

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNA KABUĞUNUNUN BİÇİMLENMESİNDE
DOĞAL SÜREÇLERE DAYALI ÜRETKEN YAKLAŞIMLAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Behiç Can ALDEMİR

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİNA KABUĞUNUNUN BİÇİMLENMESİNDE
DOĞAL SÜREÇLERE DAYALI ÜRETKEN YAKLAŞIMLAR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Behiç Can ALDEMİR
(523111002)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER

Teslim Tarihi: 16 Aralık 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 523111002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Behiç Can ALDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BİNA KABUĞUNUNUN BİÇİMLENMESİNDE DOĞAL SÜREÇLERE DAYALI ÜRETKEN YAKLAŞIMLAR**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Yüksel DEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Birgül ÇOLAKOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**

Savunma Tarihi : **07 Şubat 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yaparken bana her türlü desteği gösteren aileme, dostlarıma ve öğretmenlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2013

Behiç Can Aldemir
(Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Araştırmanın Yöntemi	2
2. DOĞAL ÖRGÜTLENMELER VE MİMARİ TASARIM.....	5
2.1 Biyomimikri.....	6
2.1.1 Biyomimikri ve mimarlık	11
2.2 Fraktaller.....	16
2.2.1 Fraktaller ve mimari tasarım	20
3. LİNDENMAYER SİSTEMLERİ VE TEMSİL YÖNTEMLERİ.....	25
3.1 Yeniden Yazma Sistemleri	26
3.2 DOL-Sistemleri	28
3.3 Dizgilerin Kaplumbağa Grafikleri ile Yorumlanması.....	31
3.3.1 İki boyutlu yorumlanma.....	31
3.3.2 Üç boyutlu yorumlanma	34
3.4 Dallanan Yapılar	37
3.4.1 Parantezli OL-sistemleri	37
3.5 Olasılıksal (stokastik) L-sistemleri.....	41
3.6 Bağlama Duyarlı L-sistemleri	43
3.7 Lindenmayer Sistemleri'nin Form Tasarımında Kullanımı	45
4. ÜRETKEN SİSTEMLERLE CEPHE TASARIMI YAKLAŞIMLARI.....	61
4.1 Üretken Sistemlerden Yararlanan Tasarımlar	61
5. BİNA KABUĞU TASARIM SÜRECİNDE KULLANILABİLECEK ÜRETKEN MODEL YAKLAŞIMLARI.....	87
5.1 Üretken Sistem Önerisi.....	87
5.2 Lindenmayer Sistemlerinden Üretken Sistem Olarak Yararlanılması	88
5.3 İzdüşüme Dayalı Yaklaşım.....	91
5.3.1 Kurallar	91
5.3.2 Değişkenler	92
5.3.3 Türetilen parametrik varyasyonlar	92
5.3.3.1 İki boyutlu L-sistemi.....	92
5.3.3.2 Üç boyutlu L-sistemi	93
5.4 Metaball Yaklaşımı	95
5.4.1 Kurallar	98
5.4.2 Değişkenler	98

5.4.3 Türetilen parametrik varyasyonlar	99
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	113

KISALTMALAR

CAD : Computer Automated Design
CAM : Computer Automated Manufacturing
L-sistemleri : Lindenmayer sistemleri

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Biyomimikri için bir uygulama çerçevesi	15
Çizelge 2.2 : İngiltere'nin kıyı şeridi ölçümü.....	18
Çizelge 5.1 : Geliştirilen modelde kullanılan kaplumbağa komutları.....	90

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Leonardo da Vinci'nin tasarladığı mekânîk kanadı gösteren kendine ait el yazması.	8
Şekil 2.2 : Dulavrat otu tohumu.	9
Şekil 2.3 : Velcro'nun elektron mikroskobuyla çekilmiş fotoğrafı.	9
Şekil 2.4 : Mercedes'in biyonik otomobili ile kutu balığı arasındaki benzerlik ve köpekbalığı derisinin elektron mikroskobu altındaki görünümü.	10
Şekil 2.5 : Tasarım ile organizma arasındaki biyomimikri.	11
Şekil 2.6 : Frank Lloyd Wright'ın tasarladığı Şelale Evi.	12
Şekil 2.7 : Romaneco brokolisi.	17
Şekil 2.8 : Mandelbrot dizisinin kademeli olarak gösterimi.	19
Şekil 2.9 : Ba-ila yerleşiminin fraktal kurgusu.	23
Şekil 2.10 : Mimar Jean Nouvel'in Paris'teki Institut du Monde Arabe'nin fraktallere dayalı cephe kurgusu.	23
Şekil 2.11 : Fraktallere özgü kendine benzeme özelliği gösteren RMIT Storey Hall binasının cephesi.	23
Şekil 3.1 : Aşamalı olarak Koch Eğrisi'nin üretimi.	26
Şekil 3.2 : Aşamalı olarak Koch Kar Tanesi Eğrisi'nin üretimi.	27
Şekil 3.3 : DOL-sisteminde üretim.	29
Şekil 3.4 : Kaplumbağanın hareket şeması.	33
Şekil 3.5 : Koch Adası Eğrisi'nin özyineleme sayısı $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4$ olacak şeklide gösterimi.	33
Şekil 3.6 : Farklı belitlere, kurallara ve özyineleme sayılarına sahip L-sistem gösterimleri.	32
Şekil 3.7 : Kaplumbağa grafiklerinin çizgi bırakmama özelliğinin kullanıldığı bir L-sistem gösterimi.	34
Şekil 3.8 : Kaplumbağanın üç boyutta kontrol edilişi.	35
Şekil 3.9 : Hilbert Kübü.	36
Şekil 3.10 : Parantezli L-sisteminin $n = 4$ ve $\delta = 22^\circ$ değerlerine göre üretimi.	39
Şekil 3.11 : Üç boyutlu çalı benzeri yapı.	40
Şekil 3.12 : Olasılıksal dallanan yapılar.	43
Şekil 3.13 : Yüzeyle uygulanan haritalama yöntemi.	46
Şekil 3.14 : Tekil objelere uygulanan haritalama yöntemi.	47
Şekil 3.15 : Tekil objelere uygulanan haritalama yöntemi.	48
Şekil 3.16 : Form türetme yöntemi uygulanan haritalama yöntemi.	49
Şekil 3.17 : Olasılıksal kaplumbağa grafikleriyle üretilen form.	50
Şekil 3.18 : Nedenselci kaplumbağa grafikleriyle üretilen form.	51
Şekil 3.19 : Nedenselci kaplumbağa grafikleriyle üretilen form.	52
Şekil 3.20 : Kaplumbağa grafikleriyle modüler geometri üretimi.	53
Şekil 3.21 : Boşluk dolduran eğri, 4. özyineleme.	54
Şekil 3.22 : Yörünge hafızalı eğri, 6. özyineleme.	54
Şekil 3.23 : Küp modül ve kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi.	55

Şekil 3.24 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi.	55
Şekil 3.25 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi.	56
Şekil 3.26 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sisteminin özyineleme sayısına bağlı gelişimi.	57
Şekil 3.27 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sisteminin özyineleme sayısına bağlı gelişimi.	58
Şekil 3.28 : Çevresel etkileşime sahip kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş L-sistemleri.	59
Şekil 3.29 : Çevresel etkileşime sahip kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş L-sistemleri.	59
Şekil 4.1 : Tod's binasının dallanan yapıdaki cephesinden görünüm	61
Şekil 4.2 : Tod's binasının caddeye bakan cephesinden bir görünüm.	62
Şekil 4.3 : Tod's binasının cephe strüktür kurgusunun oluşturulması	63
Şekil 4.4 : Cephe strüktürünün üç boyutlu olarak oluşturulması.	63
Şekil 4.5 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun cephe görünümü	64
Şekil 4.6 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun içinden görünüm.	64
Şekil 4.7 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun strüktür kurgusunun oluşturulması	65
Şekil 4.8 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun strüktür kurgusunun uygulanması	66
Şekil 4.9 : Mikimoto Ginza 2 binasının cephe görünüşü	67
Şekil 4.10 : Mikimoto Ginza 2 binasının cephe ile döşeme ilişkisi.	68
Şekil 4.11 : Bina duvarlar modüllerinin üretim detayı.	69
Şekil 4.12 : Fraktal kurguya dayalı cephe boşluklarının oluşumu.	70
Şekil 4.13 : Yeni Çek Ulusal Kütüphanesi önerisi	71
Şekil 4.14 : Üretken sistemle strüktür kurgusunun uygulanması	72
Şekil 4.15 : Üretken sistemle oluşturulan strüktür kurgusu	73
Şekil 4.16 : Water Cube'un cephe kurgusunun sokaktan görünüşü	74
Şekil 4.17 : Weaire-Phelan köpüğünün geometrik temsili.	75
Şekil 4.18 : Sabun köpüğü ile strüktürel kurgu ilişkisinin anlatımı.	76
Şekil 4.19 : Weaire-Phelan köpük sisteminden Water Cube'un dış cidarının oluşturulması.	77
Şekil 4.20 : Çelik tüplerle oluşturulan strüktür kurgusu	77
Şekil 4.21 : Water Cube'un iç mekânından alınmış bir görsel	78
Şekil 4.22 : Bird's Nest'in cephe strüktürü kurgusu	79
Şekil 4.23 : Birincil geometriyi oluşturan uzay kafesler	80
Şekil 4.24 : Kabuk ile tribün yapılarının ayrı işleyen inşaat süreci	80
Şekil 4.25 : Kabuk örgüsünün genetik algoritmalarla eniyilemesi	81
Şekil 4.26 : Cepheyi saran kutu profillerin geometri oluşumu	82
Şekil 4.27 : Federasyon Meydanı'ndaki fraktal kurguya sahip bina cephesi.	83
Şekil 4.28 : Federasyon Meydanı'ndaki binası cephesi detayı	84
Şekil 4.29 : 1:2: $\sqrt{5}$ oranındaki üçgenlerin birleşim şeması	84
Şekil 4.30 : Kuzey Atriyum Binası	85
Şekil 4.31 : 1:2: $\sqrt{5}$ oranındaki üçgenlerin birleşim şeması	86
Şekil 5.1 : Rhinoceros ve Grasshopper yazılımlarının arayüzleri	89
Şekil 5.2 : Houdini yazılımının arayüzü.	89
Şekil 5.3 : Algoritma akış tablosu.	91
Şekil 5.4 : İki boyutlu L-sistemiyle türetilmiş cephe tasarımları	93

Şekil 5.5 : Üç boyutlu L-sistemiyle türetilmiş cephe tasarımları.....	94
Şekil 5.6 : Metaball'ların birleşimi	95
Şekil 5.7 : Algoritma akış tablosu	96
Şekil 5.8 : L-sistem ve kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş geometri.....	96
Şekil 5.9 : Metaball'lar ile oluşturulmuş iskelet.....	97
Şekil 5.10 : Oluşturulan cephe tasarımı.....	97
Şekil 5.11 : Özyineleme sayısına bağlı değişim.....	99
Şekil 5.12 : Metaball hacim değişkenine bağlı değişim	100
Şekil 5.13 : Sınırlayıcı kutunun büyüklüğüne bağlı değişim.....	101
Şekil 5.14 : Farklı değişkenlerin aynı anda uygulanmasıyla oluşturulan tasarımlar	101

BİNA KABUĞUNUNUN BİÇİMLENMESİNDE DOĞAL SÜREÇLERE DAYALI ÜRETKEN YAKLAŞIMLAR

ÖZET

İnsanlık, tarih boyunca deneyimlediği sorunları çözebilmek için doğayı yol gösterici olarak görmüştür. Doğaya olan öykünme, ilk kalıcı mimari eserleri veren uygarlıklar tarafından mimariye aktarılmış ve binlerce yıl sonra bile kullanılmaya, tekrar edilmeye devam etmiştir. Geçen yüzlerce yıl içerisinde mimarların tasarım anlayışları ve teknolojik imkanlar değişse de, en büyük değişim içinde bulunduğumuz dönemde gerçekleşmektedir. Bunun nedeni bilgisayarların işlem güçlerine dayanan dijital devrimdir. Bilgisayarların etkin biçimde rol aldığı günümüz tasarım dünyasında tasarımcı, dijital tasarım yöntemlerine hakim olarak tasarımını geliştirebilmektedir. Üretken sistemler tasarımcıya keşfedebileceği yeni alanların kapısını aralarken, tasarımcı bu alanlara hakim olabilmek için sistemleri düzenleyip geliştirme görevini de üstlenmektedir.

Bu tez kapsamında ilk olarak biyomimikri kavramı üzerinde durularak insan-doğa etkileşimi içerisindeki tasarım yaklaşımları incelenmiştir. Doğadan esinlenen tasarımların benzerlik aşamalarına ayrılarak doğadan öğrenmenin yolları irdelenmiştir. Doğadaki canlı ve cansız yapıların gelişimlerinin incelenmesiyle, gelişim süreçlerinde fraktal kurguların yer aldığı tarih boyunca gözlemlenmiştir. Doğanın biçimlerin geometrilerini oluşturma matematiği olan fraktaller, doğal gelişim aşamalarını ve kendine benzeme özelliğini taşımaktadır. Bu fraktal kurgular, Lindenmayer sistemleri gibi yeniden yazma sistemleri ile üretken sistemlere dönüştürülüp, tasarımda kullanılabilir. Burada ortaya çıkarılan yeni tasarım, kendine-benzeme özelliğini barındırmaktadır. Böylece doğada var olan parça ile bütün ilişkisinin, insan yapılarında da uygulanabileceği düşünülmektedir.

Sonraki bölümde doğal süreçleri taklit etmede başarılı olan Lindenmayer sistemleri ve gramerleri incelenmiştir. Lindenmayer sistemleri mimari tasarımda kullanılma yöntemlerine göre sınıflandırılarak oluşturulmak istenen model için örnekler verilmiştir.

Daha sonraki bölümde doğal süreçlere dayalı üretken sistemlerle üretilmiş cephe tasarımlarına yer verilmiş, mimarların tasarıma yaklaşımları ve üretken algoritmaları kullanım biçimleri, gelişim ve üretim süreçleri de incelenmiştir.

En son bölümde oluşturulan model yaklaşımı için seçilen üretken sistem olan Lindenmayer sistemleri değişkenleri ortaya konulmuştur. Geliştirilen modellerin algoritma akış şemaları üzerinden tasarım süreci irdelenmiştir. Modeller parametrik bileşenlerden oluştuğu için, farklı parametrelerin kullanıldığı örnekler karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde geliştirilen model ve kullanıcı deneyimi irdelenmiş, modellerin başarılı ve zayıf yönleri ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

GENERATIVE APPROACHES TO BUILDING SHELL FORMATION BASED ON NATURAL PROCESSES

SUMMARY

In order to solve the problems experienced throughout the history of mankind the nature has always been seen as a guide. Mutation of nature, which, by the first permanent architectural monuments of civilization has been transferred to the architectural canon to be used even after thousands of years, has continued to be repeated. In the past hundreds of years technological capabilities and design approaches of architects have been drastically changed, but yet the biggest change is about to be realized in the current period.

In the beginning computers were nothing more than a visualisation tool, making them a digitalised drafting aid system. The reason behind the change is the digital revolution, which has been powered by the processing power of the computers and decision making systems of the artificial intelligence, providing a framework for humans and computers to be design partners. Generative systems that designers can explore, open a door to the unexplored areas of design, making designer of the system explore and interact with this emerging field. With this emerging design method, designer have control over the end product (architectural design) by controlling and manipulating the generative system.

In this thesis, generative approaches to building shell formation based on natural processes are explored. Aim is to create a generative system model that responds to designer needs while utilising coherent variables. Design variations created by the proposed generative system offer conceptual products that may guide the architect for fully integrated design.

Firstly the design approaches with emphasis on the concept of biomimicry have been investigated. Nature inspired designs were examined within the ways to learn from nature. Biomimicry approaches to architectural design on different levels are discussed.

By examining the development of animate and inanimate structures in nature, fractal structures have been observed throughout history. Nature's way of creating geometry is carried on with fractal mathematics, resulting natural developmental stages that bear self-similarity attributes. This fractal geometries can be created by using Lindenmayer systems that operated by character rewriting. Later this geometry can be integrated with a generative system and can be used in architectural design. Newly created geometry is going to have the fractal geometry attributes such as self similarity. Thus, the relationship between parts and whole observed in the natural forms, can also be observed in this newly created design.

In the following section Lindenmayer systems, which are very successful at imitating natural processes of plant growth are explored as a generative system. Lindenmayer systems are string rewriting mechanisms and consist of different kinds of grammars that have dramatic effects on the end product of the generative system. These strings

are based on characters and there are different variables such as, axiom, production rules, iteration number that cause change on end production. Different grammars are applied through the use of production rules.

Lindenmayer systems are visualised via turtle graphics. This visualisation can be two or three dimensional based on the characters used in production rules. Grammars which are relevant to desired generative model are explained with visual examples in order to understand the way of working of the character based strings. Later Lindenmayer systems are classified according to the ways they are used in architectural design to demonstrate how one can utilize from their generative aspects to achieve the desired generative model. To demonstrate the usage of Lindenmayer system in architecture, Michael Hansmeyer's work is explored and the effect of the different variables and production rules are examined.

The next chapter is based on generative systems produced by mimicing natural processes that introduced to the building design, especially determining the facade/shell design. Key examples examined here are Toyo Ito's Tod's Building, Serpentine Gallery (cooperation with ARUP), Mikimoto Ginza 2 Building, PTW Architect's Water Cube, Herzog & de Meuron's Bird's Nest, OCEAN North's Czech National Library and the Lab Architecture Studio's Federation building. Here different examples with different generative design approaches to the specific design problems are investigated. Development and manufacturing processes are also examined. Programs used in the design systems are investigated in relation with the architectural design. Among the examples, Toyo Ito's approach to the building shell formation design is utilised as a framework for constructing the proposed generative system.

In the last section, the generative models which are based on Lindenmayer systems are introduced. There are two different generative model approaches towards building shell formation. The developed models are explained with the help of algorithm diagrams, which make the variables and constants easier to understand and to show how they are related.

The first model is utilising from two and three dimensional visualisations of Lindenmayer systems. Created geometry is projected on the building envelope, resulting with the formation of the building shell structure. Therefore this model is called projection approach. This geometries are tweaked via variables like angle increment, iteration number, axiom and production rules of the Lindenmayer system and the tickness value of the turtle graphics.

In two dimensional model, it's common to get fractal like geometries and symmetry. However, in three dimensional model it's common to get tree like branching shapes without a sense of symmetry on the building shell. The model developed through the design process flow diagram of the algorithm were discussed. Since parametric model consists of components, the samples were tested with different parameters.

This generative model is created by using Rhinoceros software as a medium. Generative algorithm is created by using Rhinoceros plug-in called Grasshopper. Lindenmayer system and turtle graphics are created with help of a Grasshopper plug-in called Rabbit.

The second model is utilising from three dimensional visualisation of Lindenmayer systems. From the grammars of the L-systems the bracketed DOL- system is used. Because of the usage of the metaball component this method is named as metaball

approach. Three dimensional turtle geometry with metaballs are used to create inner geometry, resulting coral-like forms. This geometry is placed in the center point of the building area. Branches that created with the coral-like geometry goes through the building shell, creating the openings desired for the natural illumination. In this step boolean operations are used to solve the intersection problems between the inner geometry and the building shell. Resulting geometries are tweaked via variables like angle increment, iteration number, axiom and production rules of the Lindenmayer system and the tickness value of the turtle graphics geometry. In addition to that there are variables controlling metaball growth and the length limitation of the shell piercing branches.

All these variables are controlling the geometries and the size of the opaque and transparent parts of the building shell structure. Since parametric model consists of different components, the samples were tested with different parameters.

This generative model is created by using Houdini software. Generative algorithm is created by using component network interface of Houdini. Lindenmayer system and turtle graphics are created with Lindenmayer system component in Houdini.

In the last part the generative models developed in the previous part of the study and the designer experiences with the generative system have been analyzed. Successful and weak points of the models are discussed.

In the projection approach, resulting shell design needed to be tweaked with its variables to get a logical and integrated structural design. Two dimensional Lindenmayer system tend to create more symmetric and fractal like self-similar forms. On the other hand, Three dimensional Lindenmayer system creates more arbitrary geometries, resulting with a and product that needs to be corrected without using an algorithm. At this point an algorithm that optimizes the end product can be added in future research. Lastly recommendations for future work are given in detail.

In the metaball approach, resulting shell design mostly results with a structurally integrated and logical design. If there is a doubt about the structural integrity, there are variables that can be manipulated in order the achieve satisfactory solution. The most interesting outcome of this approach that promises a design problem that may lead a future research about this subject is the sun louvres that are formed by the extensions of the central coral-like geometry in the center of the building. Since this geometry is created by Lindenmayer systems, this may require a Lindenmayer system that has production rules that imitates phyllotaxis of the plants which is guided by the sun direction.

In future work these models can be integrated and can be rearranged to form one body of algorithm. Also the architectural detailing of the building shell structure design can be embeded to this algorithm. Certain conditions that caused by the shape of the building shell, for example sharp edges and openings, can recall pre-designed details to the specific area and apply them. Also Lindenmayer systems can be merged with genetic algorithms which can be used to produce not a single, but a set of productions that have the desired qualities for the building shell. With this system the designer is free to choose among the created variations which s/he prefers.

1. GİRİŞ

İnsanlık tarih boyunca karşılaştığı zorlukları atlatmak için doğanın çözüm yöntemlerini incelemiş ve günlük karşılaştığı sorunlarından daha temel sorunlarına kadar hep doğayı yol gösterici olarak görmüştür. İnsanlararası ilk örgütlenme denemeleri olarak görülen inançsal sistemler, doğaya ait figürlerle betimlenmişlerdir. Doğaya olan öykünme, ilk kalıcı mimari eserleri veren uygarlıklar tarafından mimariye aktarılmış ve geliştirdikleri doğadan ilham alan kanonik yapılar ve süslemeler binlerce yıl sonra bile kullanılmaya, tekrar edilmeye devam etmiştir. Bu da yerleşmiş bir mimarlık geleneğinin oluşmasına neden olmuştur. Geçen yüzlerce yıl içerisinde mimarların tasarım anlayışları ve teknolojik imkanlar değişse de, en büyük değişim içinde bulunduğumuz dönemde gerçekleşmiştir. Bunun nedeni bilgisayarların işlem güçlerine dayanan dijital devrim nedeniyle oluşan sınırsız bilgi ağlarıyla daha önce hiç olmadığı kadar bütünleşen ve aynı zamanda da aynılaşan bir dünyadır.

Günümüzde mimarlık kavramı değişmektedir. Dijital tasarım ürünleri günümüzde popüler olsalar dahi, dijital tasarım yöntembiliminin çok katmanlılığı nedeniyle, onu gerçek anlamda kontrol edebilecek olan özel tasarımcılara ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Mimarlar açısından bakıldığında, dijital tasarım ürünlerinin algılanışında, geleneksel yöntemlerle yapılmış olan mimari eserlere nazaran bulanıklık söz konusudur. Çünkü dijital tasarım yöntembiliminde geleneksel yöntemlerin tekrar okunup yorumlanmasından faydalanan süreçler önem kazanmaktadır.

Bu nedenle tasarım yaklaşımı olarak doğadan sadece biçimsel olarak yararlanmak yerine, onun gelişim ve değişim süreçlerinin tasarıma eklenmesi önem kazanmaktadır. Bu süreçlere dayanan üretken sistem hesaplama gücü sayesinde tasarımcıya tasarım sürecinde yardımcı olmaktadır.

