal yapı desenleri antik Maya yerleşimlerine kadar izlenebilir. Brown ve diğ. Maya yerleşimlerinin fraktal yapılarını analiz etmiş ve fraktalların hem topluluklar içinde hem de bölgeler arasında çeşitli şekillerde sergilendiğini bulmuştur (Lu vd., 2012). Fraktal mimarinin farklı kültürlerde doğal olarak ortaya çıktığını vurgulamak adına bazı örneklerle yer verilmiştir.

Avrupa'da fraktallar 12. yüzyılın başlarındaki binalarda bulunmuştur. 1104 yılında inşa edilen İtalya'daki Anagni katedralinin zemini, Sierpinski conta fraktalı biçiminde düzinelerce mozaikle süslenmiştir. Fraktallar, ayrıca güç ve dengeyi sağlamak için birçok yüksek yapıda uygulanmıştır. Avrupa'daki örneklerde, mimaride kendini tekrar ederek gelişen detaylarla fraktal etkileri gözlemlenebilir. Gotik, Barok mimaride özellikle katedral ve kiliselerde her ölçekte bu etki hissedilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Avrupa' da Fraktal Geometri Uygulamaları (Sala, 2006)

Asya'da, fraktal yapıya sahip mimariler Humayun Türbesi, Hindistan'daki Şiva Tapınağı ve Laos'taki Kutsal Stupa Pha That Luang'da da bulunmuştur (Lu vd., 2012). Hindistan ve Güneydoğu Asya' daki tapınaklarda fraktal kurguya dayalı strüktürlere rastlandığı ifade edilmektedir (Sala, 2006). Fraktallar Hindu tapınaklarını incelemek için kullanılmış ve bu kurguya Şekil 4' te yer alan, kendisinden daha küçük kulelerin sekiz ya da daha fazla tekrarı ile oluşmuş Hindu Tapınağı örnek olarak verilmiştir.



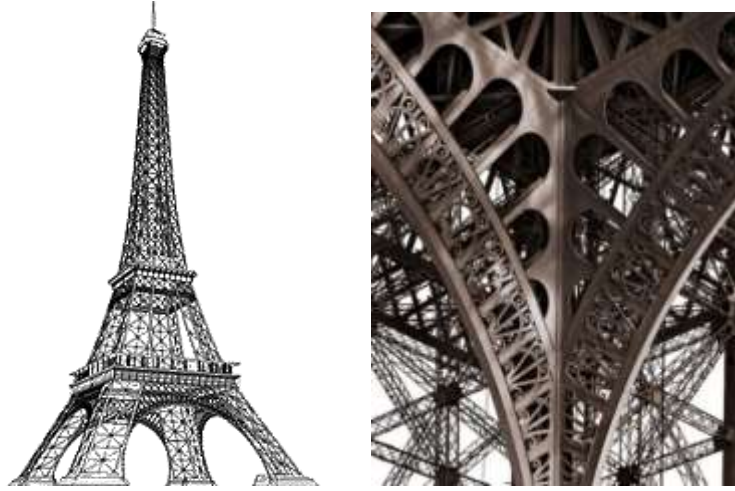
Şekil 4. Hindu Tapınağı (Wikipedia,2024).

Orta Doğu'da fraktal desenler, kubbe iç mekanlarının dekorasyonu için tipik bir Pers sanat formu olan sıva resimleri tasarımında yaygın olarak benimsenmiştir.



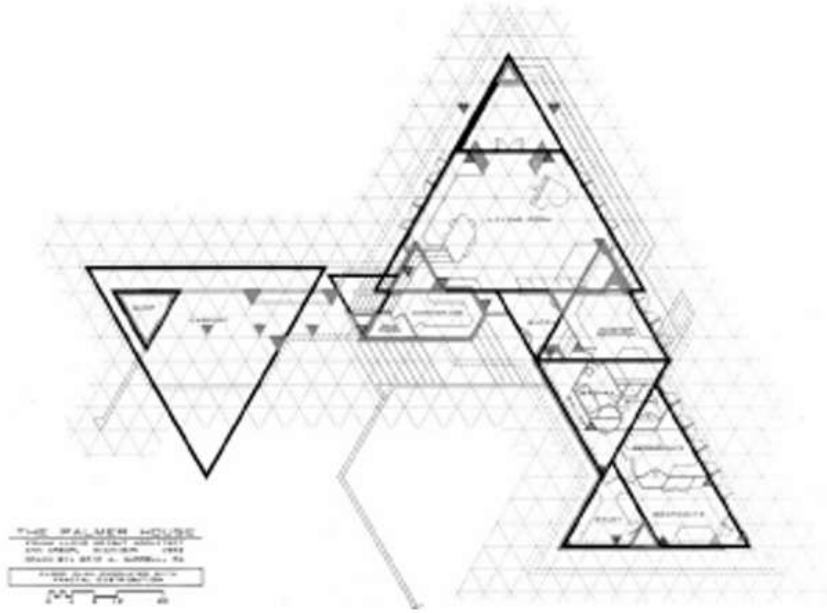
Şekil 5. Kubbe İç Mekanı (Lu vd., 2012).

1889 yılında yapılan Eiffel Kulesi' nin ayrıntılarına bakıldığında fraktal eğrinin kullanıldığı gözlenmektedir. Kule dört adet A şeklinde elemanlardan oluşur ve bu elemanlar masif elemanlar olmadığı halde büyük bir örüntü ortaya çıkmıştır. Şekil 6' da örgü sisteminin detayları ve fraktallerin kendine benzeme özelliği görülmektedir.



Şekil 6. Eiffel Kulesi ve Detayı (Wikipedia, 2020).

20. yüzyılda tasarlanan örneklere bakarsak, 1950 yılında Frank Lloyd Wright tarafından tasarlanan Palmer Evi (Şekil 7) kat planları iki boyutlu bir fraktal kurguya örnek olarak gösterilir. Geometrik bir form olan eşkenar üçgen modül, kat planlarında en az 7 farklı ölçekte tekrarlanır.



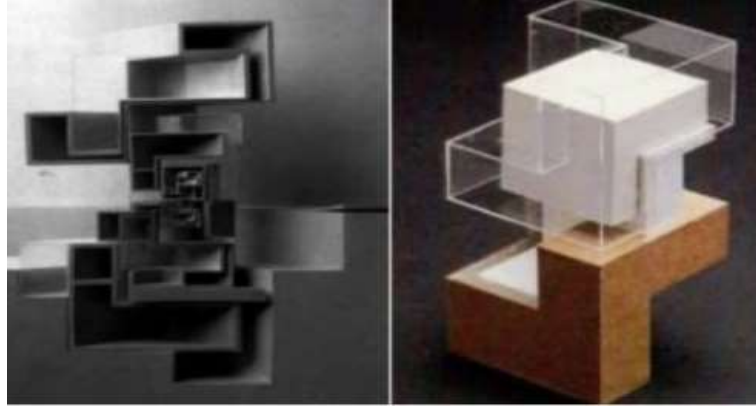
Şekil 7. Wright'ın Palmer Evi'nin Zemin Planı, 1950 (Joye, 2007).

Wright bir diğer binası Marin County'deki (Şekil 8) belediye binasıdır. Bu yapıda, her kemerin üzerine bir öncekinden biraz daha küçük bir pencere veya kemer yerleştirilir. Bu, yapıya beş ölçeğe kadar kendi kendine benzerlik kazandırır.



Şekil 8. Marin County Civic Center, San Francisco, 1962 (Inhabitat, 2024).

Peter Eisenman, House XI (şekil 9) projesinin temeli olarak Mandelbrot'un "Fractals: Form, Probability, and Dimension" kitabından yararlanmışır (Al-Dabbagh & Aldeen Ismail, 2024). Tasarım, yinelemeli ve kendi kendine benzerlik kavramları da dahil olmak üzere fraktal geometrinin prensiplerini içermektedir. "L" harfinin formunu yinelemeli olarak döndürmek ve ölçeklemek, farklı boyutlarda dikey simetriye sahip bir kompozisyon üretmesini sağlamıştır.



Şekil 9. Structure of House XI-a (1978), Peter Eisenman (Al-Dabbagh & Aldeen Ismail, 2024).

Moshe Safdie tarafından tasarlanan konut grubu (Şekil 10) fraktal elemanlardan oluşan bir salkım görüntüsündedir. Fraktal kurgu cephe düzenlerinde de etkili olmuştur. Charles Correa tarafından tasarlanan Kanchanjunga Apartmanı da cephe düzeni özelinde bu kurguya örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 10. Habitat, Moshe Safdie, 1967 (Arkitektuel, 2020), Kanchanjunga Apartments, Charles Correa, 1983 (Archdaily, 2020).