Doğadaki canlı ve cansız yapıların gelişimlerinin incelenmesiyle, gelişim süreçlerinde fraktal kurguların yer aldığı tarih boyunca gözlemlenmiştir. Bu fraktal kurgular, Lindenmayer sistemleri gibi yeniden yazma sistemleri ile üretken

sistemlere dönüştürölüp tasarımda kullanılabilir. Burada ortaya çıkarılan yeni tasarım, kendine-benzeme özelliğini barındırmaktadır. Böylece doğada var olan parça ile bütün ilişkisinin, insan yapılarında da uygulanabileceği düşünölmektedir.

1.1 Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, üretken sistem olarak doğal süreçlerden yararlanan bina kabuğu biçimlendirme modeli oluşturmak amaçlanmıştır. Dallenma, kendine benzeme gibi doğal süreçlerden beslenen sistemin üretken algoritması L-sistemler ile oluşturulup eklenen biçim türetme modülleriyle kavramsal tasarıma dönüştürölmesi amaçlanmıştır. Bu süreçlerin kullanımıyla tasarım yapılan değişken değişikliklerine bütüncül olarak yanıt verecektir. Doğada görölen biçimlerin oluşum yöntemlerini mimari tasarımla birleştirerek bitkilerle organizma seviyesinde yapısal açıdan biyomimikri sağlamak amaçlanmıştır.

1.2 Araştırmanın Yöntemi

Bina kabuğu biçimlenmesinde doğal süreçleri taklit eden bir dizgi yeniden yazma sistemi olan Lindenmayer sistemlerine dayanan üreken sistem modelinin incelendiği bu çalışmanın giriş bölümünde biyomimikri olgusu incelenerek biyomimikrinin tasarım yaklaşımı açısından insan-doğa etkileşimi irdelenecektir. Doğada sıkça görölen ve geometrik yapıları Öklidyen yaklaşımla açıklanamayan biçim ve organizmaların matematiksel tanımlaması olan fraktaller, ürettikleri çevre koşullarından etkilenmeyen, sadece matematiğin belirlediği geometrileri ve L-sistemlerde karşılaşılan kendine-benzeme ve özyineleme gibi olguları açıklamaları nedeniyle incelenecektir.

İkinci bölümde Lindenmayer sistemleri ve gramerleri detaylı bir şekilde incelenerek oluşturulması düşünölen üretken model için uygun olacak gramer aranmıştır. Bunun yanında L-sistemlerin görselleştirilmelerini sağlayan kaplumbağa grafikleri incelenerek, kullandıkları semboller ve komutları incelenecektir. Lindenmayer sistemlerini biçim türetmede kullanan örnekler detaylı bir şekilde incelenerek, oluşturulacak model için uygun olabilecek yaklaşımlar incelenecektir.

Üçüncü bölümde üretken sistemlerden ve algoritmalarından yararlanılarak tasarlanmış yapılar incelenecektir. Farklı yaklaşımlarla çözülen sorunlar ve bunların doğal süreçlerle olan ilişkileri irdelenecektir.

Çalışmanın son bölümünde önceki bölümlerde görülen yaklaşımları kullanan model ile bina cephelerini saran, bütüncül bir algoritmaya dayanan iki kabuk modeli oluşturulacaktır. L-sistemlerin üretken bir sistem olarak kullanıldığı tasarım süreci, elde edilen harf dizgilerinden yola çıkarak CAD yazılımları tarafından biçim üretilecek bir süreçtir. Tasarımcı son üründen memnun kalmadığında, ya da gelişimi izlerken daha son ürüne varmadan isteği dışındaki bir doğrultuda ilerleyen tasarımı durdurarak tasarım sürecine yeniden başlayabilir. Böylece değişik gramerleri, kuralları ve özyineleme sayılarını (iterasyon sayısı) denemek suretiyle çok sayıda olasılığı gözden geçirmiş olur.

İki farklı modeli oluşturmak için modellerin kullandıkları geometri biçimini en kısa sürede işleyebilen yazılımlar tercih edilmiştir. Bu nedenle izdüşüm yönteminin kullanıldığı model için Rhinoceros yazılımının Grasshopper eklentisi kullanılmıştır. Kullanılan L-sistem Rabbit eklentisi ile Grasshopper'da kurgulanmıştır. Metaball yöntemi olarak adlandırılan ikinci yaklaşımda ise, metaball geometrisini tasarımda kullanılabilir kadar hızlı işleyebilen Houdini yazılımından yararlanılmıştır.

2. DOĞAL ÖRGÜTLENMELER VE MİMARİ TASARIM

Tarih boyunca mimarlar yapıları ve onların süslemelerini tasarlarlarken ilham almak için doğayı gözlemlemişlerdir. Girdiğimiz ekolojik çağda insanın doğaya olan yaklaşımı değişmektedir. Doğayı inceleme süreci, estetik açıdan ondan ilham almak yerine, günümüzde yaşadığımız sorunlara 3.8 milyar yıl süren araştırma ve geliştirme dönemi geçirerek sorunlara en uygun çözümleri üretmiş olan bir sistemi inceleyerek sorunlarımıza çözüm aramaya dönüşmüştür (Pawlyn, 2011).

D'Arcy Thompson 1917'de yazdığı "On Growth and Form" adlı kitabında bitkilerin ve hayvanların biçimlerinin saf matematik terimleriyle ortaya konulabileceğini göstermiştir. Kitap doğal geometrilerin keşfi, gelişim dinamikleri ve fiziksel süreçleri anlatmaktadır. Organizmaların boyutlarını ve gelişimlerini belirleyen kanunları ve hücrelerin ve dokuların işleyişlerindeki gerilim altındaki zarlar, simetritler, hücre bölünmeleri gibi olgulardan oluşan statik ve dinamik düzenleri ortaya koyarken, basit organizmaların jeodezik yapılarının arkasında yatan mühendisliği de matematiksel terimlerle ifade etmiştir. Thompson'a göre, biçim başlangıçta verilen bir şey değildir. Bunun yerine biçim, dinamik kuvvetlerin enerji akımlarıyla ve gelişim aşamalarıyla oluşan bir olgudur. Thompson'a göre doğa, bu kuvvetleri ve diğer etkenleri kendi dinamik döngüleri içerisinde barındıran, sonsuz benzer biçimler ve sonsuz varyasyonları olan benzer türler üreten devasa bir tasarımcıdır (Beesley ve Bonnemaison, 2008).

Çağımız, endüstri devrimi öncesinde doğa ile insan arasında olan dengenin kontrolsüz bir biçimde bozulduğu bir dönem olarak görülmeye başlanmıştır. Fosil yakıtların gezegendeki bolluğu ve onlara ulaşımın kolaylığı nedeniyle tarihte eşi benzeri görülmemiş bir verimsizlik dönemine girilirken az kaynakla çok iş becerme yaklaşımı önemini kaybetmiştir. Tasarım ve üretim yöntemlerini doğadan alınan derslerle besleyen yerel yaklaşımlar da bu nedenle terkedilmiş ve insanlığın kolektif hafızasından çıkmıştır. Bugün yüzleştığımız sorunların (enerji üretimi, temiz su bulma veya akıllı malzemeler üretme gibi) neredeyse hepsinin çözümünü içinde barındıran örnekler doğada saklı olup, araştırılıp bulunmayı beklemektedirler.

Doğaya karşı duyulan hayranlık insanın varoluşu kadar eskiyken, bilimle elde edilen bilginin sunduğu avantajlarla, eskiye göre daha iyi araçlarla ve tarihsel dogmalardan kurtulmuş bir estetik duyarlılıkla biyolojiden öğrenme fikrini tekrar keşfetme imkanına sahibiz (Pawlyn, 2011).

2.1 Biyomimikri

Biyomimikri kavramı bilim literatürüne ilk olarak 1962'de girmiştir ve 1980'lerde malzeme bilimciler arasında kullanımı artmıştır. Bazı bilim insanları biyomimetik veya biyonik kavramlarını kullanmayı tercih etmişlerdir. Biyomimetik profesörü Julian Vincent kavramı, "doğanın iyi tasarımının soyutlaması" olarak açıklarken, Janine Benyus, "doğanın dehasına bilinçli öykünme" olarak açıklamaktadır. Biyomimetik ve biyomimikri kavramları arasındaki en belirgin fark, biyomimikrinin daha çok sürdürülebilir tasarım üzerine yoğunlaşan bir alan olarak görülürken biyomimetikğin askeri teknoloji gibi uygulama alanlarında kullanılan bir kavram olarak görülmesidir. İki kavramın da ortak bulunduğu payda, biyolojik formları işlevsel, süreçsel ve sistemsel açıdan taklit ederek sürdürülebilir çözümler üretmektir (Pawlyn, 2011).

Doğa bilimleri yazarı Janine Benyus 1997 'de yazdığı "Biomimicry: Innovation Inspired by Nature" adlı kitabında, bilimi ve felsefeyi doğadan öğrenmeyi amaçlayan bir tür yeni "doğadan öğrenme" yaklaşımını anlatmıştır. Biyomimikri, etimolojik olarak Yunanca *bios* (hayat) ve *mimesis* (taklit) kelimelerinin birleşimiyle Janine Benyus tarafından adlandırılmış bir kavramdır. Biyomimikri temel olarak iki yaklaşımla ele alınabilir (Biomimicry Guild, 2007):

- Biyolojiden tasarıma yönelik yaklaşım: Biyolojik bir olgu, tasarım sorununu çözmek için yeni bir seçenek sunar.
- Tasarımdan biyolojiye yönelik yaklaşım: Tasarım sorunuyla başlanarak ihtiyaç duyulan çekirdek işlev tanımlanır. Sonra organizmaların ve ekosistemlerin bu işlevi nasıl gerçekleştirdikleri gözlemlenir.

Benyus kitabında biyomimikriyi üç ilkeyle tanımlamaktadır:

- Bir örnek olarak doğa – Biyomimikri doğadaki örnekleri inceleyip doğanın tasarımlarını ve gelişim süreçlerini taklit ederek ya da onlardan ilham alarak

insan sorunlarını çözmeye çalışan (Örneğin, yapraktan ilham alarak yapılmış bir güneş pili) yeni bir bilim dalıdır.

- Bir ölçüt olarak doğa – Biyomimikri ekolojik standartları kullanarak gelişimimizin "adillliğini" yargılar. 3.8 milyar yıllık evrimden sonra doğa neyin işler, neyin uygun ve neyin kalıcı olduğunu öğrenmiştir.
- Bir akıl hocası olarak doğa – Biyomimikri doğayı gözlemleyip ona değer vermenin yeni bir türüdür. Doğadan neler alınabileceğini değil, ondan neler öğrenilebileceği üzerine kurulmuştur (Benyus, 2002).

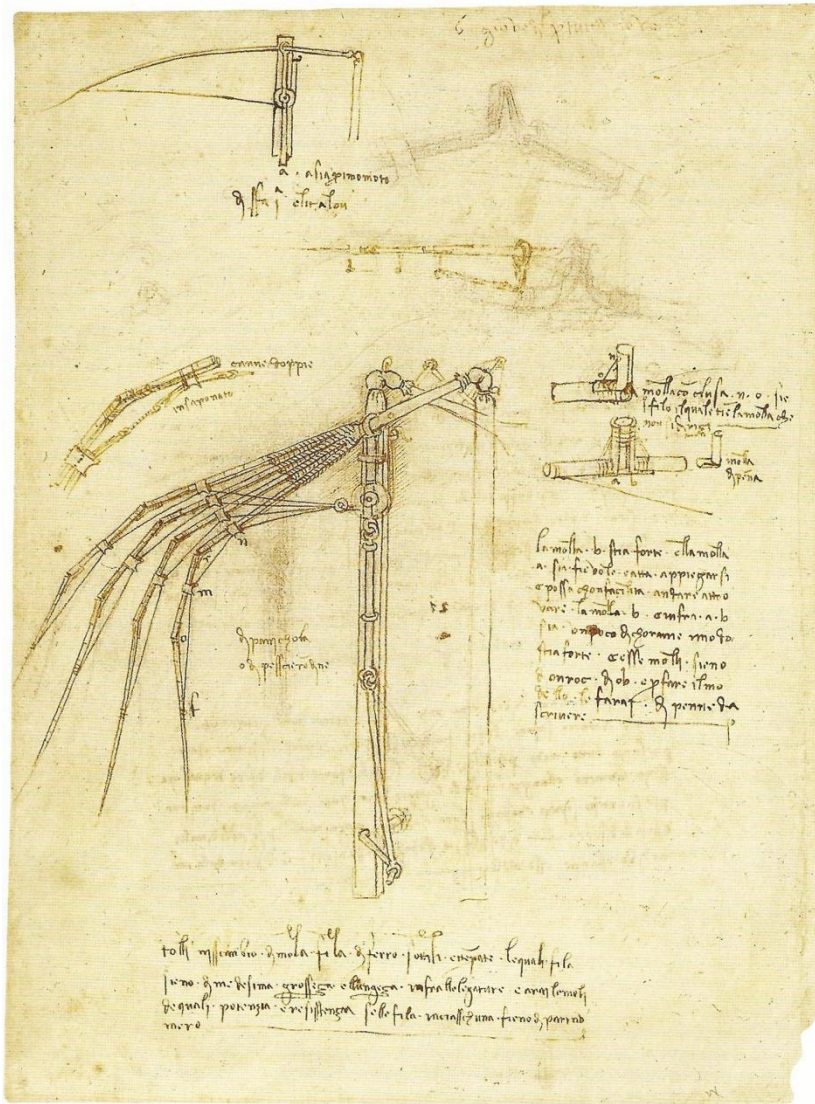
Benyus, bu üç ilkeyi genişletip ekoloji alanında çalışmış bilim insanlarının on yıllar boyunca yaptıkları çalışmalarını inceleyerek, doğanın kanunları, stratejileri ve prensipleri olarak aşağıdaki maddeleri kabul etmiştir:

- Doğa güneş ışığıyla işler.
- Doğa sadece ihtiyaç duyduğu kadar enerji kullanır.
- Doğa biçimi işleve uydurur.
- Doğa her şeyi geri-dönüştürür.
- Doğa dayanışmayı ödüllendirir.
- Doğa çeşitliliğe bağlıdır.
- Doğa yerel uzmanlık ister.
- Doğa savurganlığa engel olur.
- Doğa limitlerin gücüyle sınırlıdır.

İnsanlar için limitler aşılması gereken tavanlar olarak algılanırken, doğa için limitler mevcut kaynaklarla uyum sağlanması gereken eşiklerden oluşmaktadır. Dünyadaki diğer canlıların, insanlar gibi, diğer canlı ve kaynakları kullanma olanağı olmadığı için doğa ile canlılar arasında limitlerle çizilen sınırlara dayanan uyum düzeni oluşmuştur (Benyus, 2002).

Her ne kadar insan yapımı kubbelerin yapısal olarak yumurta kabuğuna öykünerek tasarlandığına dair kesin bir kanıt bulunmasa da, biyomimikrinin temelleri günümüzden çok daha öncesine uzanmaktadır. Leonardo da Vinci bu konuda bir öncü olarak görülmektedir ve ileri görüşlülüğüyle düşünce açısından çağdaşlarından

yüzlerce yıl ilerisinde olmuştur (Pawlyn, 2011). Leonardo da Vinci'nin doğadan esinlenerek yaptığı icatlardan biri de mekânîk kanattır. Şekil 2.1'de görülen çizimde, kanat parçaları birbirine bağlanmıştır ve kablolarla hareket etmektedir. Leonardo da Vinci bunu kuş kanadının anatomik bağlantılarının bir imitasyonu ile sağlamıştır. Bu durumda farklı parçalar birbirine dik açıyla bağlıdır. Daha sonra, "Kuşların Uçuşu Üzerine" el yazmasında çalışırken ve doğal uçuşun taklidini yaparken, yapı segmentleri hayvan kemiklerinin biçimini almaktadır. Bu, insan uçuşunun doğanın bir taklidi olarak yapılması düşüncesinden kaynaklanmaktadır (Laurenza ve diğerleri, 2007).



Şekil 2.1 : Leonardo da Vinci'nin tasarladığı mekânîk kanadı gösteren kendine ait el yazması (Laurenza ve diğerleri, 2007).

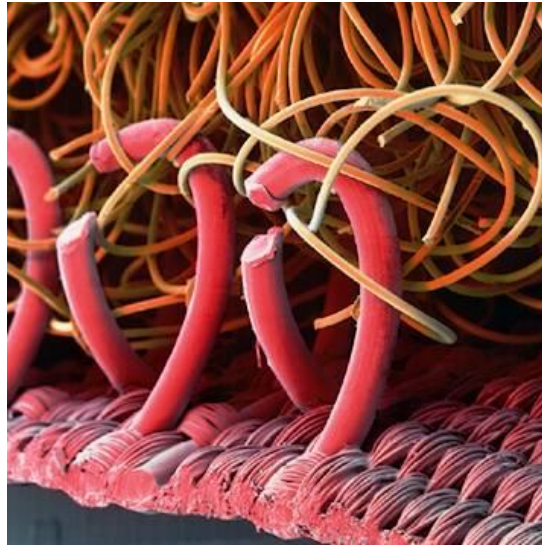
1719'da Fransız entomolog René-Antoine Réamur'un kağıt üretiminde hammadde olarak pamuk ve ketenden üretilen kumaş yerine yaban arılarının ahşabı

dönüştürerek ortaya çıkardıkları kağıt hamurunu önermesiyle, kağıt üretimi için önemli bir alternatif sunmuş oldu. Sir George Cayley 1809 yılında yaptığı araştırmada yunusların ve alabalıkların aerodinamik formlarını inceleyerek gemi gövdelerinin sürtünme katsayılarını düşürmeyi başarmıştır (Pawlyn, 2011).

Biyomimikriye dayalı buluşlara yakın dönem örneği olarak 1948 yılında tasarlanan Velcro (cırt cırt) verilebilir. İsviçreli mühendis George de Mestral, dulavrat otunun dikenli tohumundan (Şekil 2.2) ilham alarak Velcro'yu tasarlamıştır. Fermuarlara alternatif olacak bir çözüm ararken, köpeğinin tasmaına takılan dikenli tohumlar dikkatini çekmiş ve tohumları büyüteçle incelediğinde, dikenlerin ucundaki kıvrık segmentleri farkederek, bu sistemi kendi buluşunda kullanmaya karar verir (Şekil 2.3) (Pawlyn, 2011).



Şekil 2.2 : Dulavrat otu tohumu görseli (Pawlyn, 2011).



Şekil 2.3 : Velcro'nun elektron mikroskobuyla çekilmiş fotoğrafı (URL-17).

Otomobil şirketi Mercedes-Benz'e bağı Daimler Chrysler'in tasarladığı biyotik otomobili için aynı zamanda hem aerodinamik hem de hacimli olma özelliğı taşıyan kutu balığından (*Ostracion meleagris*) ilham alınmıştır (Şekil 2.4). Kutu balığı kübe benzeyen formuna rağmen çok düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir. Olimpiyatlarda yarışan yüzücüler için üretilmiş olan mayoların dokumalarında köpekbalığı derisinin dokusu baz alınmıştır (Şekil 2.4). Bu dokuya sahip mayolar aerodinamik açıdan o kadar büyük avantajlar sağlamaktadır ki, yarışmalarda haksız rekabete neden oldukları için uluslararası yüzme federasyonu FINA (Fédération Internationale de Natation) tarafından yarışmalarda kullanılması yasaklanmıştır (Pawlyn, 2011).



Şekil 2.4 : Mercedes'in biyotik otomobili ile kutu balığı arasındaki benzerlik ve köpekbalığı derisinin elektron mikroskobu altındaki görünümü (Pawlyn, 2011).

2.1.1 Biyomimikri ve mimarlık

Doğada gözlemlenen oluşumların "ölçek", "işlev" ve "oluşum süreçleri" insan yapımı strüktürlerden farklı olmasına rağmen; malzeme, enerji korunumu, hafiflik ve bu hafifliğe rağmen sahip oldukları dayanıklılığın pek çok ilerici mimara ve mühendise esin kaynağı olduğunu düşünmek olasıdır. Topuluklar halinde yaşamayı öğrenen insanoğlu, barınma gereksinimi ile birlikte doğadaki oluşumları gözlemlemiş, salt doğadan elde ettiği malzemeleri kullanmamış, aynı zamanda bilinçli ya da bilinçsiz doğadaki yapılaşmaları gözlemleyerek ya da taklit ederek ilk bina yapma tekniklerini geliştirmeye başlamıştır (Şekil 2.5) (Selçuk ve Sorguç, 2007).



Şekil 2.5 : Tasarım ile organizma arasındaki biyomimikri (Panchuk, 2006).

D'Arcy Thompson'a göre biçim dolayısıyla maddenin parçası, canlı ya da cansız farketmeden ve gelişiminde ve hareketlerinde belirgin olan biçimin değişimi kuvvetin etkisiyle açıklanmaktadır. Ona göre bir cismin biçimi "kuvvetlerin diyagramı"dır (Thompson, 1942).

Geçtiğimiz yüzyılda pek çok mimar yayımladıkları manifestolarda ve tasarladıkları binalarda bazı yaklaşımları doğadan esinlenerek geliştirdiklerini vurgulamıştır. Bu ilişki kimi zaman dekoratif öğelerin doğadan kopyası iken, kimi zaman cephe ve kütle tasarımında doğadaki renk, doku ve desenlerin yorumlanması şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, 20. yüzyılın başlarında Almanya'da Peter Behrens ile başlayan Ekspresyonizm akımı Hans Poelzig, Max Berg, Otto Bartning, Hugo Haring, Erich Mendelsohn, Rudolf Steiner gibi isimlerin tasarımlarına kristal ve organik formlar olarak yansımıştır. Özellikle Steiner geometrik-dinamik formların, organik-yaşayan formlara dönüşmesi gerektiğini söyleyerek, tasarımlarında Goethe'nin "plant metamorphosis" prensibini benimsediğini açıklayarak bitkilerin büyümesi prensibini ilke edinmiş ve gridal geometrik formlar yerine organik düzenlemeleri benimsemiştir (Selçuk ve Sorguç, 2007).

Mimari tasarım akımları, biyomimikriyle olan ilişkileri açısından farklılık gösterirken doğadan mimari bir anlam çıkarma amacını paylaşmaktadırlar. Organik mimari Frank Llyod Wright'a göre, sağduyunun temel kurallarını överken, biçimi malzemelerin doğasına göre şekillendirir (Şekil 2.6). Eugene Tsui'ye göre evrimsel mimari; doğanın süreçlerine, organizmalarına, yapılarına ve malzemelerine, atom altı parçacıklardan böcek ve hayvan anatomilerinin kinesiyolojilerine, yaşam habitatlarından ekolojik ilişkilere kadar farklı ölçeklerdeki her şeyi kapsayan uygulamalı felsefeye dayanan bir araştırmadır. David Pearson'a göre anthroposofcu mimari, binaların inşa edildikleri peyzaj ile biçim ve malzeme açısından uyum içerisinde olarak insan biçimine ve ihtiyaçlarına yanıt veren bir akımdır.



Şekil 2.6 : Frank Llyod Wright'ın tasarladığı Şelale Evi (Url-23).

Buckminster Fuller ve hemen ardından Frei Otto'nun "süreci" anlamaya yönelik sorgulamaları ve yeni form ve strüktür arayışları, mimari tasarımda doğadan bilinçli öğrenme sürecinin başlangıcı olarak düşünülebilir. Fuller'ın jeodezik kubbesinde, Otto'nun asma-germe sistemli çadır örtülerinde hep en az malzeme ile en büyük açıklıkları geçme, sürdürülebilir bir çevre için daha hafif yapılar üretme kaygısı görülür. Bilindiği gibi Fuller, doğada dinamik, fonksiyonel ve sonuç ürünleri hafif olan bir teknoloji olduğunu iddia etmiş ve doğa yapılaşmalarının optimum verimlilikte olmasının insan yapımı strüktürler için önemli ipuçları barındırdığını

söylemiştir. Pek çok bilimsel alanda çalışmalarını gördüğümüz Fuller'ın buluşlarından biri "enerji/sinerji (görevdeşlik) geometrisi" dir. İstiflenmiş kürelerin, enerji alışverişi sırasında karşılıklı etkilenecek düzenli ve kararlı biçimler aldığını ortaya çıkarmıştır ve bu buluş ileride atom çekirdeğinin ve virüslerin yapısını anlatabilmek için kullanılmıştır. Buluşlarından en önemlisi ve çağdaş mimarlığı en çok ilgilendireni kuşkusuz ki "Jeodezik Kubbeler" dir. İlginç olan ise 1985 yılında Richard Smalley, Robert Curl ve Harold Kroto'nun bilim çevrelerinde çok önemli bir buluş olarak nitelendirilen "karbonun 3. formunu (C60)" bulmalarının çok öncesinde, 1940'ların sonunda Fuller'ın jeodezik kubbelerde "Exohedral" formları kullanmış olmasıdır. Işınılar (radiolarian) olarak adlandırılan mikroskobik canlılar, C60 atomu ve Fullerin Expo67 kubbesi gösterilmiştir. Frei Otto ise, 1964 de Stuttgart'ta kurduğu enstitüde (Institute for Lightweight Structures) pek çok doğal obje üzerinde deneyler yapmış ve araştırmalarını strüktürel formların en iyilenmesi ve hafif yapılar kurma üzerine yoğunlaştırmıştır. Mimarlıkta asma sistemler geliştirmek için çeşitli ağ sistemleri kullanarak bu sistemlerin yer çekimi ile elde edebileceği formlara dönük arayışları; örümcek ağlarından esinlenen asma sistemleri, sabun köpüğünden yola çıkarak geliştirdiği en küçük alanlı yüzey kavramı ve bunların uzantısı Otto ile özdeşleşmiş modern çadırlar ve şişme (pnömatik) yapılar doğadan esinlenmenin salt form değil süreci de içeren bir esinlenme biçimi olması gerekliliğinin ilk ön çalışmaları olarak görülebilir (Selçuk ve Sorguç, 2007).

Doğadan esinlendiğini açıkça dile getiren bir başka mimar Santiago Calatrava, çeşitli yazılarında ve söyleşilerinde tasarım felsefesini dile getirmektedir. Mimarlığı anlamak için geometrinin dilini anlamanın strüktürün dilini anlamak kadar esas olduğuna inandığını belirtmekte ve her ikisinin de malzemenin özellikleri ve doğanın yapılaşmalarıyla birlikte onun için esin kaynağı olduğunu söylemektedir. Örneğin, Toronto'da tasarladığı BCE Place kompleksi; içe doğru eğimli 8 çelik kolonun taşıdığı, ortada parabolik bir kemer olarak birleşen ve 14 metrelik açıklığı geçen bir örtü sistemiyle kapatılmıştır. Düzenli bir plan, ağaç şeklindeki kolonlar üzerinde yükselerek 9 kemerin kesişim noktalarında yarattığı orman etkisiyle çarpıcı bir atmosfer yaratmaktadır. Benzer etkileri Lizbon Oriente İstasyonu'nda da görmek mümkündür. Mimarın eskizlerinde ve pek çok bina ve köprü tasarımlarında, hayvan şekillerinden ve iskelet sistemlerinden yola çıktığını ve yapılarında bu tür benzeşim ve analizleri de sıklıkla kullandığı görülmektedir. Ancak onun tasarımlarında

benimsenen "doğadan bilinçli öğrenme" arayışının sonuçları olan ve "alışılmışın dışında" diye tanımlanabilecek form ve strüktürlerin "süreci" yeterince yansıtamadığı ve kimi zaman "abartılı" olduğu ileri sürülmüştür (Selçuk ve Sorguç, 2007).

Calatrava ve diğerlerinin gerek verilen örneklerdeki tasarımlar, gerekse diğer birçok tasarımda doğa ile etkileşim hala "form arayışı" düzeyinde kalmış ve tasarımlarda doğada görülen hafiflik, strüktürel sağlamlık ve statik ve dinamik yüklere dayanım, enerji kullanım verimliliği, malzeme gibi günümüzde sıkça konuşulan sürdürülebilir mimarlık alanı için belirleyici özellikler ve amaçlar olan pek çok kriter sağlanamamıştır. Bu bağlamda içinde bulunduğumuz bu yeni yüzyılda bu etkileşimin niteliği, nasıl olması gerektiği ve yöntemi önemli bir tartışma ve araştırma konusudur (Selçuk ve Sorguç, 2007).

Biyomimikri farklı bilim dallarındaki bilgileri birleştirerek tek bir düşünce bütünü oluşturmayı amaçlar. Bu yaklaşım, tasarımdaki ana faktörlere dayalı entegre ağlardan oluşan bir geribildirim sistemi olarak görülebilir. Bu faktörler tasarıma sismik, yükleme, iklimlendirme ve güneş ışığı gibi içsel ve dışsal kuvvetler ekseninde yön vererek ve birbirleriyle etkileşimlerini düzenleyerek çözüme ulaşmayı hedefleyebilirler (Panchuk, 2006).

Biyomimikri ve tasarım ilişkisine yönelik olan iki temel yaklaşım (Biomimicry Guild, 2007), mimarlık alanına üç seviyede incelenerek taşınabilir: Organizma, davranış ve ekosistem. Organizma seviyesinde biyomimikri, bitki ya da hayvan gibi belirli bir organizmanın bütününe ya da bir kısmını içerir. İkinci seviye davranışın taklidi üzerinde dayalıdır ve organizmanın davranışıyla ya da içinde bulunduğu çevre ile olan etkileşimi ile ilgilidir. Üçüncü seviyedeki biyomimikri ise, bütün bir ekosistemin ve onun hatasız biçimde işlemesini sağlayan ana ilkelerinin taklit edilmesiyle gerçekteşir.

Her biyomimikri seviyesi, kendi içerisinde biyomimikrinin uygulanabileceği alt kola ayrılır. Biyomimikri seviyesi, tasarımın nasıl görüldüğu (biçim), neden yapıldığı (malzeme), nasıl yapıldığı (yapı), nasıl çalıştığı (süreç), ne yapabildiği (işlev) gibi soruları yanıtlayabilen özellikte alt sınıflardan oluşmaktadır. Çizelge 2.1'de biyomimikri çeşitleri arasındaki farklılıklar, termitler ve termitlerin içinde buldukları ekosistemin özelliklerine göre belirtilmiştir (Zari, 2007).

Çizelge 2.1 : Biyomimikri için bir uygulama çerçevesi (Zari, 2007).

Biyomimikri Seviyesi	<i>Örnek – Termitleri taklit eden bir bina</i>	
Organizma Seviyesi (Belirli bir organizmanın taklidi)	<i>Biçim</i>	Bina termite benziyor.
	<i>Malzeme</i>	Bina termitle aynı malzemeden yapılmış. Örneğin, termit dış iskeletini / derisini taklit eden bir malzeme.
	<i>Yapı</i>	Bina termitle aynı şekilde yapılmış. Örneğin, çeşitli büyüme aşamalarından geçiyor.
	<i>Süreç</i>	Bina bir termitle aynı şekilde çalışıyor. Örneğin, besinlerden verimli biçimde hidrojen üretiyor.
	<i>İşlev</i>	Bina büyük ölçekte termit gibi işliyor. Örneğin, selüloz atığını geri dönüştürerek toprak üretiyor.
Davranış Seviyesi	<i>Biçim</i>	Bina bir termit tarafından yapılmış gibi görünüyor. Örneğin, termit tepeciği.
	<i>Malzeme</i>	Bina termitin inşa ettiği malzemelerden yapılmış. Örneğin, ana yapı malzemesi olarak sindirilmiş ince toprak.
	<i>Yapı</i>	Bina aynen bir termitin yapacağı gibi inşa edilir. Örneğin, toprağın belirli noktalarda belirli zamanlarda yığılması.
	<i>Süreç</i>	Bina aynı bir termit tepeciği gibi işler. Örneğin, yönelim, biçim, malzeme seçimi ve doğal havalandırma ya da termitlerin birlikte çalışmalarını taklit.
	<i>İşlev</i>	Bina işlevi, onu termitler yapmış gibidir. İç koşullar eniyilenmiş biçimde düzenlenerek sıcaklığın sabit tutulması veya daha büyük ölçekli bir termit tepeciği gibi işlemesi.
Ekosistem Seviyesi (Ekosistemin taklidi)	<i>Biçim</i>	Bina bir ekosistem gibi görünüyor (içinde bir termit yaşayabilirdi).
	<i>Malzeme</i>	Bina bir termit ekosistemiyle aynı malzemelerden yapılmış; doğal oluşmuş, sık rastlanan bileşiklerden ve sudan oluşur.
	<i>Yapı</i>	Bina bir termit ekosistemiyle aynı şekilde biraraya getirilmiş; devamlılık prensipleri ve zamanla artan karmaşıklık kullanılıyor.
	<i>Süreç</i>	Bina bir termit ekosistemi gibi çalışıyor; güneşin enerjisini depolayıp çeviriyor, su depoluyor.
	<i>İşlev</i>	Bina bir termit ekosistemiye aynı işlevlere sahip ve süreçler arasındaki ilişkileri kullanarak daha karmaşık bir sistemin bir parçasını oluşturuyor. Bir ekosistem gibi hidrojen, karbon ve azot döngülerine katılıyor.

2.2 Fraktaller

Newton 17. yüzyılda mekânîk dünya görüşünü formüle ederek yerçekimi ve optik yasalarını bulmuş ve tüm bunların sonucunda evreni dev bir makine gibi tasarlamıştır. Nedenselci (determinist) olarak adlandırılan bu düşünce, 1960'lı ve 70'li yıllarda gezegenlerin hareketlerinin mekânîk bir düzenlilik göstermediği, sanıldığına tersine bu düzenlilikten çok küçük derecelerde de olsa saptığının keşfedilmesiyle son bulmuştur. Söz konusu sapmanın sonucunda bazı gezegenler kaosa sürüklenecek ve tamamen düzensiz hareketler göstereceklerdir. Newton'un makine gibi tasarladığı evrenin aslında kararsız bir yapıda olduğu anlaşılmıştır (Ediz ve Çağdaş, 2006).

Benoît B. Mandelbrot, 1975 yılında yazdığı "Fractals: Form, Chance and Dimension" adlı kitabında oluşturduğu geometrileri adlandırmak için fraktal kavramını ortaya atmıştır. Kitabında bilgisayar grafikleri yardımıyla türettiği dögüsel eğrilerle, yapay dağlar oluşturan sistemi tanımlarken fraktal kelimesini ortaya atmıştır. Fraktal kelimesinin kökü, kırmak anlamına gelen, Latince'deki "frangere" fiilinden gelmektedir. Romalılar için "frangere" taş kırmak çağrışımı yapıyor olmalıydı çünkü, fiilden türetilen sıfat anlam olarak kırılmış taşların düzensizliğini ve kırılmayı içeriyordu. Bu sıfat "fractus" kelimesidir ve İngilizce olan "fractal" kelimesi de bu sıfattan türetilmiştir. Etimolojik ilişkiler açısından bakıldığında, fraction (parça) kelimesi, matematikte iki tam sayı arasındaki kesir (fraction) anlamına gelmektedir. Aynı şekilde fraktaller de Öklidyen biçimlerin arasında yer alırlar (Mandelbrot, 1982).

Fraktal kelimesi dilimize çevrildiğinde parça, kırma, kırılma, kesir, kesirlere ait ve düzensizlik anlamlarının olduğu görülür. Fraktal geometri Öklidyen geometriden tamamen farklı bir yapı gösterir. Kaos Teorisi ile ortaya çıkan belirsizlik ve düzensizlik kavramları, fraktalleri oluşturan temel kavramlardır. Öklidyen geometrideki kesinlik, katılık fraktallerde yoktur (Çağdaş ve diğerleri, 2006).

Mandelbrot "The Fractals and Geometry of Nature" adlı kitabında (1982) fizik ve biyoloji alanlarında, biçimin bilimi konusuna olan ilginin tekrar canlanmasında önemli role sahiptir. Aynı şekilde fraktaller, matematik alanında devamlılığı olmayan ve kaotik yapıdaki dinamik sistemlerin görselleştirilmesinde de kullanılmıştır. Bu

farklı kökenlerden kaynaklanan temel anlayış, dünyanın kaotik, kesintili ve düzensiz olduğu fikrinin ötesinde, ilk bakışta fiziksel olarak yüzeysel biçimli görünen dünyanın arkasında düzenli, inatçı ve sonsuz karmaşıklıkta bir sistem vardır. Ama bu düzen devamlılık ve akıcılık sağlama adına önceki bilimsel araştırmalar tarafından basite indirgenmiştir. Dünya büyük çoğunlukla fraktal olarak görülmelidir. Fraktal olmayan ve akıcı olan yorumlar ve bu yorumları destekleyen bilim, bu nedenle özel bir durumdur (Batty ve Longley, 1994).

Matematikte kendine benzeyen objeler ya tam olarak ya da yaklaşık olarak kendine ait olan bir parçaya benzerlik taşırlar. Bir objenin küçük parçaları objenin daha büyük parçalarıyla benzerlik taşıyarak sonuç olarak bütün objeyle benzerlik taşır. Bir yapı, yapının boyutlarının hepsi aynı oranlama kat sayısı ile dönüşüme uğratılmışsa o yapı kendine benzeme özelliği taşır. Benzerlikten söz edebilmek için, biçimlerin kenarları ve iç açılarının göreceli oranları aynı kalmalıdır. Bu olgu yapraklar, ağaçların dallanıp budaklanmaları, dağ sırtları, nehirlerin su basma seviyeleri, dalga şablonları ve sinir impulsları gibi doğal biçimlerde ve ritimlerde görülerek kendine benzeyen biçimlerin devamlılığına örnek teşkil eder (Şekil 2.7) (Bovill, 1996).



Şekil 2.7 : Romaneco brokolisinin bilgisayar grafikleriyle oluşturulmuş temsili (Url-4).

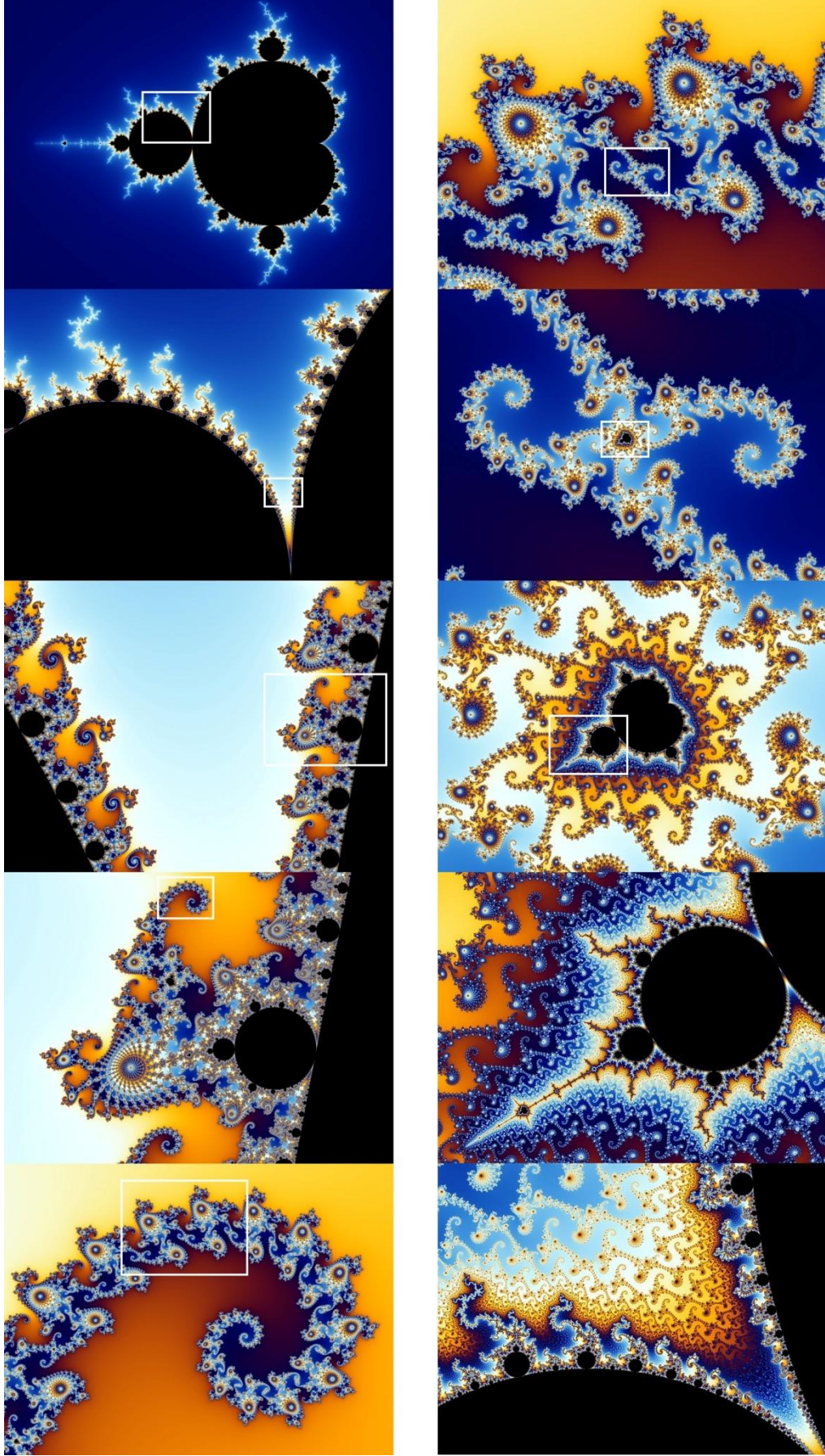
Mandelbrot "The Fractals and Geometry of Nature" adlı kitabında doğal biçimlerle fraktaller arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için İngiltere'nin sahil şeridi uzunluğunu hesaplama konusunu ele alır. Sahil şeridi çok sayıda ve farklı uzunluktaki körfez ve koy ile kaplıdır. Mandelbrot'a göre ne kadar küçük bir ölçüm aleti kullanılırsa, ölçülebilen koy ve körfez sayısı o kadar artacak ve sonuç olarak da kıyı şeridi uzunluğu gittikçe artacaktır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : İngiltere'nin kıyı şeridi ölçümü (Bovill, 1996).

Birim Sayısı	Birim Uzunluğu	Kıyı Uzunluğu
7	200 mil	1400 mil
16.25	100 mil	1625 mil
40	50 mil	2000 mil
96	25 mil	2400 mil

Fraktallerin doğada bulunabileceği daha önce belirtilmesine rağmen, matematiksel olarak bu durum doğru değildir. Ağaçlar gibi doğal objeler, sadece fraktal benzeridirler. Bitkiler, belirli bir aralıkta kendine benzeyen gelişim gösterirlerken, fraktallerde kendine benzeyen gelişim sonsuza kadar sürebilir. Bu bitki yapıları belirli sayıda adımla gelişirler ve belirli sayıda çizgi parçalarına (segment) sahiptirler. Mandelbrot'un "The Fractals and Geometry of Nature" adlı kitabında ağaçların ve çiçeklerin özyineli dallanma yapılarına örnek vererek Hausdorff-Besicovitch boyutlarını incelemiş ve ağaçların kısmen fraktal özellik gösterdikleri sonucuna ulaşmıştır (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Doğadaki fraktal yapılar Öklidyen geometriyle açıklanamayacak karmaşıklıkta bir düzen oluştururlar (Şekil 2.7). Bilgisayar yazılımları yardımıyla oluşturulan fraktallerin avantajı, fizyolojik, biyolojik başka hiçbir etkenden etkilenmeyerek sadece matematiğe dayanan fraktal geometrileri üretebilmeyi mümkün kılmalarıdır. Fizikçi Wolfgang Beyler tarafından "Ultra Fractal 3" yazılımıyla oluşturulan Mandelbrot dizisi (Şekil 2.8), her yaklaşma adımında daha önceden görülemeyen detaylar ortaya çıkarmaktadır (Url-18). On yaklaşma adımı boyunca, bir sonraki adımda yaklaşılacak alan, beyaz çerçeve ile gösterilmiştir. Yaklaşma boyunca kendine benzeme özelliğine sahip geometriler gözlenir.



Şekil 2.8 : Mandelbrot dizisinin kademeli olarak gösterimi (Url-18).

2.2.1 Fraktaller ve mimari tasarım

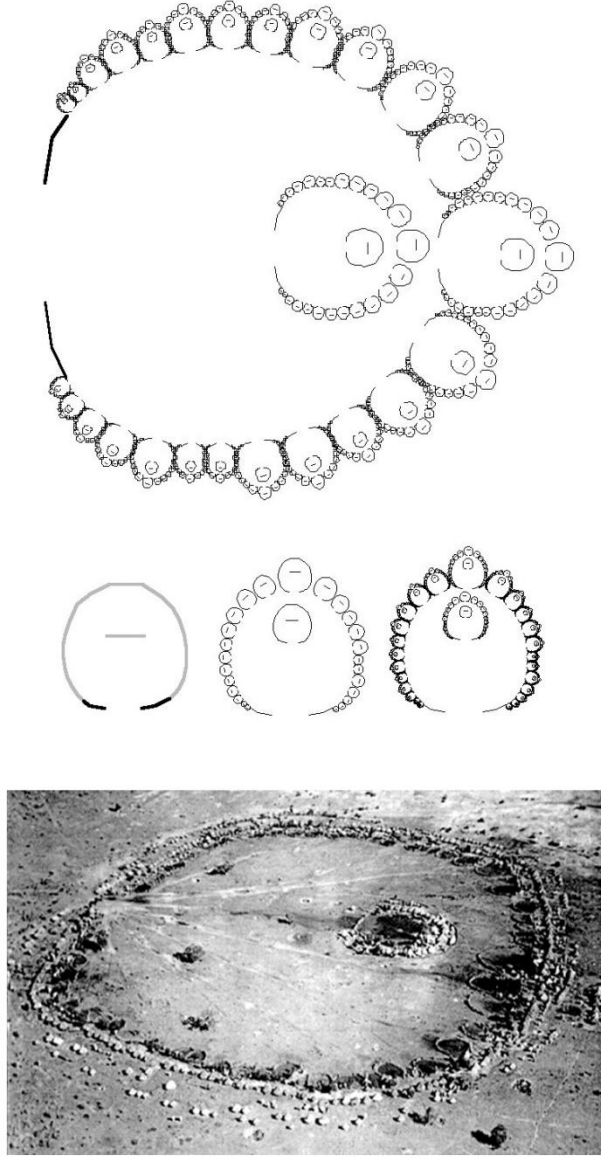
Binaların da doğadaki örnekleri gibi matematiksel tanım açısından değerlendirildiklerinde fraktal olmadıkları görülür. Bunun nedeni sonsuz ölçekte kendine benzeme özelliği gösterememelerindedir (Bovill,1996).

Bir yapının kitlesinden, iç mekânındaki en küçük elemana kadar yaklaşılarak bir çok kendine benzer ayrıntıya sahip olduğu görülebilir. Gotik mimari bu konuya ait iyi bir örnek olarak gösterilebilir. Bir araştırma ile gotik bir katedralin kolon başlığının, katedralin küçük bir versiyonu olduğu görülür. Bu tıpkı bir paleontoloğun bir dinazorun arka kemiklerinden faydalanarak iskeletin tamamını ortaya çıkarabilmesine benzer. Böylelikle katedralin küçük parçalarından tamamını tahmin etmek olasıdır. Aslında mimarlık tarihinde sıkça rastlanan kendine benzer öğelerden oluşmuş bu yapı, fraktal mimaridir (Ediz ve Çağdaş, 2006).