Jean Nouvel' in tasarladığı Arap Enstitüsü (şekil 11) ise arabesk süsleme sanatından yola çıkılarak ve teknoloji kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arabesk süslemelerdeki tekrarları içeren cepheye bakıldığında birbirini tekrar eden örüntülerin ortaya çıktığı görülmektedir.



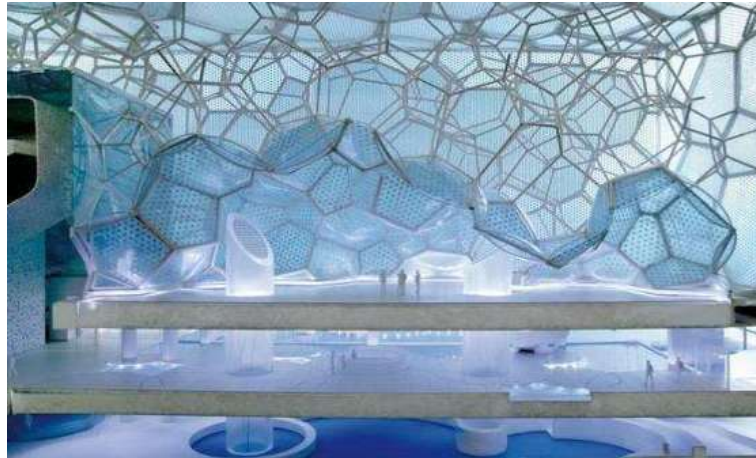
Şekil 11. Arap Enstitüsü, Jean Nouvel, 1987 (Tripsavvy, 2024).

Geç modern mimarinin öncülerinden John Utzon' un tasarladığı Sidney Opera Binası (şekil 12), dalga formundan esinlenerek tasarlanmıştır. Bu dalga formları farklı ölçeklerde bir araya getirilerek fraktal bir kompozisyon oluşturulmuştur.



Şekil 12. Sidney Opera Binası, John Utzon, 1973 (Archdaily. (t.y.).

Teknolojik gelişmelerle birlikte ortaya çıkan hesaplamalı tasarım araçları, mimarlara fraktal desenler de dahil olmak üzere karmaşık geometrik formları keşfetmek için benzersiz yetenekler sunmuştur. Fraktal geometri, doğal öz benzerliği ve karmaşık desenleriyle yenilikçi mimari tasarım için zengin bir ilham kaynağı olmuştur. Doğadan ilham alan örüntüler, formlar ve doğanın bağlamsal taklidi bir mimari projenin tasarım ve geliştirme sürecinde yeni fikirler teorize etmek, analiz etmek ve üretmek için konseptin temel unsuru olarak kullanılmaya devam etmektedir (şekil 13, şekil 14).



Şekil 13. Olimpik kompleks strüktürü (Ali, 2014).



Şekil 14. Stuttgart Havaalanı (Hmidet, 2020).

İsviçreli mimarlar Herzog ve De Meuron, yaygın olarak kuş yuvası olarak anılan Pekin Ulusal Stadyumu'nu (Şekil 15) doğadan ilham alarak tasarlamışlardır.



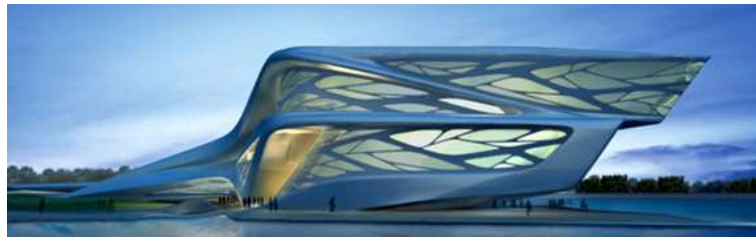
Şekil 15. Kuş yuvası ve Pekin Ulusal Stadyumu (Hmidet, 2020).