Mimari tasarım sürecine farklı yaklaşımlar, dijital ortamda tasarım olanaklarıyla gelişmektedir. Varolan bir mimari dokunun özelliklerinin saptanarak yeni tasarımların oluşturulmasında kullanılması, tasarımı destekleyerek çözüm arayışlarına yön verecek bir yaklaşım olabilir. Mimari dokuların özellikleri fraktal değerlerin belirlenmesi yöntemi ile saptanabilir (Ediz ve Çağdaş, 2006).

Farklı kültürlerle ait yerel mimarilerde fraktallerle karşılaşmak mümkündür. Afrika kültüründe ve mimarisinde fraktaller önemli bir rol oynamaktadır. Ron Eglash'ın "African Fractals: Modern Computing and Indigenous Design" adlı kitabında, Afrika'daki sosyal ve dini strüktürün mimariye yansıdığını örneklerle gösterir. Planlama açısından bakıldığında buradaki fraktal yerleşimler baskın yerleşim türü olan büyük köyler olarak düzenlenmiştir. Fraktal düzene örnek olarak uzun zaman içerisinde köylülerin nesilden nesile geliştirerek oluşturdukları Güney Zambia'daki Ba-ila yerleşimi verilebilir (Şekil 2.9) (Eglash, 1999). Her eklenen aile için bir tane olacak şekilde yüzük şeklinde düzenlenmiş modüller, hava fotoğrafında görülmektedir. Yüzük şeklindeki her aile modülünün arka bölümünde ailenin yaşama alanı vardır. Yüzüğün önünde de hayvanların giriş ve çıkışlarını sağlayacak bir kapı bulunmaktadır. Böylece modül içerisinde insan-hayvan (temiz-kirli) ayrımı yapılmış olur. Bu nedenle de yerleşimi oluşturan büyük halkanın yerleşim girişine yakın tarafındaki konutlarda yaşayan insanlar topluluk içinde düşük statüye sahipken,

halkanın geri kısmında yaşayan insanlar ise yüksek statüye sahiptirler. Bu durum fraktal kurgu içerisindeki kendine benzeme özelliğinin, geometri ve mimariden yararlanarak farklı ölçeklerde toplumdaki hiyerarşik düzeni sağlamasına örnektir (Egash ve Odumosu, 2005).



Şekil 2.9 : Ba-ila yerleşiminin fraktal kurgusu (Egash ve Odumosu, 2005).

Son yüzyılda fraktaller "Robie House", "Fallingwater", "Palmer House" ve "Marion Country Civic" gibi fraktal kurguyu içinde barındıran mimari eserlerin sahibi Frank Lloyd Wright gibi ünlü mimarlar tarafından kullanılmıştır. Bu kullanım, farklı seviyelerde ölçek duygusunu hissettirmedeki başarılarından dolayı fraktallerin evrensel olarak ilgi çektiklerini ve görsel olarak tatmin edici olduklarını göstermektedir. 1980'lerde fraktaller tasarımcılar ve mimarlar tarafından bir tasarım

aracı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yessios, fraktalleri ve fraktal geometrileri mimari tasarımda ilk kullananlardandır (Lu ve diğerleri, 2011). Durmisevic ve Çiftçioğlu, geliştirdikleri bilgisayar yazılımıyla türettikleri fraktal ağaçla, yol altyapısı tasarlayarak fraktalleri mimari tasarım ve kent planlamasında kullanmışlardır (Durmisevic ve Çiftçioğlu, 1988).

Günümüz mimarisine ait ürünlerin pek çoğunun, biçim dili düzenli, yalın ve Öklidyen geometriye dayalı olarak tanımlanabilen geçmişteki örneklerden farklı olarak, karmaşık ve fraktal özellikler gösterdiği görülmektedir. Bu fraktal kurguların bilgisayar ortamında algoritmalarla üretilebilmesi, mimari form arayışlarında tasarımcıya yardımcı olmaktadır. Fraktal kurgular, üretken mimari tasarım alanında yeni bir yaklaşımı destekleyici yönde kullanılmaya başlanmış olup; bilgisayar ortamında algoritmalarla temsil edilebilirler ve mimari formların oluşturulmasında kullanılabilirler (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11). Fraktaller bilgisayar destekli mimari tasarım alanında, tasarım yardımcı aracı ve sözdizimsel (syntactic) bilginin temsili amacıyla kullanılan biçim gramerlerinin bir alt kümesi olarak kabul edilmektedir. Biçim grameri ile karşılaştırılırsa; fraktaller, biçimin üretim sürecinde kullanılan kural sayısı daha az, kuralın tekrar sayısı daha fazla ve biçimin kendine benzerlik özelliği yüksek olan, geometrik nitelikli tasarıma yardımcı araçlardır. Fraktal geometriyle, üretilen basit bir biçim, tekrar eden algoritmik bir yapıyla sonuçta karmaşık bir yapıya dönüşmektedir. Bu algoritma bir başlangıç durumu ve bu başlangıç durumuna uygulanan bir üretim kuralı ile kendi kendine benzeyen biçimleri üretmektedir. Chomsky'nin dilde varolduğunu belirttiği sözdizimsel ve anlamsal özelliklere paralel olarak Steadman da, mimari dil bilimi; olasılı mimari biçim ve düzenlemelerin oluşturulmasıyla ilgilenen sözdizimi ve bu düzenlemelerin anlamı ile ilgilenen anlam bilim olarak iki bölümde incelemektedir. Bilgisayar ortamında mimari tasarımların üretilmesinde kullanılan modellerde bu iki özellik iki farklı yaklaşımla modellenmektedir (Ediz ve Çağdaş, 2006):

- Tasarımın topolojik ve geometrik tanımlarını üreten modeller,
- Tasarım tanımları ile performans gereklilikleri arasındaki uyulaşımı sağlayan modeller.



Şekil 2.10 : Mimar Jean Nouvel'in Paris'teki Institut du Monde Arabe'nin fraktallere dayalı cephe kurgusu (Url-20).



Şekil 2.11 : Fraktallere özgü kendine benzeme özelliği gösteren RMIT Storey Hall binasının cephesi (Url-21).

3. LINDENMAYER SİSTEMLERİ VE TEMSİL YÖNTEMLERİ

Doğada yaşayan organizmaların gelişimlerinin incelenmesiyle, gelişim süreçlerinde fraktal kurguların yer aldığı tarih boyunca gözlemlenmiştir. Bu fraktal kurgular, Lindenmayer sistemleri olarak adlandırılan yeniden yazma yöntemleri ile üretken sistemlere dönüştürülüp mimari tasarımda kullanılabilir. Burada ortaya çıkarılan yeni tasarım, "kendine benzeme" özelliğini barındırmaktadır. Böylece doğada var olan parça ile bütün ilişkisinin, insan yapılarında da kurgulanabileceği düşünülmektedir.

Lindenmayer sistemleri (L-sistemleri) Macar biyolog Aristid Lindenmayer tarafından basit çok hücreli organizmaların şekilbilimsel gelişimini genetik, sitolojik ve fizyolojik gözlemlere dayanarak oluşturulmuş kuramsal çerçeveye dayanan bir "dizgi yeniden yazma sistemi"dir (Lindenmayer, 1975). Sonra daha gelişmiş bitkilerin ve bitki organlarının gelişimini araştırmak için kullanılmıştır. L-sistemleri,

- Dizgi oluşturmak için kullanılacak harflerden oluşan bir alfabe,
- Her bir harfi daha geniş bir harf dizgisine genişleten üretim kuralları,
- Üretimi başlatacak bir ilk dizgiye (belit) ve üretilen dizgileri geometrik yapılara çevirecek bir mekânizmadan (turtle graphics) oluşmaktadır.

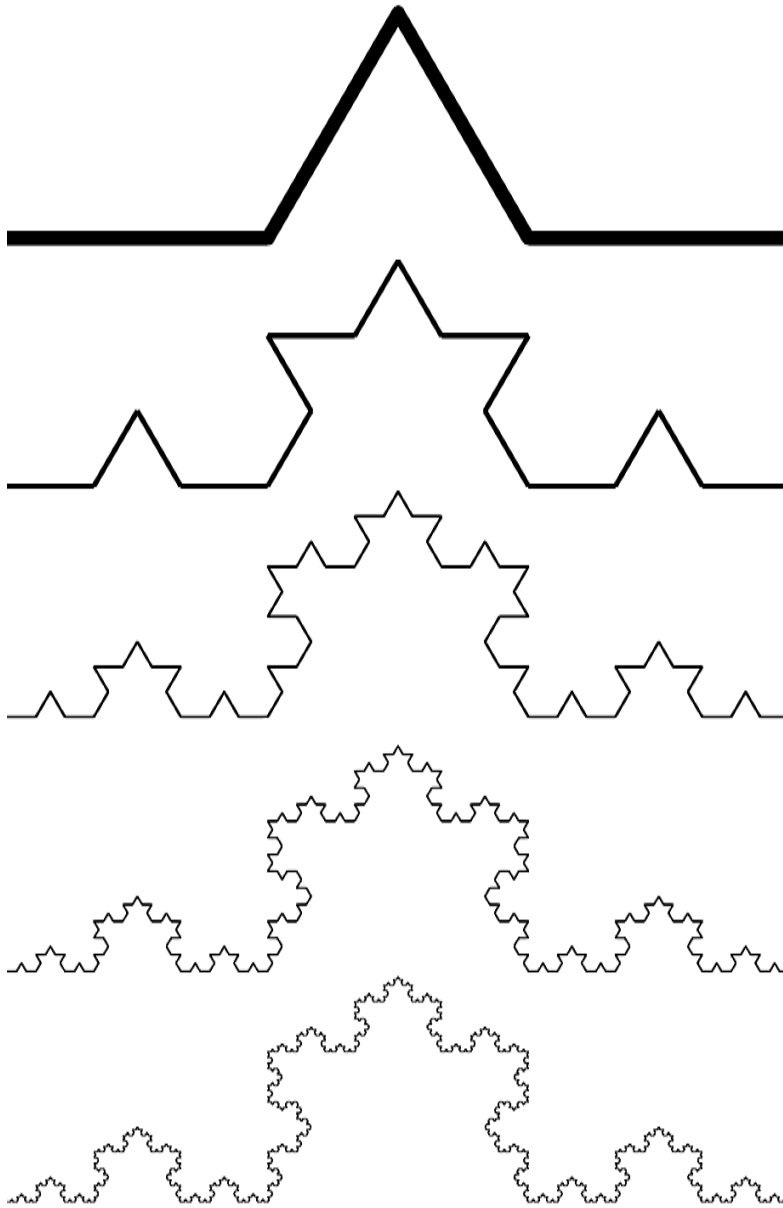
Lindenmayer sistemleri (L-sistemleri), bitki gelişiminin matematiksel kuramı olarak tasarlanmıştır. Karmaşık yapıdaki bitkilerin gelişimlerini modellemeden önce, tek hücreli bitkilerin topolojik ilişkilerini ortaya koymak için üretilmiş bir sistemdir. Kuramı görselleştirmek için üretilen çeşitli yöntemler sayesinde bitki modellemesi için çok yönlü bir araç haline gelmiştir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Aristid Lindenmayer alfabeden oluşan dizgiler üzerinde oynama yapmaya başladığı ilk zamanlarda L-sistemlerinin dizgilerinin bitki çizimleri oluşturmak için bilgisayarlar tarafından grafik olarak yorumlanması yaklaşımına karşıydı. Sonradan bu yöntemin L-sistemlerini kullanmada en etkili yol olduğu kanıtlanmıştır. L-

sistemleri belirli bir olguyu taklit etmek için oluşturulmuş olmasına karşın, farklı disiplinler tarafından kullanılmıştır (Griswold, 2004).

3.1 Yeniden Yazma Sistemleri

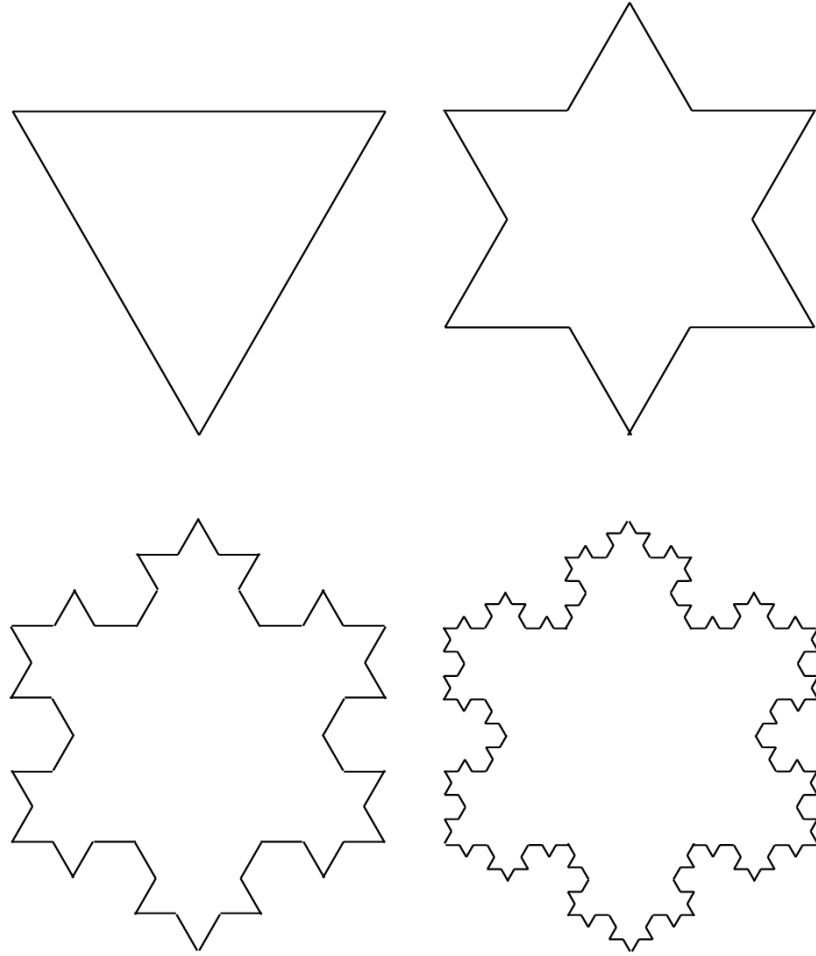
L-sistemlerinin merkezinde yeniden yazma yer almaktadır. Yeniden yazma sistemleri karmaşık yapıdaki objeleri, en başta elde olan basit objeye yeniden yazma kurallarını kullanarak sürekli yeni parçaları eklemleyerek ortaya çıkarır. Bunun örneklerinden biri de Koch Kar Tanesi Eğrisi (Koch Snowflake Curve) olarak adlandırılan geometrik gösterimdir (Şekil 3.1) (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).



Şekil 3.1 : Koch Eğrisi'nin beş aşamalı olarak üretimi (Url-5).

Koch Eğrisi, Helge von Koch tarafından 1906 da ortaya konmuştur. Bu yapıyı oluşturmak için, önce bir çizgi çizilir ve üç eşit parçaya bölünür. Sonra ortada kalan çizgi parçası aynı çizgi parçasının üzerinde oluşturulan eşkenar üçgenin diğer iki kenarı ile değiştirilir. Sonraki adımda ise elde edilmiş olan 4 çizgi parçası üzerinde önceki işlem tekrarlanır (Şekil 3.1). Bu tekrarlama süreci sonsuza dek devam ettirilebilir. Elde edilen geometri, sonsuz uzunluğa sahip olabilir (O'Connor ve Robertson, 2000). Koch eğrisinin kendine benzeme özelliğine sahip bir deseni kuramsal olarak sonsuz aralıktaki ölçek değişiminde gözlemlenebilir (Bovill, 1996).

İşlemin başında, başlangıç geometrisi (öncül) olarak bir çizgi yerine, bir eşkenar üçgenle başlanırsa ve kurallar aynı şekilde uygulanırsa, Koch Kar Tanesi Eğrisi elde edilir (O'Connor ve Robertson, 2000). Böylece sadece içerdiği kıvrımları arttırarak matematiksel olarak sonsuz uzunluğa varabilen bir geometri üretilmiş olur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Aşamalı olarak Koch Kar Tanesi Eğrisi'nin üretimi (Url-5).

En yoğun biçimde çalışılan ve en iyi anlaşılmiş yeniden yazma sistemleri harf dizgileri ile çalışmaktadır. Karakter dizgileri üzerine kurulmuş olan yeniden yazma sistemleri ilk olarak Axel Thue tarafından 19. yüzyılın başlarında ortaya konmuştur (Salomaa, A., 1973). Karakter dizgileri üzerinde çalışan yeniden yazma sistemlerine olan ilgi, Chomsky'nin 1950'lerde formal gramerler üzerindeki çalışmasıyla artmıştır. 1968 yılında Aristid Lindenmayer, L-sistemleri olarak adlandırdığı yeni dizgi, yeniden yazma sistemlerini tanıtmıştır. Chomsky'nin gramer üretim yöntemi ile L-sistemlerinin arasındaki temel fark, sonuçları uygulama aşamasındadır. Chomsky gramerlerinde üretimler sırayla uygulanırken, L-sistemlerinde ise paralel ve eş zamanlı olarak verilmiş kelimenin bütün harflerini değiştirmektedirler. Bu fark, L-sistemlerinin biyoloji ile olan ilişkisini yansıtmaktadır. L-sistemleri geliştirilirken ilk olarak bitki hücre bölünmeleri model olarak alındığından dolayı, ortaya aynı anda hücre bölünmeleri yaşayan çok hücreli bir bitkinin gelişimini temsil edecek bir model ortaya çıkmaktadır. Aynı anda yapılan eş zamanlı bölünmeler bu ilkeye dayanmaktadır (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

3.2 DOL-Sistemleri

L-sistemleri arasında en basit yapıları olanları, aynı zamanda nedenselci (determinist) ve bağlama duyarsız olan DOL-sistemleridir. Bu sistemler, su yosunlarının (algler) hücresel büyüme sistemlerini ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. DOL-sistemlerinin kendini tekrarlayan doğası, kendi kendine benzerliğe neden olmaktadır.

Örnek olarak, a ve b harflerinin tekrarlı olarak kullanılarak oluşturulmuş dizgileri ele alalım. Her harf, bir yeniden yazma kuralı ile eşleştirilmiş olsun. Bu kurallardan $a \rightarrow ab$ önermesine göre her a harfi ab dizgisiyle değiştirilecektir. $b \rightarrow a$ önermesine göre de her b harfi a harfi ile değiştirilecektir. Yeniden yazma işlemi, belit adında önceden belirtilmiş bir dizgiyle başlar. Örneğin belitin sadece b harfinden oluştuğu bir yeniden yazma sisteminde, yukarıda tanımlanmış olan kurallar doğrultusunda, ilk türetmede b nin yerini, $b \rightarrow a$ kuralı nedeni ile a alır. İkinci türetme adımında ise a, $a \rightarrow ab$ kuralı nedeniyle a bile değiştirilir. Elde edilen ab dizgisi, iki harften oluşmaktadır ve bu harfler bir sonraki türetme adımında aynı anda yer değiştirirler. Bu nedenle a, a bile b ise a ile değiştirilerek aba dizgisi ortaya çıkar. Aynı şekilde bir sonraki türetimlerde,

- aba, abaab 'ye,
- abaab, abaababa'ye,
- abaababa, abaababaabaab 'ye dönüşür (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : DOL-sisteminde üretim (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

DOL-sistemleri aşağıdaki sembollerle ifade edilip üretilmektedirler (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996):

$$G = (V, \omega, P)$$

G: DOL-sistemi

V: $\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ farklı sembollerden oluşan alfabeyi,

ω : Beliti (axiom),

P: Sonlu elemana sahip üretimler kümesini temsil eder.

DOL-sisteminde üretim,

ÖNCÜL \rightarrow ARDIL

şeklinde gerçekleşmektedir.

İlk verilen DOL-sistemi örneği, yukarıdaki semboller kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V = \{A, B\}$$

$$\omega = A$$

$$p_1 = A \rightarrow AB$$

$$p_2 = B \rightarrow BA$$

Bu üretim adımı özyineleme sayısı n 'ye göre tekrar edilir:

n = 0 : A
n = 1 : AB
n = 2 : ABBA
n = 3 : ABBABAAB
n = 4 : ABBABAABBAABABBA

Üstte oluşturulan dizgiler, sürecin büyüme hızı ve sıklığını göstermektedir. Ama bu örnekte karakterlerin harflerin kendileri, onlara bir anlam atanmadığından dolayı, bir anlam içermemektedirler.

Aşağıdaki örnekte ise sembollerin kullanıldığı bir alfabeyi, beliti ve üretim kurallarını içeren bir DOL-sistemi gösterilmiştir:

$V = \{F, +, -\}$

$\omega: F+F+F+F$

$p: F \rightarrow F+F-FF$

Yukarıda örnek verilen DOL-sistemi, n sayısı kadar özyinelemede aşağıdaki sonuçları üretir:

n = 0 : F+F+F+F
n = 1 : F+F-FF+F+F-FF+F+F-FF+F+F-FF
n = 2 : F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF
n = 3 : F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF-
F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FFF+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF-F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FFF+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-

FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF-F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FFF+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF+F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-
FF-F+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FFF+F-FF+F+F-FF-F+F-FFF+F-FF

Yukarıda da görülebileceği üzere; dizginin boyutu, hızlı ve bir biçimde ve tekrar eden şablonlar görünür biçimde devam etmekte ve dizginin kendisinin kendine benzerlik bulundurmasına neden olmaktadır (McCormack, 2008).

3.3 Dizgilerin Kaplumbağa Grafikleri ile Yorumlanması

Lindenmayer sistemleriyle ortaya çıkarılan dizgilerin görselleştirilmesi, bilgisayar ortamında kaplumbağa grafikleri (turtle graphics) olarak adlandırılan görselleştirme yöntemi gibi araçlarla gerçekleştirilir (Güdükbay ve diğerleri, 2001). Kaplumbağa (turtle) kavramı, 1950 yılında bilimadamı Grey Walter'ın yaptığı küçük bir mekânîk robota dayanmaktadır (Url-2). Robot, kendisine verilen komutları yerine getirebilmesi için gerekli olan elektronik parçaları koruyan bir kabuğa sahiptir ve bu nedenle de robota, kaplumbağa adı verilmiştir. 1960 yılında MIT'de Seymour Papert ve araştırma grubu, Logo adlı programlama diliyle çalışan, çocuklar tarafından hareketleri programlanabilecek benzer bir robot kaplumbağa yapmışlardır. Bu çalışmanın amacı, Logo programlama dilini kullanarak çocuklara matematikle oynamanın yeni bir yolunu sunmaktır. Sonrasında bilgisayarların yaygınlaşmasıyla bu eğitim aracı, bilgisayar ortamına geçmiş ve kaplumbağa grafikleri adını almıştır (Url-2).

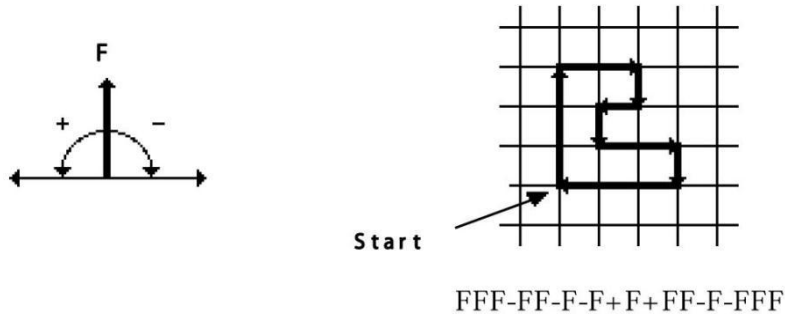
3.3.1 İki boyutlu yorumlanma

Kaplumbağa grafiklerinde bahsi geçen kaplumbağanın konumu, Kartezyen (Cartesian) koordinatları (x,y) ve kaplumbağanın yönelimini betimleyen açı (α) ile belirlenir. Adım boyutu için d ve açı artma miktarını temsil etmek için de δ sembolleri kullanılır. Böylece kaplumbağa bu sembollerle verilen komutlara yanıt verebilir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996). Bu sayede üretilen dizgilerin dikte ettiği hareketi yaparak arkasında çizgi halinde iz bırakır. Kaplumbağanın çizim yaparken istenmeyen noktalardan geçmesine rağmen iz bırakmaması, konulan üretim kuralları arasındaki bir sembolle sağlanabilir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Kaplumbağa komutları, aşağıdaki gibidir:

- F İleriye doğru d uzunluğunda bir adım at. Kaplumbağanın konumu (x', y', α) değiştirir. Burada $x' = x + d \cos \alpha$ ve $y' = y + d \sin \alpha$ şeklindedir. (x, y) ve (x', y') noktalarının arasına çizgi çizilir.
- f İleriye doğru çizgi çizmeden d uzunluğunda bir adım at.
- + Sola δ açısı kadar dön. Kaplumbağanın bir sonraki konumu $(x, y, \alpha + \delta)$ 'dur.
- Sağa δ açısı kadar dön. Kaplumbağanın bir sonraki konumu $(x, y, \alpha - \delta)$ 'dur.

Bu sembollerin (alfabenin) kullanılmasıyla türetilen komutlarla yönlendirilen kaplumbağanın çizdiği geometrinin oluşumu adım adım gözlemlenebilmektedir (Şekil 3.4).



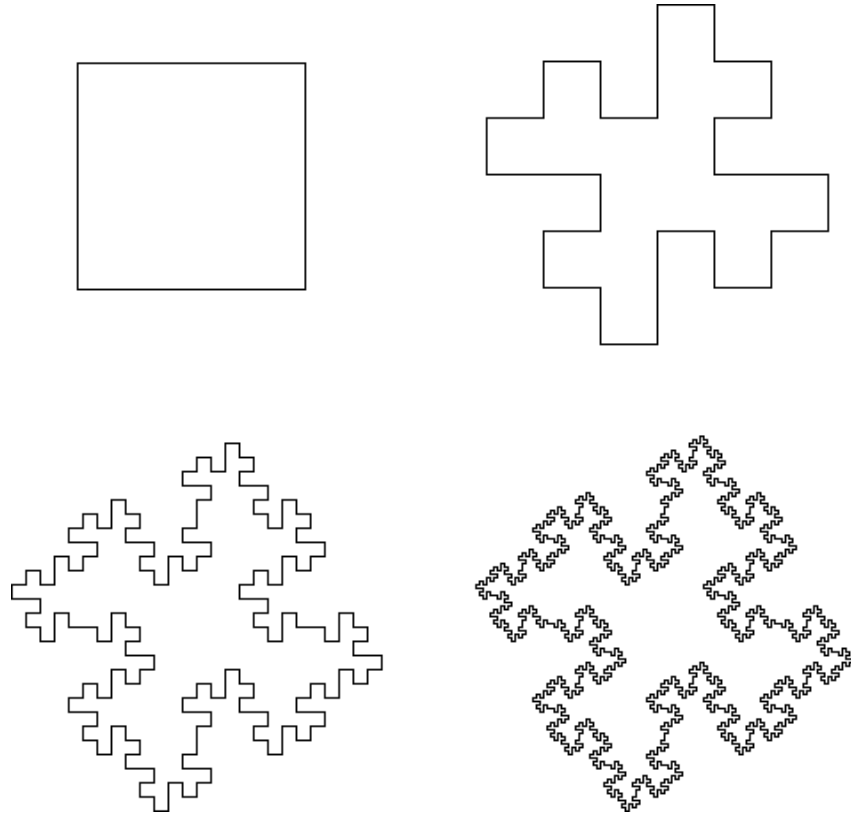
Şekil 3.4 : Kaplumbağanın hareket şeması ve oluşturulan dizgiye göre hareketi (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Koch Adası Eğrisi'nin n özyineleme sayısına bağlı üretimleri gösterilmiştir (Şekil 3.5). Özyineleme sayısı arttıkça geometrinin kendini tekrarlayarak karmaşıklaştığı gözlemlenebilir. Üretimler, aşağıdaki L-sisteminin ürettiği dizgilerin kaplumbağa tarafından kurallara uygun bir biçimde çizilmesiyle oluşmuştur. Aşağıda L-sistemi oluşturan alfabe, belit ve üretim kuralı verilmiştir:

$$V = \{F, +, -\}$$

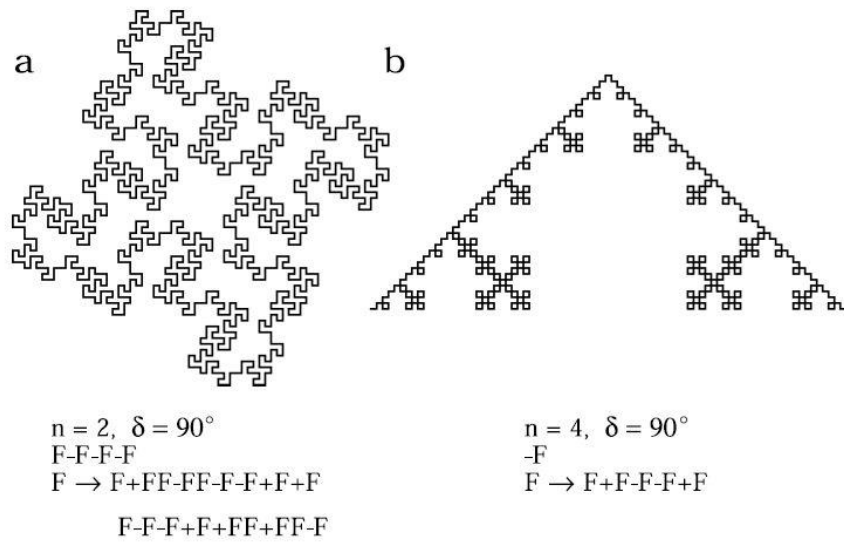
$$\omega: F-F-F-F$$

$$p: F \rightarrow F-F+F+FF-F-F+F$$



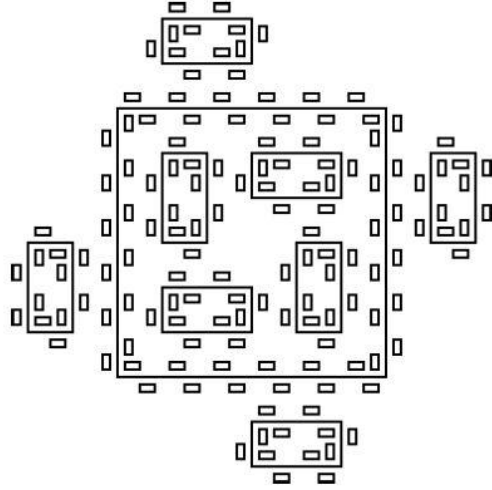
Şekil 3.5 : Koch Adası Eğrisi'nin özyineleme sayısı $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4$ olacak şekilde gösterimi (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de kaplumbağa grafikleriyle farklı belitlere sahip L-sistemlerinin temsili yapılmıştır. Şekil 3.6'daki a şekli, Kareli Koch Adası olarak adlandırılırken, b şekli ise Koch Eğrisi'nin dik açılardan yararlanılan bir varyasyonudur.



Şekil 3.6 : Farklı belitlere, kurallara ve özyineleme sayılarına sahip L-sistem gösterimleri (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Çizgi çizmeme komutunu (f) içeren L-sistem üretimi Şekil 3.7'de gösterilmiştir. (f) komutunun uygulandığı konumlarda kaplumbağa çizgi çizmeden dizginin verdiği komutlara uyarak yer değiştirme yapmıştır. Sonra (F) komutunu (çizgi çizme komutu) aldığıında kaldığı yerden devam etmiştir. Bu sayede ortadaki biçimden kopuk olarak türetilen çevre adaları oluşturabilmiştir.

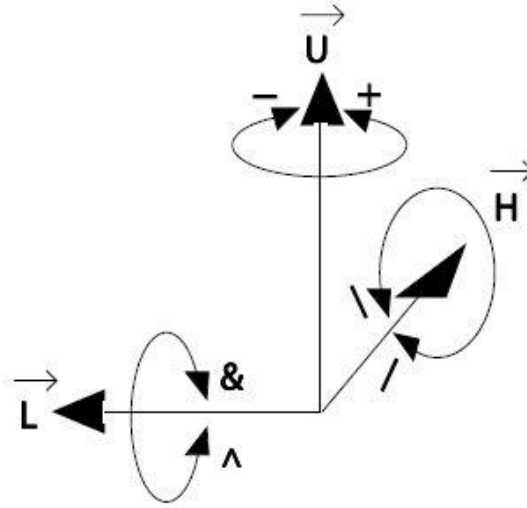


$$\begin{aligned}
 n &= 2, \quad \delta = 90^\circ \\
 F &+F+F+F \\
 F &\rightarrow F+f-FF+F+FF+Ff+FF-f+FF-F-FF-Ff-FFF \\
 f &\rightarrow fffff
 \end{aligned}$$

Şekil 3.7 : Kaplumbağa grafiklerinin çizgi çizmeme özelliğinin kullanıldığı bir L-sistem gösterimi (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

3.3.2 Üç boyutlu yorumlanma

Lindenmayer sistemlerinin ikinci boyutta sahip oldukları türetim özellikleri gerekli parametrelerin sağlanmasıyla üçüncü boyuta da taşınabilmektedir. Bu sayede L-sistemlerinin uzayda oluşturdukları doğru parçalarının sınırlarını belirledikleri hacimleri oluşturmak mümkün olmaktadır. Lindenmayer sistemlerinin kaplumbağa yorumlaması üçüncü boyuta Abelson ve diSessa'nın yöntemleri kullanılarak taşınabilir. Burada en önemli nokta kaplumbağanın uzaydaki konumu H, L ve U vektörleriyle kaplumbağanın yönelimini, sola doğru olan yönelimini ve yukarıya doğru olan yönelimini belirtmektir. Bu vektörler uzunluk birimine sahiptirler. Vektörler birbirlerine diktirler ve $\vec{H} \times \vec{L} = \vec{U}$ bağıntısını sağlarlar (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996). Şekil 3.8'de bu vektörler ve birbirleriyle olan geometrik ilişkileri ile kaplumbağayı yönlendiren komutlar yönleriyle birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Kaplumbağanın üç boyutta kontrol edilişi (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Kaplumbağanın dönüşleri aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} \vec{H}' & \vec{L}' & \vec{U}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{H} & \vec{L} & \vec{U} \end{bmatrix} \mathbf{R},$$

Denklemdaki \mathbf{R} , 3×3 dönüş matrisidir. \vec{H} , \vec{L} , \vec{U} vektörlerine ait olan a açısına bağlı dönüşler aşağıdaki matrislerde gösterilmiştir:

$$\mathbf{RU}(a) = \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{RL}(a) = \begin{bmatrix} \cos a & 0 & -\sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin a & 0 & \cos a \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{RH}(a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & -\sin a \\ 0 & \sin a & \cos a \end{bmatrix}$$

Aşağıdaki semboller uzaydaki kaplumbağa hareketlerini kontrol ederler:

- + Sola δ açısıyla dönme, $\mathbf{R}_U(\delta)$ matrisine göre dönme.
- Sağa δ açısıyla dönme, $\mathbf{R}_U(-\delta)$ matrisine göre dönme.

& δ açısıyla aşağı yunuslama (pitch), $R_L(\delta)$ dönüş matrisine göre dönme.

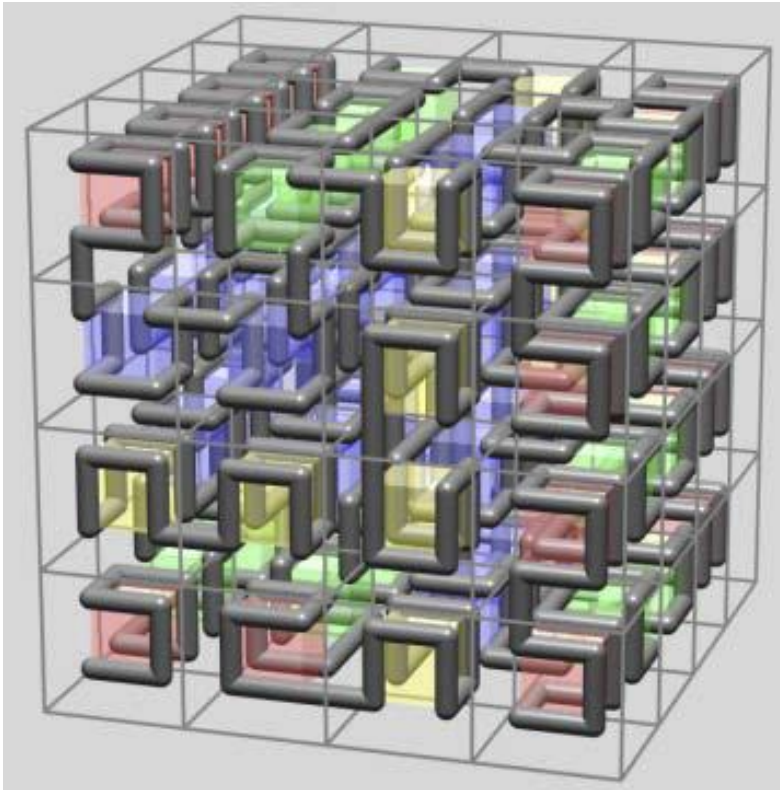
\wedge δ açısıyla yukarı yunuslama, $R_L(-\delta)$ dönüş matrisine göre dönme.

\backslash δ açısıyla sola yuvarlanma, $R_H(\delta)$ dönüş matrisine göre dönme.

/ δ açısıyla sağa yuvarlanma, $R_H(-\delta)$ dönüş matrisine göre dönme

| Etrafında dönme, $R_U(180^\circ)$ dönüş matrisine göre dönme.

Bu sembollerin kullanımına örnek olarak üç boyutlu Hilbert Kübü verilebilir (Şekil 3.9):



Şekil 3.9 : Hilbert Kübü (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

$n=2, \delta=90^\circ$

A

$A \rightarrow B-F+CFC+F-D&FAD-F+&&CFC+F+B//$

$B \rightarrow A&FACFB\wedge F\wedge D\wedge\wedge-F-D\wedge|F\wedge B|FC\wedge F\wedge A//$

$C \rightarrow |D\wedge|F\wedge B-F+C\wedge F\wedge A&&FA&F\wedge C+F+B\wedge F\wedge D//$

$D \rightarrow |CFB-F+B|F\wedge A&F\wedge A&&FB-F+B|FC//$

A harfi kırmızı, B harfi mavi, C harfi yeşil ve D harfi de sarı renkli çerçeveler ile temsil edilmiştir (Şekil 3.9).

3.4 Dallanan Yapılar

Önceki başlıklarda gösterilen kurallara göre kaplumbağa, sembol dizgilerini bir dizi çizgi parçası olarak yorumlar. Çizgilerin parça uzunlukları ve onların aralarındaki açılara göre elde edilen çizgi, kendi ile çakışıp çakışmasa da, kıvrılabilir ve bazı parçalar defalarca üst üste gelecek şekilde çizilebilir. Bu nedenle kaplumbağa tarafından çizilmiş çizgi parçaları, bu çakışmadan dolayı diğer çizgi parçalarının altında kalıp görünmeyebilirler ve dolayısıyla bakıldığında tek bir çizgiden oluşuyormuş gibi görünebilirler. Bitki türlerinin çoğunluğu dallanan yapılardan oluşmaktadır. Bu nedenle ağaç benzeri yapıları modellemek için gerekli olan matematiksel tanımlamalar L-sistemleriyle yapılmıştır (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

3.4.1 Parantezli OL-sistemleri

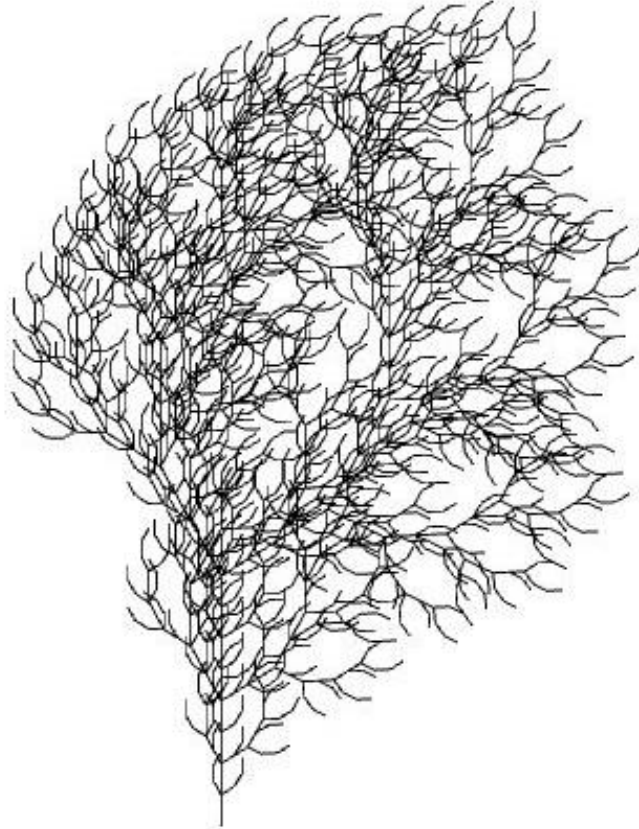
Yukarıda gösterilen örneklerin hepsi tekil bilgi akışına sahiptir. Bu bir çizgi olarak yorumlanabilir ve kendisiyle kesişebilir ya da sarmal oluşturabilir. Bitki türleri çoğunlukla dallanan yapılardan oluşmaktadır ve bunu düzgün bir biçimde modelleyebilmek için buna uygun bir matematiksel tanıma ihtiyaç vardır. Bu da DOL-sistemlerinde dizgilere parantez uygulayarak sağlanmıştır (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

Parantezli bir L-sisteminde üretimin ardılı, bir veya birden fazla dallanma sembolü barındırabilir. Sonra öncül bir ardıl kelimeyle (dallanma içeren) değiştirilir. Dallanma sembolü bir dallanmayı başlattığında yeni bir veri katarı yaratılmış olunur. Topolojik temsillerde dallanma sembolleri, yığta koyma veya yığıttan alma işlemleri olarak işlev görürler. Oluşan yeni dallanma sistemi yeni pozisyonu alırken üretilen yeni dallanmanın diğer özelliklerini de alır. Dallanma sembollerinin içindeki dizgi veri katarı uzunluğunu içerir. Bir dallanmayı sınırlandırmak için genellikle aşağıdaki iki sembolden yararlanır:

- [yeni bir yığta başlamak ya da var olana veri koymak
-] yığıtı durdurmak veya çekmek

F]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-[-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]]+[+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]]FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-[-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]]+[+FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]-FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]]

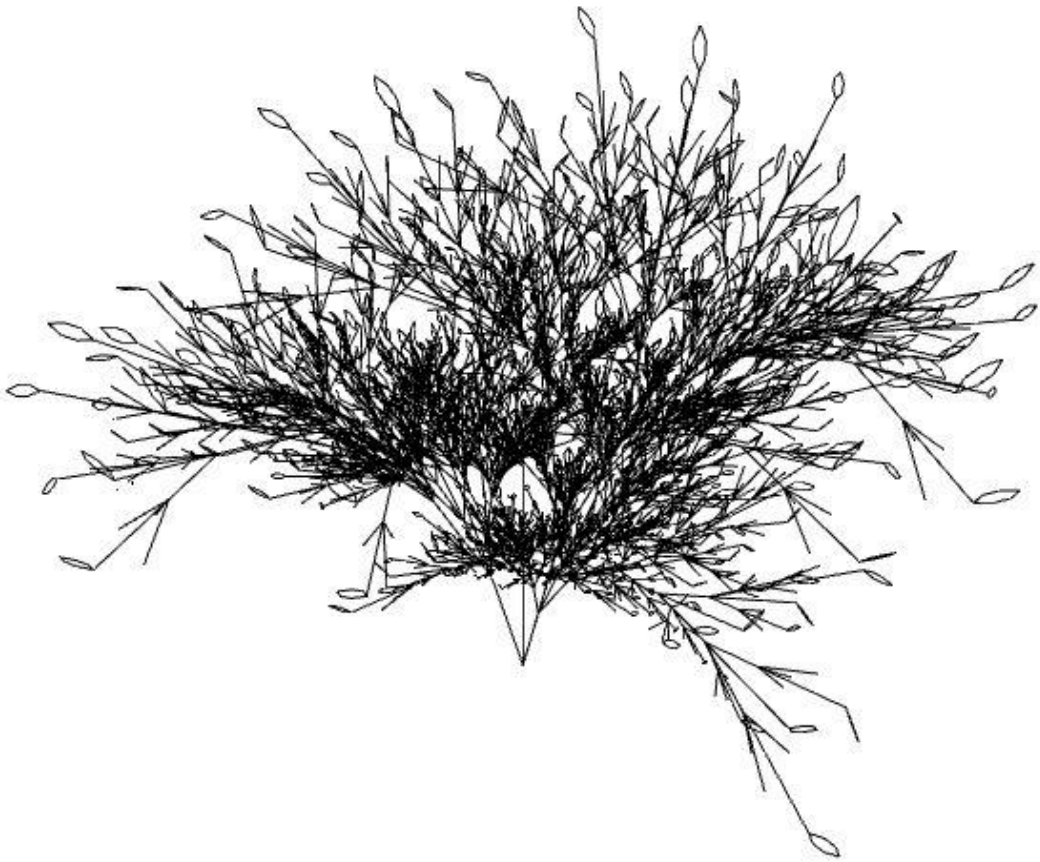
Yukarıda örnek olarak verilen parantezli L-sisteminin Rhinoceros yazılımının bir eklentisi olan Grasshopper yazılımının Rabbit adlı eklentisi ile özyineleme sayısı $n = 4$ ve $\delta = 22^\circ$ değerlerine göre kaplumbağa temsili Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Üretilen geometri iki boyutludur. Kaplumbağanın çizdiği kimi çizgi parçalarının üst üste bindiği bir üretilimdir.



Şekil 3.10 : Parantezli L-sisteminin Grasshopper yazılımı ortamında oluşturulmuş $n = 4$ ve $\delta = 22^\circ$ değerlerine göre üretimi.

3 boyutlu bir örnek için, kaplumbağanın 3. boyuttaki hareketlerini düzenleyecek komutlara ihtiyaç vardır. 3 boyutlu örnekte, parantezli L-sistemle çalı benzeri bir

yapı oluşturulmuştur. p_1 üretimi eski dalın ucundan üç yeni dal oluşturur. Bir dal F kenarıyla ilk boğumu oluşturur. L yaprağı, A ise sonradan üç yeni dal oluşturacak olan uç bölümünü temsil eder. p_2 ve p_3 üretimleri ise, boğum gelişimini niteler. Sonraki özyineleme adımlarında boğum uzamaya başlar ve yeni yapraklar oluşturur. p_4 üretimi ise yaprakları oluşturacak 6 kenarlı poligonu belirtir. Sınırları F kenarlarıyla $\{$ ve $\}$ parantezleri arasında oluşturulur. $!$ ve $'$ sembolleri ise parçaların çap büyüklüklerini belirler. Üç boyutlu geometri, Rabbit eklentisi kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Grasshopper yazılımı ortamında oluşturulmuş üç boyutlu çalı benzeri yapı.

$$n = 7, \delta = 22^\circ$$

$$\omega : A$$

$$p_1 : A \rightarrow [\&FL!A] // // // [\&FL!A] // // // [\&FL!A]$$

$$p_2 : F \rightarrow S // // // F$$

$$p_3 : S \rightarrow FL$$

$$p_4 : L \rightarrow [{}^{\wedge}\{-F+F+F-|-F+F+F\}]$$

3.5 Olasılıksal (stokastik) L-sistemleri

Nedenselci (determinist) L-sistemlerinde üretim her zaman aynı gelişim adımını üretir, bu da aynı dizginin üretilmesine neden olur. Bu tahmin edilebilirlik, Lindenmayer sistemlerini bir modelleme aracı olarak kullanmak adına yararlı kılar ama bu her zaman istenen bir özellik değildir. Varyasyon, yorumlama aşamasını, L-sistemi ya da her ikisini rastlantısal hale getirerek de yapılabilir. Yorumlama aşamasını rastlantısallaştırmak topolojiyi değişmeden bırakırken, üretimlerin olasılıksal veya tahmincil uygulaması hem topolojiyi hem de geometriyi etkiler (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996). Stokastik bir OL-sistemi şu dörtlüyle çağrılır:

$$G\pi = (V, \omega, P, \pi)$$

V, alfabeyi,

ω , beliti,

P, üretim kurallarını belirler.