İstiridye benzeri hiperbolik paraboloid yapı "Los Manantiales" restoranının tasarlanmasında ilham olmuştur (Şekil 16). Neredeyse aynı geometrik özellikleri uygulayarak ve yük taşıma kapasitesi açısından kemerli beton kabukların faydalarını kullanarak, sadece 15 mm kalınlığa sahip, uzun açıklıklı, kendi kendini destekleyen bir kabuk yapısı elde edilmiştir (Hmidet, 2020).



Şekil 16. İstiridye ve Los Manantiales Restoranı (Hmidet, 2020).

Zaha Hadid'in Abu Dabi Sahne Sanatları Merkezi (Şekil 17), strüktür için tasarlanmış bir estetik yaratmak amacıyla dallanan desenleri kullanmıştır. Burada, birden ikiye ayrılma ve daha kalın, daha ince sonlandırma dallarıyla başlama görülmektedir. Lab Architects'in Foundation Square'i (Şekil 18), strüktür için tasarlanmış bir estetik yaratmak için soyut dallanma desenleri kullandığı görülmektedir (Ancona, 2017).



Şekil 17. Zaha Hadid's Abu Dhabi Performans Sanatları Merkezi (Ancona, 2017).



Şekil 18. Lab Architects' Foundation Square. (Ancona, 2017).

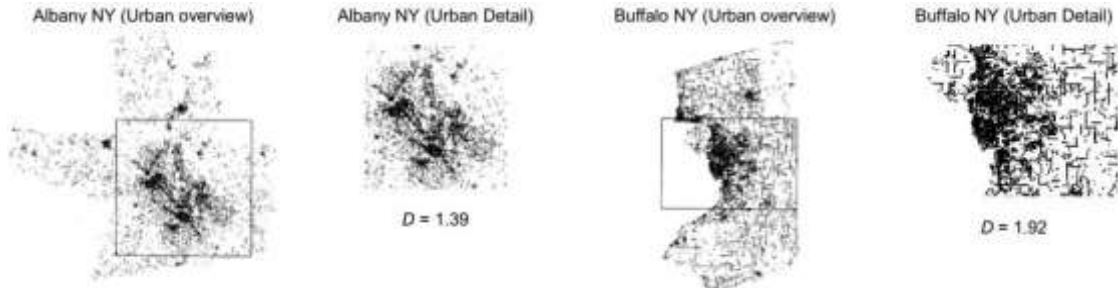
Şekil 19' da yer verilen The Grand Egyptian Museum tasarımı, daha küçük, giderek kırılmış bileşenlerden oluşan birkaç büyük çerçeveden oluşur. Binayı sarmak için, 750 m uzunluğunda ve 46 m yüksekliğinde yarı saydam bir duvar Sierpinski üçgeni kullanılarak kaplanmıştır. Mimar, bu tasarım için piramitlerin şeklinden ilham almış ve modern bir versiyonunu sunmuştur (Al-Dabbagh & Aldeen Ismail, 2024).



Şekil 19. The Grand Egyptian Museum. (Archdaily, 2024).

3.2. Fraktal Geometrinin Kentsel Ölçekte Uygulamaları

Bu bölümde günümüzde kentsel ölçekte fraktal geometrinin kullanımına yer verilmiştir. 1990 yılında Oku, 2003 ve 2005 yıllarında Cooper, bir şehir silüetinin görsel niteliklerinin niceliksel bir ölçüsünü sağlamak için ayrı ayrı fraktal geometriyi kullanmaya çalışmışlardır. 1988' de Yamagishi, Uchida ve Kuga sokak manzaralarında geometrik karmaşıklığı belirlemeye çalışmış ve 1990' da Kakei ve Mizuno tarihi sokak planlarının analizine fraktal geometri uygulamıştır (Ostwald & Tucker, 2007); 1991 yılında Cartwright, daha geniş ölçekte şehir planlamasında fraktal geometri ve karmaşıklık biliminin önemine genel bir bakış sunmuş ve 1994' te Batty ve Longley ve 1996' da Hillier, kentsel ölçekli ortamlarda görsel nitelikleri anlamak için fraktal geometriyi kullanıp daha rafine yöntemler geliştirmiştir. Daha yakın zamanlarda, Batty, şehirlerde gözlenen görsel ve biçimsel karmaşıklık için daha ayrıntılı bir açıklama üretmek adına fraktal geometriyi hesaplamalı özdevinim (computational automata) ile birleştirmiştir. Batty özellikle, farklı şehirlerin büyüme örüntüleri, geometrik dağılımları ve grafik yoğunlukları açısından sıralanmasına veya tanımlanmasına izin veren çeşitli kentsel planların fraktal boyutunu analiz etmiştir (Şekil 20).