$\pi : P \rightarrow (0, 1]$ fonksiyonu olasılık dağılımını sağlar ve üretim olasılıklarını sıralar.

Her $a \in V$ için, a öncüllü bütün üretimlerin olasılıkları toplamı 1'e eşittir. $G\pi$ 'deki $\mu \Rightarrow V$ olasılıksal türetimi her μ kelimesindeki her a harfi oluşumunda oluşur. (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996). Nedenselci olmayan kurallar:

$$\text{ÖNCÜL} \xrightarrow{\text{OLASILIK \%}} \text{ARDIL}$$

şeklindedir.

Bu nedenle yeniden yazma aşamasında herhangi bir kuralın sembol üzerinde uygulaması, her kurala atanmış olan oluşma olasılığına bağlıdır. Üretim olasılıkları türetim sembolünün üzerinde listelenmiştir. Basit bir örnekle:

$$V = \{A, B\}$$

$$\omega : A$$

$$p_1 : A \xrightarrow{\%70} AB$$

$$p_2 : A \xrightarrow{\%30} BA$$

$$p_3 : B \rightarrow A$$

Şeklinde anlatılabilir. Bu, n sayısında özyineleme ile aşağıdakini türetir:

$$n = 0 \quad : A$$

$$n = 1 \quad : AB$$

$$n = 2 \quad : ABA$$

$$n = 3 \quad : BAAAB$$

veya

$$n = 0 \quad : A$$

$$n = 1 \quad : BA$$

$$n = 2 \quad : AAB$$

$$n = 3 \quad : BABAA$$

olasılığa bağlı olarak yukarıdaki dizgiler elde edilebilir.

$$V : \{F, +, -\}$$

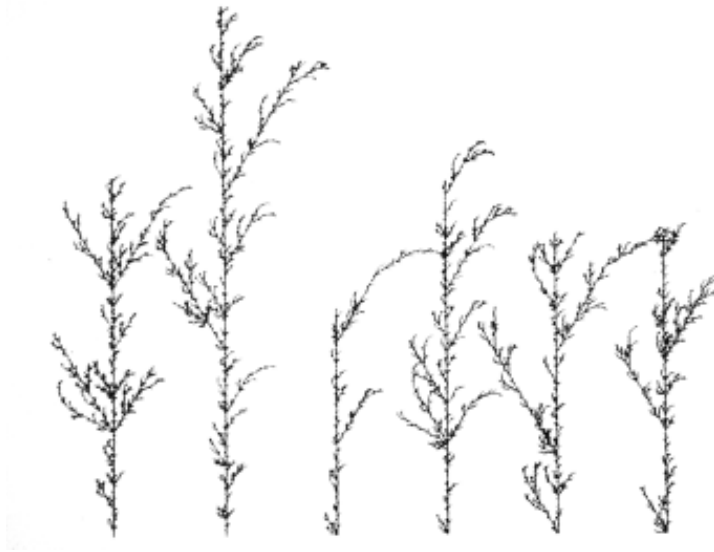
$$\omega : F$$

$$p_1 : F \xrightarrow{\%33} F[+F]F[-F]F$$

$$p_2 : F \xrightarrow{\%33} F[+F]F$$

$$p_3 : F \xrightarrow{\%33} F[-F]F$$

Yukarıda listelenen üretim olasılıkları \rightarrow sembolünün üzerinde yazılmıştır. Her bir üretim yaklaşık olarak 1/3 olasılıkla gerçekleşme şansına sahiptir. Kullanılan L-sistem tarafından 5. özyineleme sayısına göre üretilmiş dallanan yapı Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Şekildeki dallanan yapı örnekleri farklı görünümüne rağmen aynı bitki türüne aittir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).



Şekil 3.12 : Olasılıksal dallanan yapılar (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996).

3.6 Bağlama Duyarlı L-sistemleri

OL-sistemleri, bağlamsız olduklarından dolayı öncüllerinin olduğu her bağlamda uygulanabilirlerken, diğer gramerlerde üretim uygulaması öncüllerin bağlamına duyarlı olabilir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1996). L-sistemlerinin çeşitli bağlama duyarlı eklentileri burada incelenecektir. 2L üretimi hem sağ hem de sol bağlama sahiptir ve üretimi şu şekilde yazılır:

$$al < a > ar \rightarrow X$$

Burada a harfinin (kesin öncül olarak adlandırılan), X kelimesini (ardıl) yaratması, öncül olarak al 'ye ve ardıl olarak da ar 'sahip olması koşuluna bağlanmıştır. Bu nedenle al ve ar harfleri, bu üretimin sol ve sağ bağlamı olarak adlandırılır.

1L üretimleri sadece tek taraflı bağlama sahiptirler ve

$al < a \rightarrow X$ veya $a > ar \rightarrow X$

olmak üzere iki şekilde yazılabilmektedirler.

1L kuralı tek bağlamlı 2L kuralı olarak da adlandırılabilir. Buna bağlı olarak, bağlama duyarsız kural da her iki bağlamı da boş olan bir 2L kuralı olarak görülebilir. Bu da bir sisteme çeşitli tipte kurallara sahip olma imkanı sağlar. 1L sistemine örnek olarak, bağlamı, sembol dizgileri ile bir sinyal yayılımını taklit edecek şekilde kullanılması verilebilir (Prusinkiewics ve Lindenmayer, 1990):

$V = \{a,b\}$

$\omega = baaaaaaaa$

$P1 = b < a \rightarrow b$

$P2 = b \rightarrow a$

Bu özdöngü (iteration) sayısı n'ye bağlı olarak aşağıdaki dizgileri yaratır:

$n = 0$: baaaaaaaa

$n = 1$: abaaaaaaaa

$n = 2$: aabaaaaaaaa

$n = 3$: aaabaaaaaa

$n = 4$: aaaaabaaa

Yukarıda da görüldüğü gibi, özyineleme sayısı arttıkça b harfinin soldan sağa doğru hareket ettiği gözlemlenir.

3.7 Lindenmayer Sistemleri'nin Form Tasarımında Kullanımı

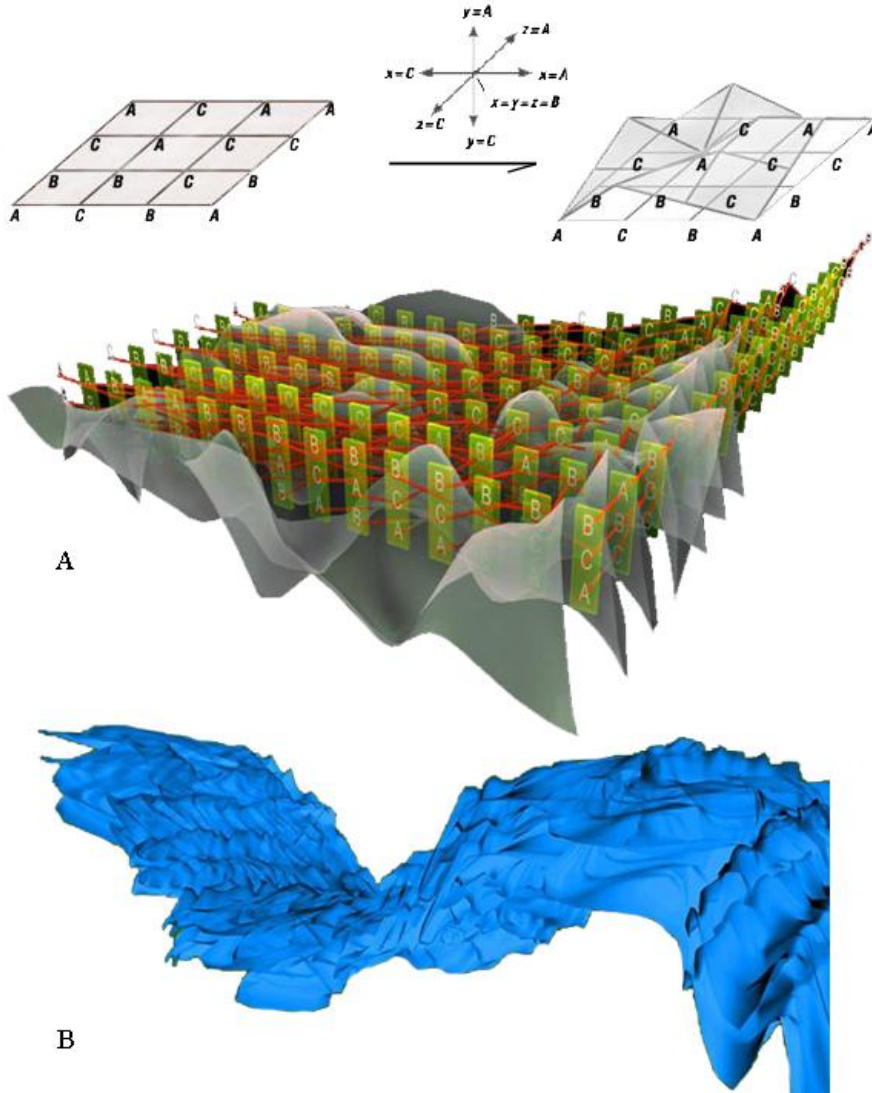
Form tasarım süreçlerinde L-sistemlerinden yararlanılabilmektedir. L-sistemleri, formu ortaya çıkaran geometriyi oluşturmada tasarımcıya destek olur. L-sistemlerinde tasarım bileşenleri, öncelikle dizgiler halinde sembolize edilirler. Çeşitli dizi yeniden yazma mekânizmalarıyla tasarımın temsili oluşturulur (Singh ve Gu, 2011). Bu temsili kaplumbağa grafikleri gibi görselleştirme yöntemleriyle geometriye dönüştürerek, tasarımcının kural tabanlı sistemi, neden-sonuç ilişkisi bakımından algılamasını sağlar. L-sistemlerinin özdöngüler arasındaki farklı aşamaların ayrı ayrı gözlemlenebilmesi sayesinde tasarımcı, sadece son ürün yerine, kavramsal olarak, aynı bitkilerde olduğu gibi bir büyüme ve gelişmeyi gözlemleyebilir. Bu sayede tasarımcı tasarım bileşenlerinin organizasyonunu gözlemleyebilmektedir.

L-sistemlerinin üretken bir sistem olarak kullanıldığı tasarım süreci, L-sistemlerinin değişkenler, belit ve üretim kurallarından oluşan kural tabanlı yeniden yazma sisteminin harf dizgisi oluşturmasıyla başlar. Bu harf dizgilerini üreten kural tabanlı yeniden yazma sisteminin özyineleme sayısının arttırılıp azaltılmasıyla daha uzun harf dizgileri oluşturulabilir. Ortaya çıkan son harf dizisi, kaplumbağa grafikleri gibi görselleştirme yöntemleriyle geometriye dönüştürülür. Bu noktada tasarımcı, L-sistemlerini oluşturan belit, üretim kuralları, özyineleme sayısı, kaplumbağanın adım uzunluğu ve açısı gibi çok sayıda değişken üzerinde oynamalar yaparak, yeni tasarımlar ortaya çıkarabilir veya tasarım üzerinde değişiklikler yapabilir. L-sistemlerinin kolaylıkla öngörülemeyen yapısı nedeniyle deneme yanılma süreci yaşayabilir. Sonra oluşan geometri CAD (Computer Aided Design) yazılımlarında incelenip, üzerinde değişiklik yapılabilecek bir ürünle son bulur. Bu sayede tasarımcı son ürünün üretilebilirliğini ve uygulanabilirliğini sınaama şansına sahip olur.

Harf dizgilerinden yola çıkarak CAD yazılımları tarafından incelenip, deforme edilebilen bu çalışma akışı, basitten karmaşığa giden bir süreçtir. Tasarımcı son üründen memnun kalmadığında, ya da gelişimi izlerken daha son ürüne varmadan isteği dışındaki bir doğrultuda ilerleyen tasarımı durdurarak tasarım sürecine yeniden başlayabilir. Böylece değişik gramerleri, kuralları ve özyineleme sayıları denemek suretiyle çok sayıda olasılığı gözden geçirmiş olur.

Michael Hansmeyer, tasarımlarında L-sistemlerini kullanarak çeşitli formlar ortaya çıkarmıştır. L-sistemlerini ve onun alt kategorilerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek tasarımlar üretmiş ve 2003 yılında "L-systems in Architecture" adlı bir çalışma yayınlamıştır (Hansmeyer, 2003). Bu çalışmada yeniden yazma sistemi olarak L-sistemlerini kullanmıştır. Görselleştirme yöntemi olarak ise kaplumbağa grafiklerinin yanında dizgi haritalama yönteminden de yararlanılmıştır. Hansmeyer'in çalışmalarında L-sistemleri çeşitli formlar ve mekânsal kurgular oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışma, haritalama, kaplumbağa grafikleri ve parametrik sistemler olmak üzere üç ana başlıktan oluşmaktadır.

Haritalama başlığında, L-sistemleri tarafından oluşturulan dizgi, haritalama yöntemi kullanılarak formlar oluşturulmuştur (Şekil 3.13). Haritalama yöntemi yüzeyler, tekil objeler ve form türetme olmak üzere üç farklı yöntemle uygulanmıştır.



Şekil 3.13 : Yüzele uygulanan haritalama yöntemi (Hansmeyer, 2003).

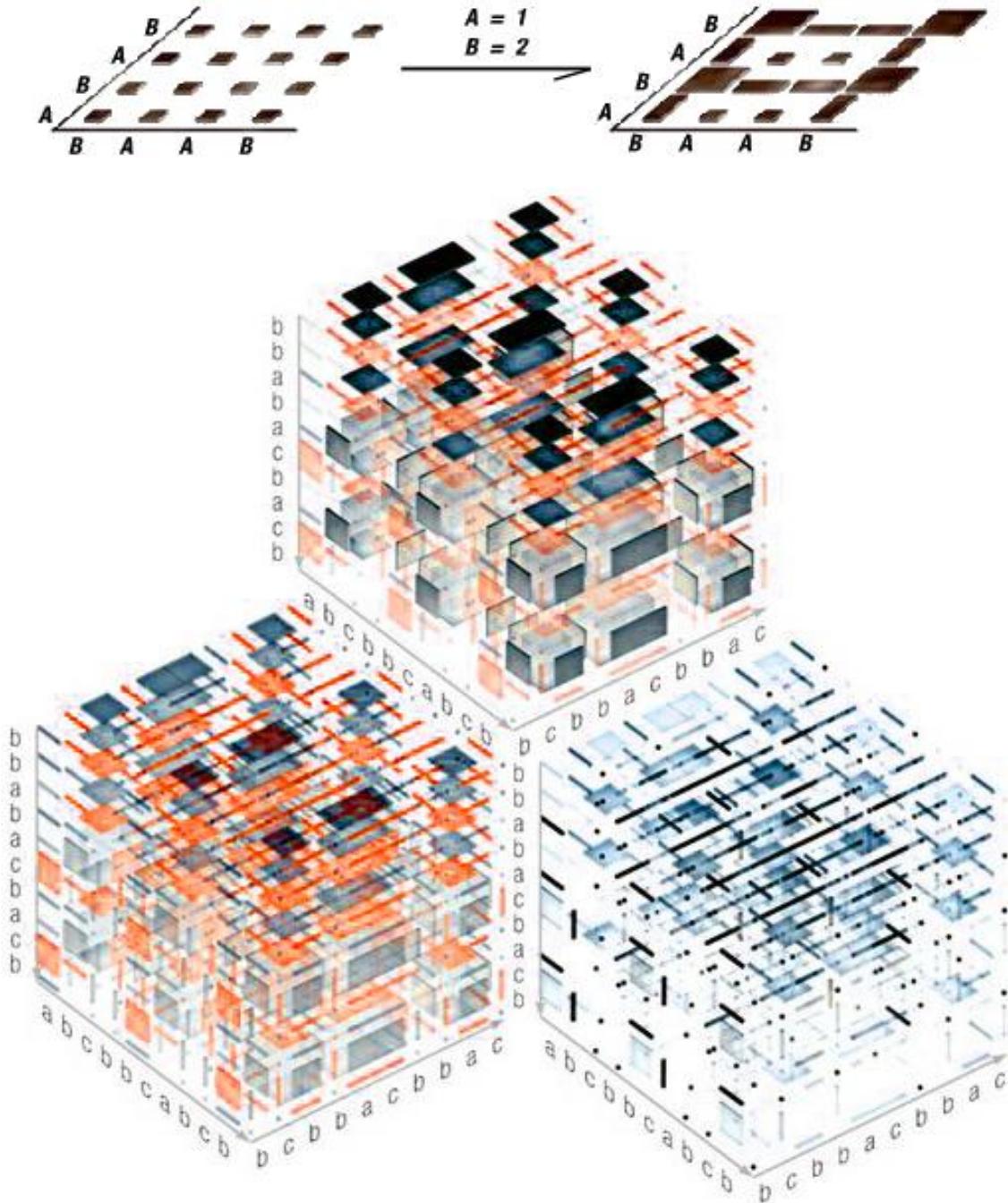
Yüzeyle uygulanan haritalama yönteminde, L-sistemi tarafından oluşturulan dizgideki her harfe sayısal bir değer atanır (A=0, B=1, C=2). Sonraki aşamada bu harfler, XY düzleminde yüzeyi oluşturan vertex'lere (yüzeyi oluşturan ızgaranın kesişim noktaları) atanır. Harfler onlara atanmış olan sayısal değerlere göre arandıkları vertex'leri Y eksenini doğrultusunda taşırlar. Böylece ortaya düzlemsel olmayan bir yüzey çıkar (Şekil 3.13).

Tekil objelere uygulanan haritalama yönteminde ise L-sistemlerinin oluşturduğu dizgilerdeki harfler objelerin oran ve dönme gibi özelliklerini belirtir. Harflerin sayısal karşılıkları vardır (A=0, B=1, C=2) ve her obje bu sayı değerlerine bağlı olarak oranlanır yada döndürülür (Şekil 3.14).



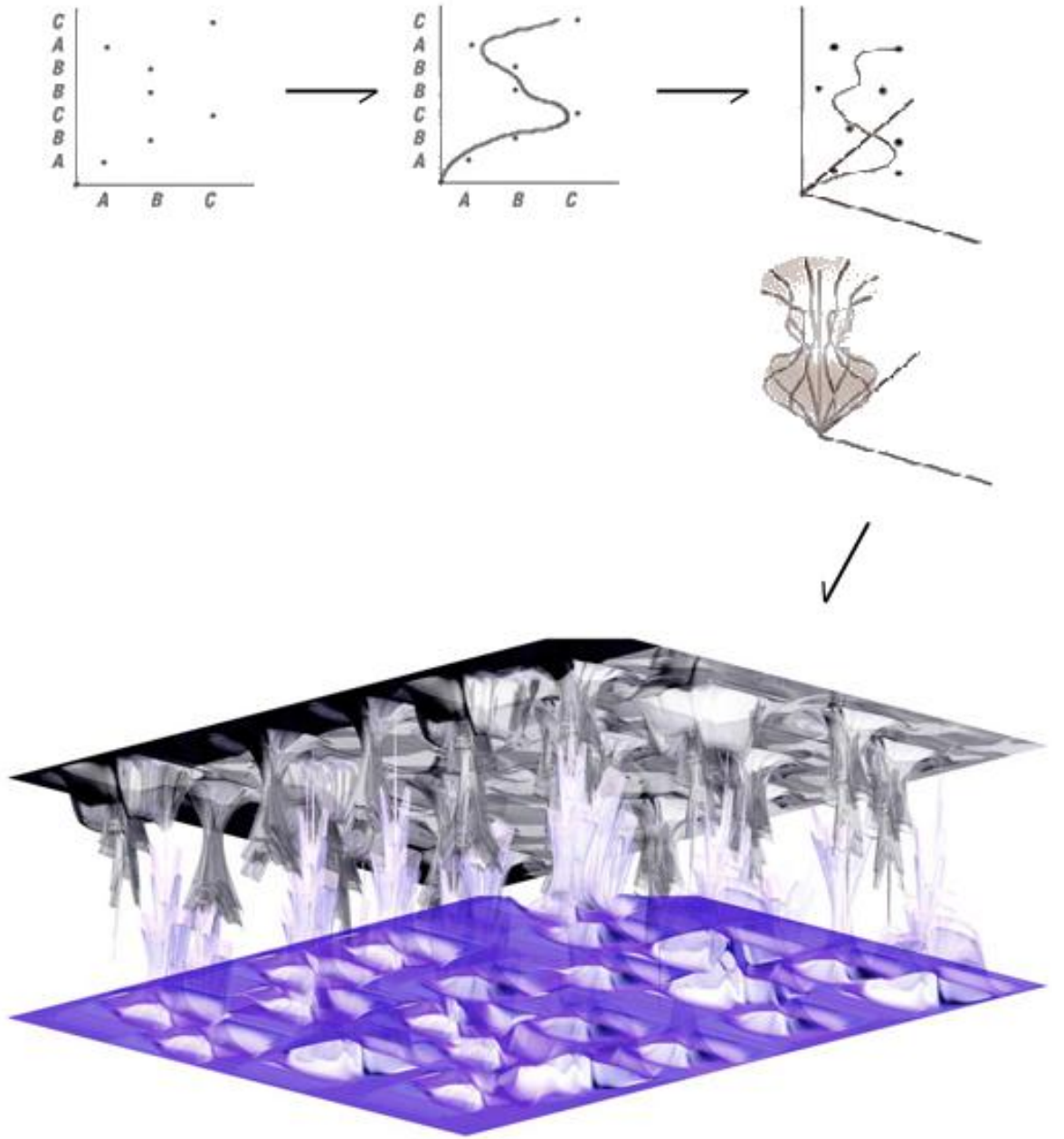
Şekil 3.14 : Tekil objelere uygulanan haritalama yöntemi (Hansmeyer, 2003).

Bir başka tekil objelere uygulanan haritalama yöntemi ise, L-sistemin oluşturduğu dizginin X ve Y eksenlerini oluşturduğu bir ızgara sistemiyle uygulanır. Harflere ait eksenlerin kesiştikleri ızgara noktalarına da objeler yerleştirilir. Sonraki adımda bu objeler X ve Y doğrultularında denk geldikleri harflerin sayısal değerlerine göre oranlanırlar. Bu yöntem Z ekseninin de kullanımıyla üçüncü boyuta taşınabilir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 : Tekil objelere uygulanan haritalama yöntemi (Hansmeyer, 2003).

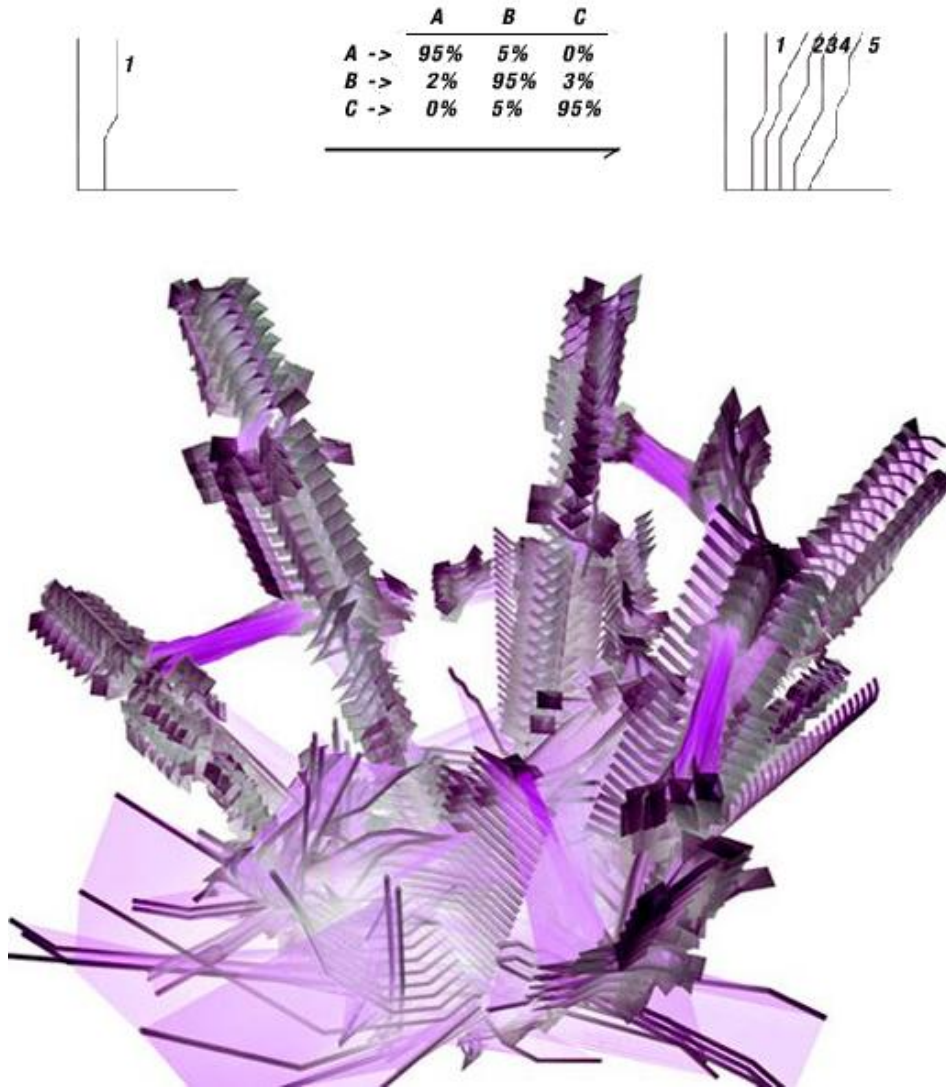
Haritalama yöntemlerinden olan form türetmede, L-sistemin oluşturduğu dizgi, X ve Y eksenli ızgara sistemine kaplumbağa grafikleri kullanılarak haritalanır. Izgaranın bir ekseninde dizgi yer alırken, öteki ekseninde de dizgiyi oluşturan alfabenin harfleri yer alır. Dizgideki harflerle alfabe harflerinin kesişim noktalarına birer nokta konur. Sonraki aşamada, bu noktaların arasına sığacak bir eğri çizilir. Bu eğri, kendi etrafında 360° döndürülerek üç boyutlu form üretilir. İlk iki adım çok sayıda özdöngüyle tekrarlanarak form geliştirilir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Form türetme yöntemi uygulanan haritalama yöntemi (Hansmeyer, 2003).

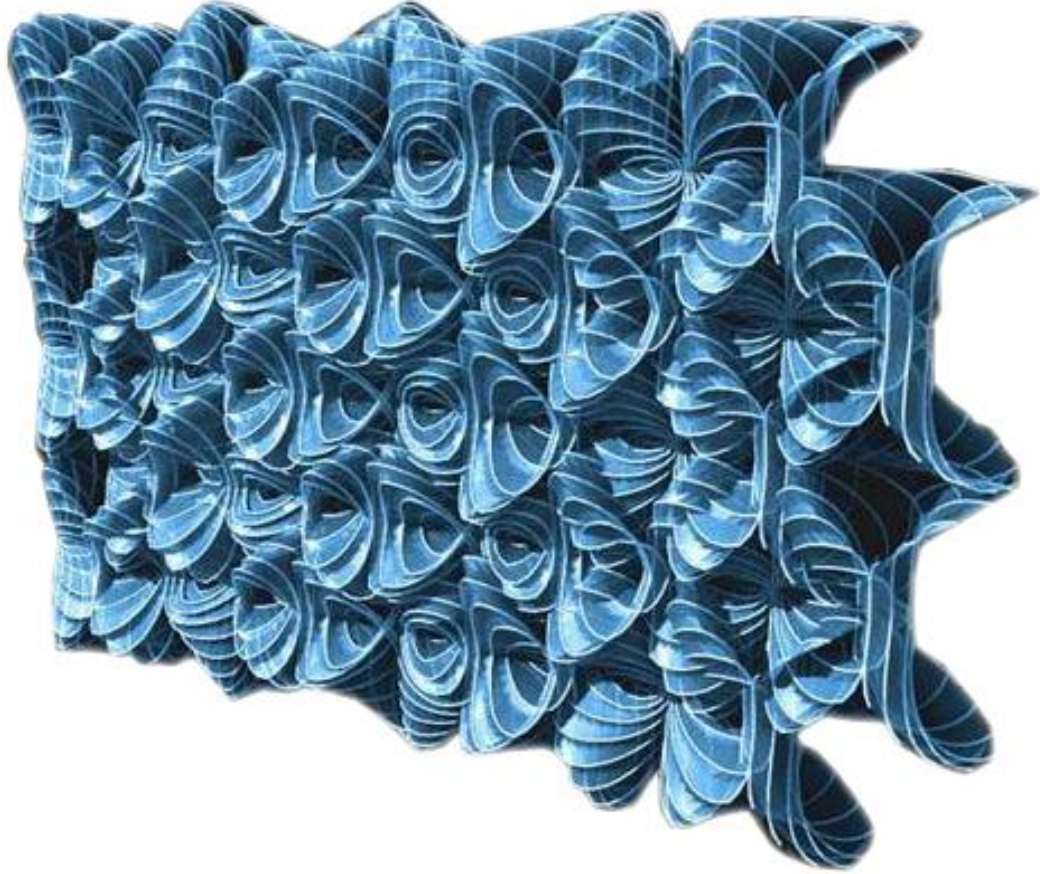
Hansmeyer, çalışmasının ikinci bölümünü kaplumbağa grafikleri ve modüler sistemlerle görselleştirilen L-sistemlerine ayırmıştır. Bu bölümde sırasıyla olasılıksal (stokastik), nedenselci ve modüler L-sistemleri gramerlerini incelemiştir.

Olasılıksal dizgi değiştirme yönteminde sabit üretim kurallarıyla işleyen bir L-sistem yerine, belirli olasılıklar dahilinde işlemeye başlayan üretim kuralları kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, aynı belite sahip olan L-sistemlerinin ortaya çıkardığı ürünler arasında çeşitlilik yaratılmış olur. İlk adımda kaplumbağa sistemleri tek özyinelemeyle oluşturulmuş dizgiyi görselleştirir. Oluşturulmuş dizgideki harfler kendilerine atanmış değiştirilme olasılıklarına göre değiştirilirler. Çok sayıda özyineleme yapılarak, ortaya çıkan geometrilerin birleştirilmesiyle form ortaya çıkar (Şekil 3.17).



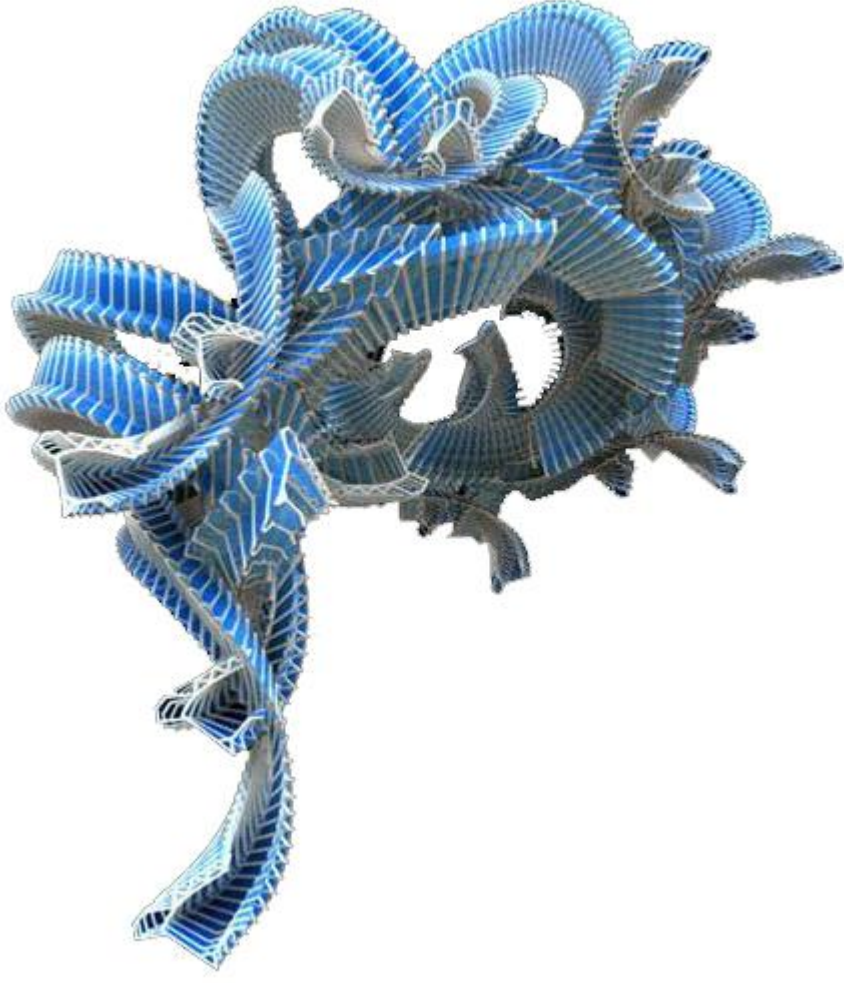
Şekil 3.17 : Olasılıksal kaplumbağa grafikleriyle üretilen form (Hansmeyer, 2003).

Nedenselci olan L-sistemlerinde ise kaplumbağa grafiklerinin yardımıyla üçüncü boyutta dönüş komutlarıyla (+, -, &, ^) çizgi çizilir. Bu çizgi her özyineleme adımında yinelemeli olarak başlangıç noktasından yorumlanırken, kaplumbağanın attığı adımın uzunluğu, her adım (L) için bir özyinelemeden ötekine artar. Yinelemelerin çizgileri arasında kalan alanlar birleştirilerek form oluşturulur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 : Nedenselci kaplumbağa grafikleriyle üretilen form (Hansmeyer, 2003).

Hansmeyer'in kullandığı bir başka nedenselci yaklaşım da dallanan sistemleri kaplumbağa grafikleriyle birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde düzlemde bir profil çizgisi çizilir. Bu profil çizgisi, düzenli aralıklarla L-sistemiyle oluşturulmuş sarmal çizgiye dik olacak biçimde çizilir. Belirli aralıklarla oluşturulmuş sarmal dallanma yapar ve bu dallanma noktalarında profilin kendi ekseninde dönme açısı artar. Profillerin arasında kalan alan birleştirilerek üç boyutlu form oluşturulur. Bu örnekte; biri profil çizgisi, biri sarmal çizgi olmak üzere iki modül kullanılmıştır. Yedi özyineleme sonrası Şekil 3.19'daki form oluşmuştur.



Şekil 3.19 : Nedenselci kaplumbağa grafikleriyle üretilen form (Hansmeyer, 2003).

Kaplumbağa grafiklerini L-sistemleriyle modüller oluşturacak biçimde de kullanmak mümkündür. Dizgi yeniden yazma kuralları, sadece kaplumbağa grafiklerine komut veren semboller tarafından yönlendirilmez. Buna ek olarak belirli harflerle tanımlanmış farklı modüller de dizgilere eklenebilir. Bu sayede modüler bileşenlerin oluşturulması sağlanır. Bir modülün uygulanabilmesi için ön koşul olarak belirli sayıda özyineleme geçme koşulu aranabilir. Böylece türetilen modül bir bütün olarak geometri içinde yerini alır.

Örnek olarak,

$A \rightarrow F+F+F+F$ bir kare oluşturur.

$B \rightarrow AAAA$ ise, B'nin dört kareden oluştuğu anlamına gelir.

Belit olarak B alınırsa,

n = 0 : B

n = 1 : AAAA

n = 2 : F+F+F+F F+F+F+F F+F+F+F F+F+F+F

dizgisi elde edilerek modüler geometri sistemi oluşturulur (Şekil 3.20).

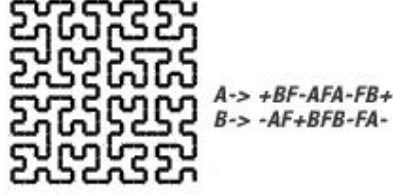


Şekil 3.20 : Kaplumbağa grafikleriyle modüler geometri üretimi (Hansmeyer, 2003).

Kaplumbağa grafikleri çevresel etkenlere yanıt verecek şekilde düzenlenebilirler. İlk seviyede çevresel etkenler kaplumbağanın durumunu etkileyebilir. Örneğin adım başına gittiği yol, çizdiği çizgilerin çapı (tüp) veya dönme açısı gibi kaplumbağanın durumsal bileşenlerini etkileyebilirler. Bu değişkenler kaplumbağanın bulunduğu noktanın konumuna ve bu konumun çevrede referans alınmış bir noktaya göre olan konumu gibi bileşenlere göre değişiklik gösterebilirler. Daha ileriki seviyede ise, kaplumbağa bulunduğu çevredeki özel noktalara göre düzenlenmiş farklı listelerdeki komutları takip edebilir. Örneğin kaplumbağanın bulunduğu bağlama duyarlı olarak yer düzlemi ile çakışmayacak biçimde yol alması sağlanabilir. Yer düzlemi ile çakışmanın öngörüldüğü durumlarda, kaplumbağanın sınırlandırıldığı "ileri adım at" ve "geri adım at ve dön" komutlarından ikincisinin seçildiği durum uygulanarak kaplumbağanın bağlama duyarlı olarak hareket etmesi sağlanır.

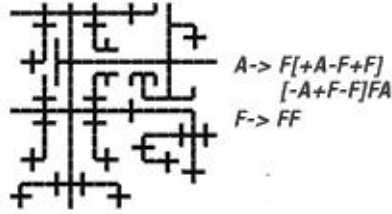
Dizgi yeniden yazma kuralları modüler objeler veya onların bileşenlerini oluşturmak dışında objelerin örgütlenmesi ve mekânsal düzenlenmesinde de kullanılır.

İlk adımda, L-sistemleri kendisiyle çakışmayan iki veya üç boyutlu boşluk dolduran eğriler oluşturmakta kullanılır. Bu, sistemin büyüklüğü ve özyineleme sayısından bağımsız olarak sağlanır. Sistemin bileşenleri bu eğriler boyunca belirli aralıklarla bulunabilirler. Buna karşın bu sistemlerin geometrileri homojen yapıdadır ve çevresel etkileşimleri kısıtlanmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 : Boşluk dolduran eğri, 4. özyineleme (Hansmeyer, 2003).

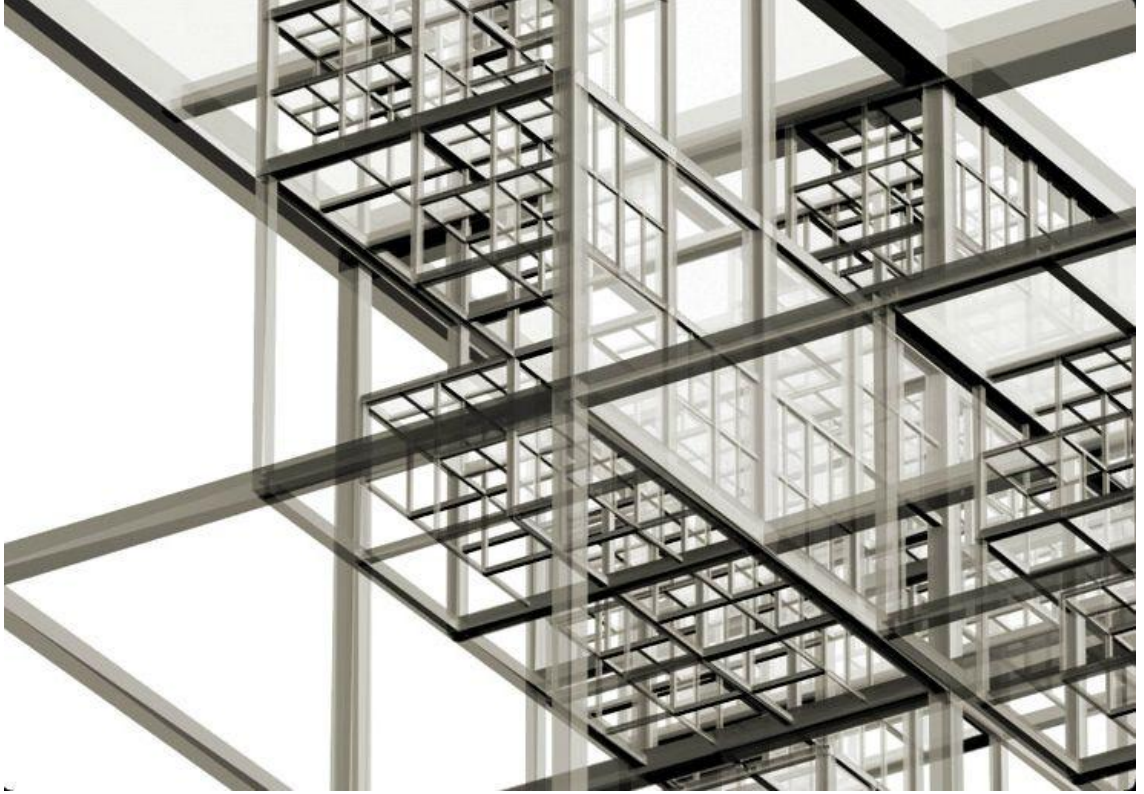
Heterojen nedenselci sistemler için, yörünge hafızası sisteme dahil edilerek çakışmaları engellenir. Bunu sağlamak için kaplumbağa, çakışmaya neden olacak komutu yok sayıp bir önceki konuma geri dönebilir veya komutu almadan önceki konumunda değişiklikler yapabilir. Çakışmalara, belirli noktalarda sirkülasyonu ve yapıyı güçlendirmek için izin verilebilir. Bu müdahalelerle geniş aralıkta mekânsal düzenlemeler yapılabilir (Şekil 3.22).



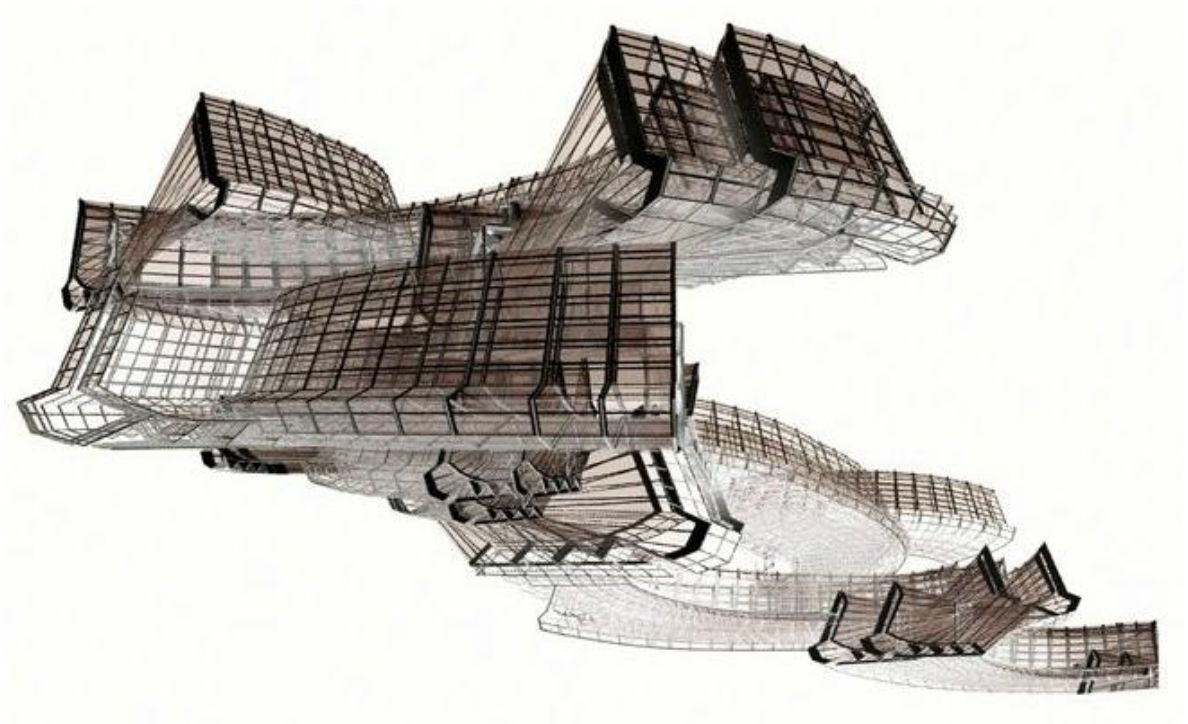
Şekil 3.22 : Yörünge hafızalı eğri, 6. özyineleme (Hansmeyer, 2003).

Modüler bileşenli kaplumbağa grafiklerini oluştururken farklı yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemlerden ilkinde, bir kübü oluşturan ayrıtlar, bir modülü oluşturur. Her ileriye doğru atılan adımdaki adım uzunluğu yarıya indirilir. Önce çizilmiş olan küp, hacimsel olarak 8'e bölünür ve kaplumbağa oluşan her hacmin orijin noktasına yerleştirilir. Her kaplumbağa konumu için yeni küpler (modüller) çizilir. Bu işlem 5 özyineleme boyunca devam eder. Her özyinelemede küp %33 olasılıkla daha küçük parçalara bölünemez (Şekil 3.23).

Bir başka yöntemde, düzlemde profil oluşturan bir çizgi ile başlanır. Sarmal ve dallanan yörünge çizgisi uzayda çizilir. Düzenli aralıklarla yörünge çizgisi, profile çizmek için alt dallara ayrılır. Bu alt dallanma, profile çizmeden önce kaplumbağanın yöneliminin yer düzlemine paralellliğini sınamak için gereklidir. Profiller arasında kalan alanlar birleştirilerek üç boyutlu form oluşturulur (Şekil 3.24).