Şekil 20. ABD'nin New York eyaletindeki Albany ve Buffalo şehirlerinin fraktal boyutunun (D) karşılaştırmalı analizi. D değerlerinin karşılaştırılması, Buffalo'nun Albany'den sürekli olarak daha yoğun ve karmaşık bir kentsel yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Ostwald & Tucker, 2007).

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tarihsel süreç boyunca görüldüğü üzere, ortaya çıkan fraktal kurgular günümüz mimarlık anlayışını farklı açılardan etkilemektedir. Fraktallerin geçmişten günümüze tasarımdaki yeri, farklı kullanım şekilleri ve mimari formlarda kullanımının mimari ve kentsel ölçek özelinde örneklendirildiği bu çalışmada, mimarlık alanındaki uygulamaların 1980'li yıllardan sonra yoğunlaşarak dünya mimarlığında söz sahibi olan birçok mimar tarafından uygulandığı görülmektedir.

1980'lerde bir tasarım aracı olarak kabul edilen fraktal geometrinin, çalışma kapsamında ele alınan 21. yüzyıldaki örnekleri değerlendirildiğinde;

- Organik ve Biyomorfik Yapı Tasarımı,
- Karmaşık ve Dinamik Yapı Tasarımı,
- Etkileşimli ve Duyarlı Tasarımlar,
- Sürdürülebilir ve Enerji Etkin Yapı Tasarımı,
- Estetik ve Deneysel Tasarım

konuları çerçevesinde etkili olduğu söylenebilir. Hesaplamalı tasarım araç ve tekniklerden yararlanarak yenilikçi ve görsel olarak çarpıcı mimari tasarımlar oluşturmada fraktal geometrinin geniş potansiyellerinin olduğu söylenebilir. Ele alınan örnekler değerlendirildiğinde;

- Fraktal desenlerin, binaların yapısal performansını optimize etmek ve hafif ancak güçlü yapılar oluşturmak için kullanıldığı,
- Fraktal geometrinin, güneş ışığı veya sıcaklık gibi çevresel faktörlere yanıt veren dinamik cepheler oluşturmak için kullanıldığı,
- Fraktal desenler ile, maksimum enerji verimliliği için güneş panellerinin yöneliminin ve tasarımının optimize edilebildiği,
- Fraktal geometri ile, izleyiciyi etkileyen görsel olarak karmaşık ve ilginç yapıların yaratılabildiği,
- Fraktal geometri ile, kentsel planlama ve şehirlerin büyüme örüntülerinin gelişim alternatiflerinin oluşturulabildiği ifade edilebilir.

Böylesi bir çalışma ile ileriye dönük yapılacak çalışmalar; fraktal geometrinin yapı mühendisliği, enerji analizi ve akustik ile birleştirilmesi daha bütünsel ve sürdürülebilir tasarım çözümlerine yol açabileceği, mimari tasarımda fraktal desenleri oluşturmak ve işlemek için daha sofistike hesaplama araçlarının geliştirilerek yaratıcı ifade olanaklarını genişleteceği, fraktal tabanlı tasarımları gerçekleştirmek için yeni malzemelerin ve üretim tekniklerinin kullanımını araştırmak, yenilikçi ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkıda bulunabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- Ağırbaş, A. (2019, June 26–28). *A proposal for the use of fractal geometry algorithmically in tiling design*. Proceedings of CAADFutures, Daejeon, Republic of Korea, 438-453.
- Al-Dabbagh, A.A & Aldeen Ismail, K.J. (2024). Using Fractal Geometry in Studying Architectural and Urban Patterns. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 19(6), 2051-2058. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.190605>
- Ali, M. (2014). *Contemporary Architecture Design through Bionic fractal: An approach of integrated Bionic Fractal geometry*. 1st Architectural Forum on Architecture & Deconstruction (Peer Reviewed Conference Proceeding), DOI:10.5281/zenodo.3359537
- Ancona, A. J. (2017). *Healing Through Bio-Geometries: A Study of Designed Natural Processes* [Master's thesis, University of Cincinnati]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1491303530064519
- Archdaily. (2020). *AD Classics: Kanchanjunga Apartments / Charles Correa*. <https://www.archdaily.com/151844/ad-classics-kanchanjunga-apartments-charles-correa>

- Archdaily. (2020). Sydney Opera House. https://www.archdaily.com/911580/7-rejected-proposals-for-sydney-opera-house?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- Archdaily. (2024). Grand Egyptian Museum. https://www.archdaily.com/1015023/exploring-the-grand-egyptian-museum-through-photography-bridging-past-and-present-in-cairo?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- Arkitektuel. (2020). Habitat 67. <https://www.arkitektuel.com/habitat-67/>
- Attia, D. I. I. (2021). A Sustainable Biomimetic Fractal Design Method to Illuminate the Interior Environment of a Single-Floor Building. *International Journal of Architectonic, Spatial, & Environmental Design*, 15(1).
- Bovill, C. (1996). *Fractal Geometry in Architecture and Design*. Springer Science+Business Media.
- Hmidet, İ. (2020). Bionic Design Architectural Innovations Inspired by Nature with a Focus on Concrete Shell Structures. [Bachelor Thesis, Technical University of Munich TUM]. DOI: 10.13140/RG.2.2.25490.48329
- Inhabitat. (2024). Marin Civic Center. <https://inhabitat.com/frank-lloyd-wright-designed-marin-civic-center-in-san-rafael-turns-50/>
- Joye, Y. (2007). Fractal Architecture Could Be Good for You. *Nexus Network Journal*, 9(2), 311-320.
- Lu, X., Croome, D. C. & Viljanen, M. (2012). Fractal Geometry and Architecture Design: Case Study Review. *Chaotic Modeling and Simulation (CMSIM)*, 2, 311-322.
- Mandelbrot, B.B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company.
- Ostwald, M.J. (2001). "Fractal Architecture": Late Twentieth Century Connections Between Architecture and Fractal Geometry. *Nexus Network Journal*, 3(1), 73-83. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-000-0006-1>
- Ostwald, M.J. & Tucker, C. (2007). Reconsidering Bovill's Method for Determining the Fractal Geometry of Architecture. 41st Annual Conference of the Architectural Science Association ANZAScA 2007 at Deakin University, 182-190.
- Ostwald, M. J. & Vaughan, J. (2016). *The Fractal Dimension of Architecture*. Mathematics and the Built Environment. Springer International Publishing.
- Palabıyık, S. & Demircan, D. (2020). Mimarlıkta Hesaplamalı Tasarım Yöntemlerine Ait Potansiyellerin Yaşam Döngüsü Modeli Üzerinden Değerlendirilmesi. *International Refereed Journal of Architecture and Design*, 21, 91-123. Doi: 10.17365/TMD.2020.21.5
- Patuano, A. & Tara, A. (2020). Fractal Geometry for Landscape Architecture: Review of Methodologies and Interpretations. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 5, 72-80.
- Rian, I.M., Sassone, M. & Asayama, S. (2018). From fractal geometry to architecture: Designing a grid-shell-like structure using the Takagi-Landsberg surface. *Computer-Aided Design*, 98, 40-53. doi.org/10.1016/j.cad.2018.01.004
- Sala, N. (2006). Fractal geometry and architecture: some interesting connections. G. Broadbent & C. A. Brebbia (Eds.), *Eco-architecture: Harmonisation Between Architecture and Nature içinde* (s. 163-173) WIT Press. doi:10.2495/ARC060171
- Tripsavvy. (2024). Institut du Monde Arabe. <https://www.tripsavvy.com/institut-du-monde-arabe-in-paris-1618647>
- Yu, Z., Sohail, A. & Jamil, M. (2023). Hybrid Algorithm for The Classification of Fractal Designs and Images. *Fractals*, 31(10), 2340003_1- 2340003_11. DOI: 10.1142/S0218348X23400030
- Wikipedia. (2020). Eiffel Kulesi. https://en.wikipedia.org/wiki/Eiffel_Tower.
- Wikipedia. (2024). Kandariya Mahadeo Tapınağı. https://tr.wikipedia.org/wiki/Hindu_tap%C4%B1na%C4%9F%C4%B1#/media/Dosya:Khajuraho_-_Kandariya_Mahadeo_Temple.jpg