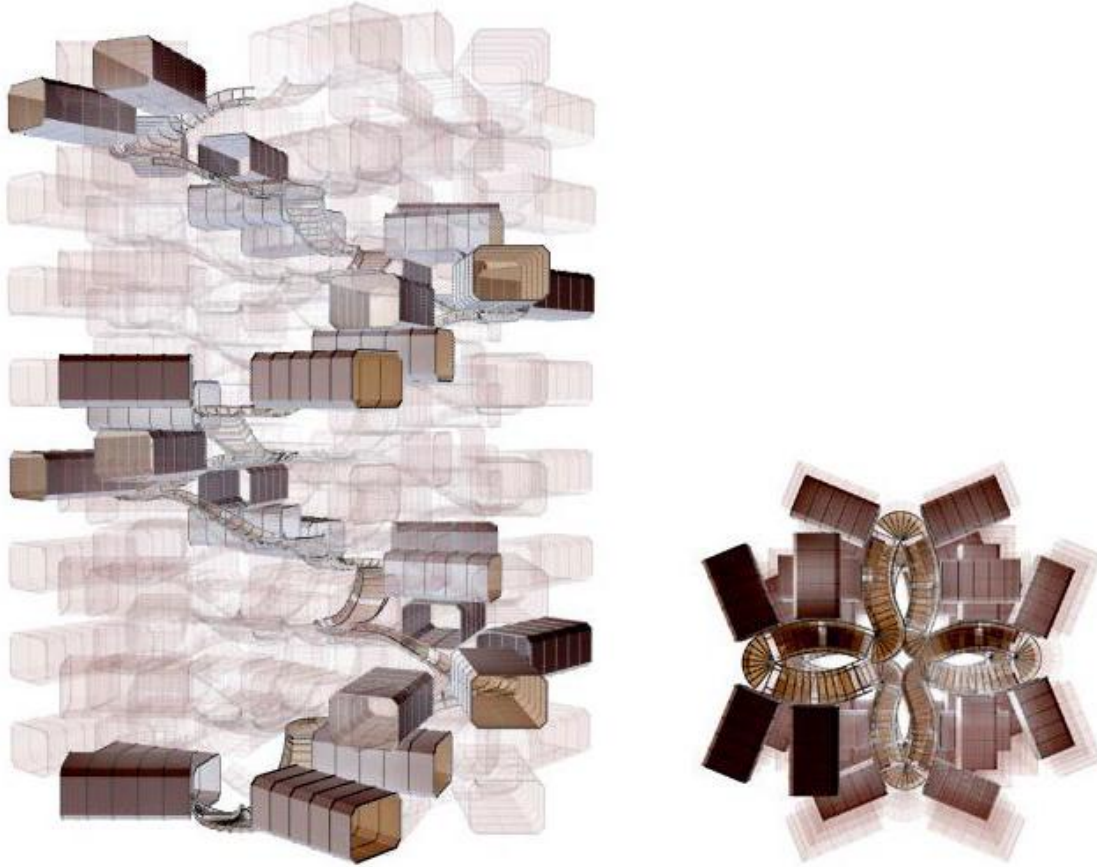


Şekil 3.23 : K p modül ve kaplumbaĝa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi (Hansmeyer, 2003).



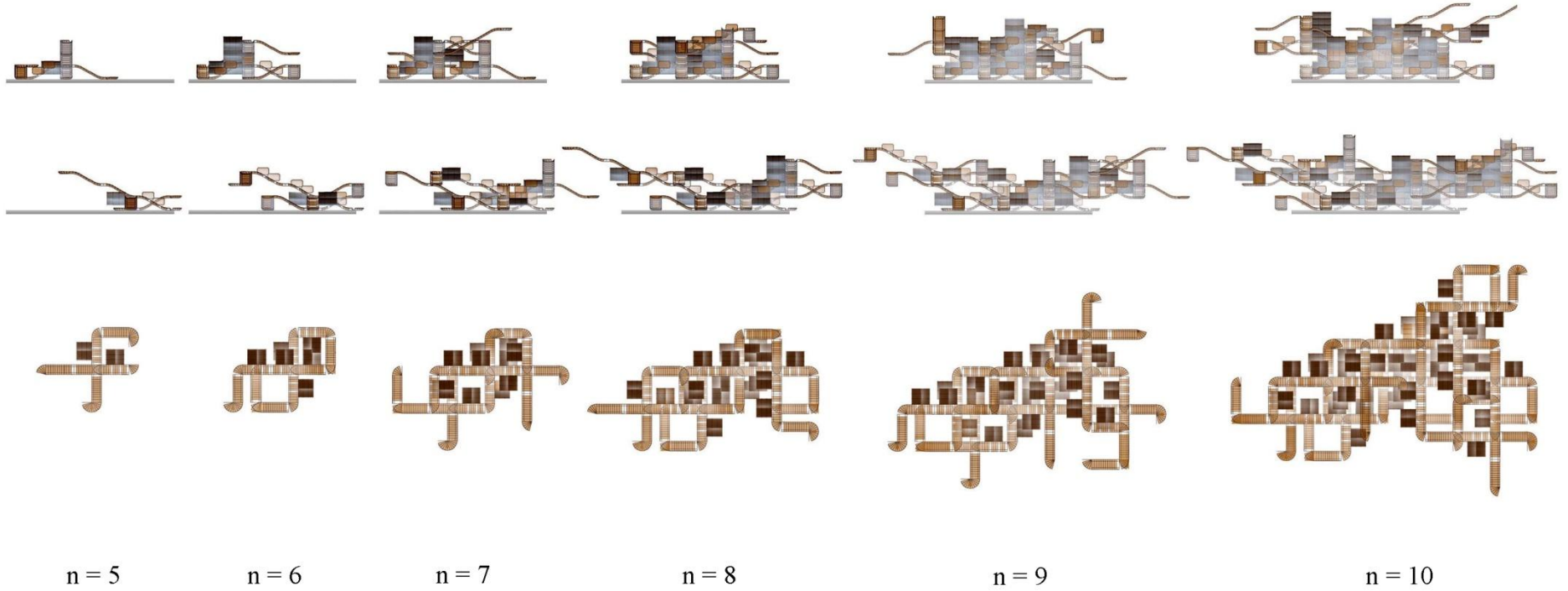
Şekil 3.24 : Modül olarak profil  ziggisi ve yörünge  ziggisi kullanan kaplumbaĝa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi (Hansmeyer, 2003).

Sonraki yöntemde özyinelemeli modüllerden yararlanan kaplumbağa grafiklerinden yararlanır. Önce, iki boyutlu yörünge profili oluşturulur. Yörünge profilleri 45° döndürülüp kümelenecek rampayı oluşturur. Aynı profiller $22,5^\circ$ döndürülerek sahanlık bölümünü oluşturur. Sonra oda profili oluşturulur ve düz bir yörüngeyi takip ederek 6 aralıkla çizilir. Yörünge profilleri birleştirilerek yüzey oluştururlar. Oda profilleri birleştirilerek de odaların duvarları oluşturulur. Sonunda bu bileşenleri referans alarak yapı oluşturulur (Şekil 3.25).

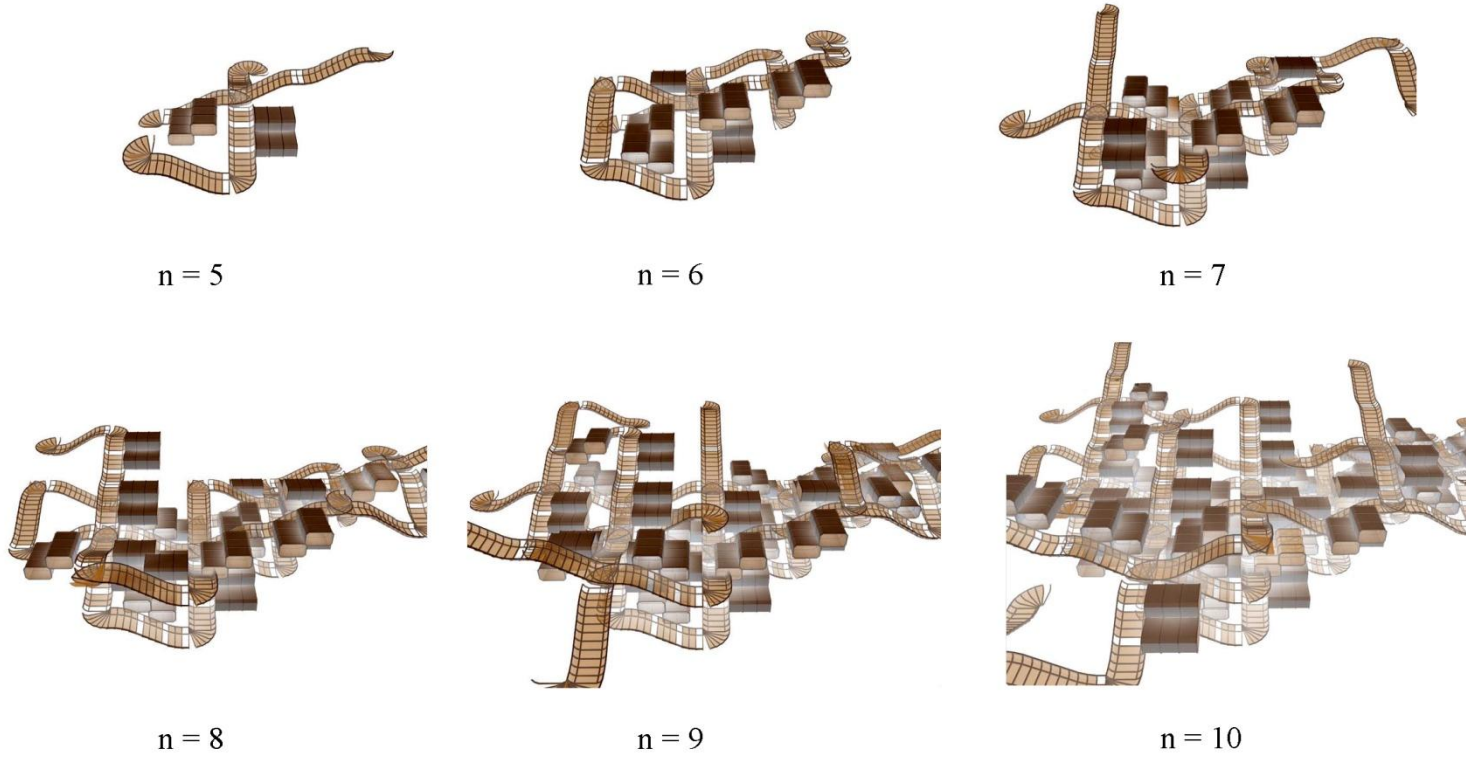


Şekil 3.25 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sistemi (Hansmeyer, 2003).

Şekil 3.25'de gösterilen modelin üzerinde, rampaların dönmemesi ve sahanlıkların dönüşlerinin 90° ile sınırlandırılması gibi değişiklikler yapılarak, özyineleme sayısı n 'ye bağlı olarak türevler elde edilmiştir. Bu türevlerin aşamalı olarak gelişimleri görünüşler ve planlar olmak üzere Şekil 3.26'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 3.27'deki karşılaştırmalı perspektif görüntülerinde ise, özyineleme sayısı n arttırıldığında gittikçe karmaşıklaşan modül örüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.26 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sisteminin önyineleme sayısına bağlı gelişimi (Hansmeyer, 2003).

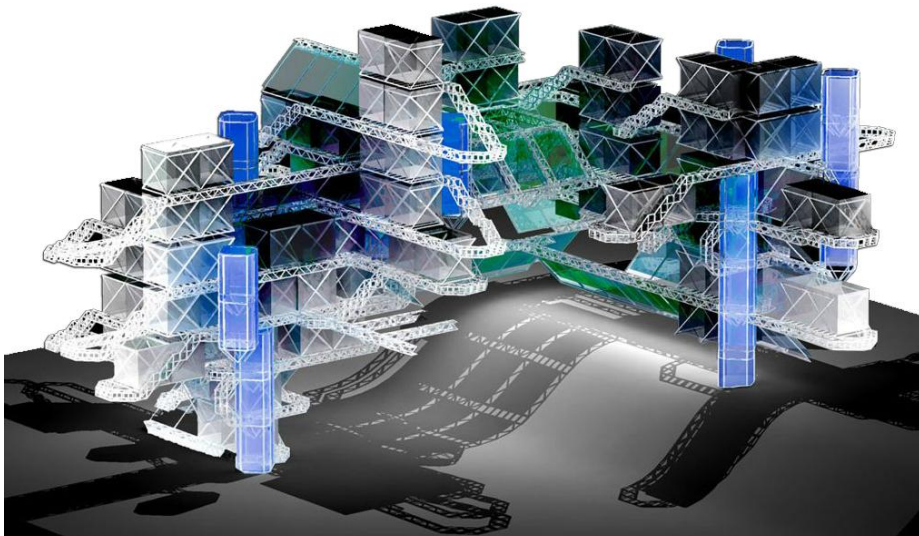


Şekil 3.27 : Modül olarak profil çizgisi ve yörünge çizgisi kullanan kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş bir L-sisteminin önyineleme sayısına bağlı gelişimi (Hansmeyer, 2003).

Hansmeyer'in çalışmasının sonraki adımında çevresel etkileşime sahip olan modüler kaplumbağa grafikleri ile oluşturulan L-sistemleri incelenmiştir. Bu sistem bir önceki sistemle benzerlikler taşımaktadır. Fakat önceki sistemden farklı olarak topografya ile etkileşim içerisindedir. Çizilen rampalar hiçbir zaman yer düzlemi ile kesişmez. Eğer aşağıya doğru inen bir rampa yer düzlemiyle kesişirse, rampa yukarı doğru çıkacak şekilde değişir. Sistem aynı zamanda topoğrafyanın sınırlarının dışına çıkmayacak biçimde gelişmektedir (Şekil 3.28). Eğer bir dal, topografya sınırı dışına çıkmaya başlarsa kaplumbağa tarafından çizilmeden önce kesilir. Bu kaplumbağayı önceki kaydedilmiş konuma döndürerek yapılır (Şekil 3.29).



Şekil 3.28 : Çevresel etkileşime sahip kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş L-sistemleri (Hansmeyer, 2003).



Şekil 3.29 : Çevresel etkileşime sahip kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş L-sistemleri (Hansmeyer, 2003).

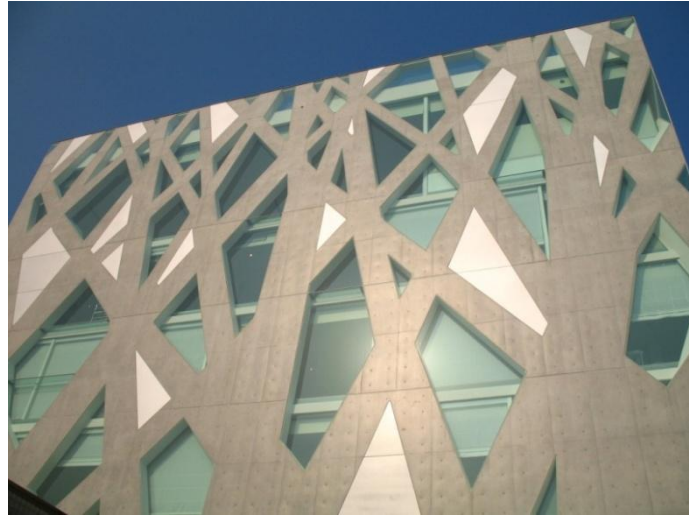
Hansmeyer'in çalışmasının sonuç bölümünde ileriye dönük olarak bakıldığında, L-sistemlerinin gramerlerinin; bağımsız değişkenler, matematik fonksiyonları ve koşullu operatörler gibi parametrik yönleri olan sistemlerin eklenmesiyle daha da zenginleşebileceğini belirtmiştir. Bu sayede sistemin içindeki bileşenler arasında ilişki kurulabileceği öngörülmüştür. Bunun sonucunda bu genişletilmiş dil, kurulan sistemlerin çevresel etkenlere (topografya vb.) cevap verebilmesini sağlayabileceği ve böylece bir çok sistemin birbiriyle etkileşim içerisinde olabileceği düşünülmüştür (Hansmeyer, 2003).

4. ÜRETKEN SİSTEMLERLE CEPHE TASARIMI YAKLAŞIMLARI

Doğal süreçleri algoritmalara dönüştürerek onlardan tasarım süreci içerisinde üretken sistem olarak yararlanılmış tasarımların, uygulanmış örnekleri de bulunmaktadır. Bu tasarımlar, çeşitli ölçeklerde gerçekleştirilmiştir. Ölçek açısından baktığımızda bu tasarımlar, kendisini oluşturan parçaları veya bütünü hızlı prototipleme gibi CAM (Computer Aided Manufacturing) yöntemleriyle oluşturulmuş objelerden başlayarak, gerçek yapı ölçeğinde inşa edilmiş tasarımlara kadar çeşitlilik gösterir.

4.1 Üretken Sistemlerden Yararlanan Tasarımlar

L-sistemlerinden bina cephesi ve bina strüktürü tasarımında yararlanılmasına da rastlanmaktadır. Toyo Ito & Associates tarafından Tokyo'nun moda merkezlerinden olan Omotesando'da, İtalyan mağaza zinciri Tod's için tasarlanan binanın cephesini oluşturmak için dallanan yapıda beton strüktür kurgulanmıştır (Şekil 4.1). Malzeme olarak betonun tercih edilmesinin nedeni, çevrede hakim olarak bulunan cam giydirme cepheye sahip binaların arasından malzeme farkıyla sıyrılma isteğidir (Pollack, 2005). Bu strüktür aynı zamanda binanın taşıyıcı sistemini oluşturmaktadır. Bu sayede iç mekân kolonlarla bölünmemiş, geniş ve bütün bir iç hacim yaratılmıştır (Şekil 4.2).



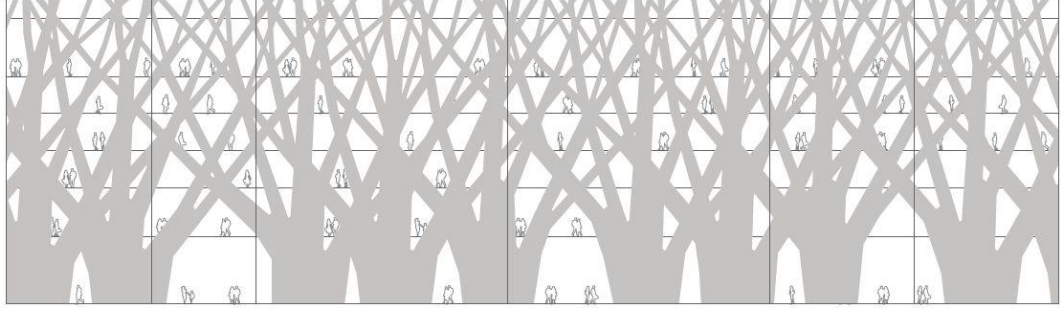
Şekil 4.1 : Tod's binasının dallanan yapıdaki cephesinden görünüm (Url-7).



Şekil 4.2 : Tod's binasının caddeye bakan cephesinden bir görünüm (Url-7).

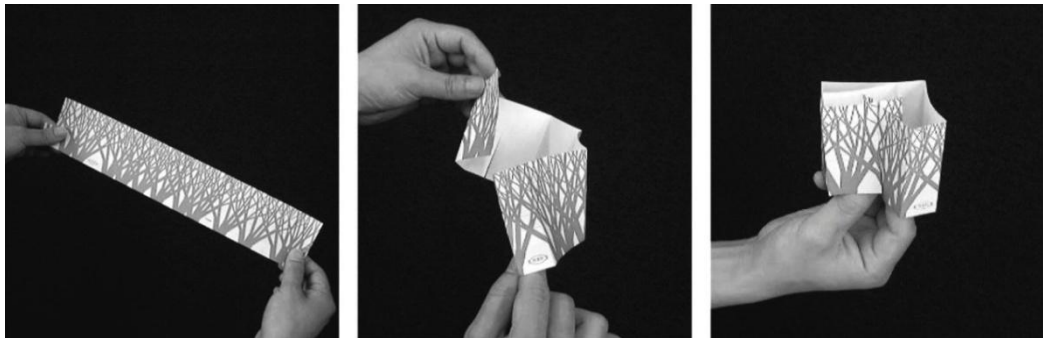
Omotosando Bulvarı'ndaki ağaç türleri arasında hakim olarak görülen karaağaçlardan ilham alınarak, cephe strüktürünü oluşturan 9 ağaç strüktürü birbirleriyle kesişecek biçimde kurgulanmıştır. Böylece bina kabuğunun doğal bir geçirgenliğe sahip olması sağlanmıştır. Söz konusu strüktür iki adımda kurgulanmıştır. Öncelikle basit bir dallanmaya sahip algoritmayla 2 boyutlu bir ağaç üretilmiştir. Bu algoritmaya göre her bir dal ikiye ayrılarak gelişim

göstermektedir. Ortaya çıkan geometri basit olmasına karşın, binanın cepheleri boyunca kenarlardan dönerek devam edecek biçimde uygulanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Tod's binasının cephe strüktür kurgusunun oluşturulması (Burmanje, 2005).

Cephenin üst kısımlarına denk gelen örüntüler, bir cepheden ötekisine taşabilmektedir. Bu işlem basitçe ağacın dallarını binanın köşeleri boyunca katlamak suretiyle mümkün olmuştur. Böylece üst üste çakışan dalların binanın dış kabuğunu sarmaladığı bir strüktür tasarlanmıştır (Şekil 4.4). Tasarımın gelişimi üretken sistem açısından bakıldığında, başlangıçta kural tabanlı bir algorithmadan yararlanılmaktadır. Bu algorithmanda yapılan değişikliklerle ağaç geometrisi değiştirilebilir. Örneğin, dallanma algoritması, ikiye bölünen dallardan, üçe bölünen dallara değiştirilerek cephelere uygulanacak olan ağaç geometrisi değiştirilebilir. Buna ek olarak dalların incelme ve kalınlaşma davranışları da algoritma tarafından belirlenebilir. Ancak tasarımın sonraki aşamaların da algoritmik bir yaklaşım yoktur. Üretken algoritma sadece ilk aşamada kullanılmış, fakat son ürünü elde etmek için katlama gibi basit Öklidyen dönüşümler uygulanmıştır. Yaklaşım açısından bakıldığında doğada olduğu gibi süreci başından sonran kadar götüren tek bir algoritma yoktur. Yine tasarımı Toyo Ito'ya ait olan Serpentine Gallery Pavonu'nun (Şekil 4.5) aksine, tasarım mantığı, taşıyıcı sistem üzerinden kurgulanmıştır (Pollack, 2005).



Şekil 4.4 : Cephe strüktürünün üç boyutlu olarak oluşturulması (Url-7).



Şekil 4.5 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun cephe görünümü (Url-8).

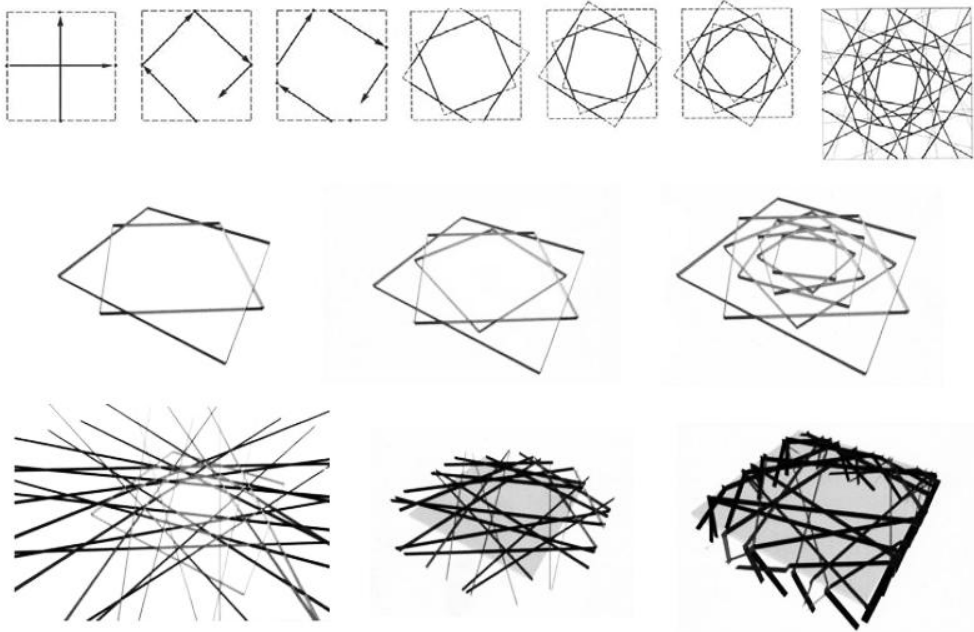
Londra'daki Kensington Parkı'nda yer alan Serpentine Gallery, her yıl uluslararası mimarları pavyon tasarımları için görevlendirir. Mimar Toyo Ito, 2002 yılında yaptığı pavyonla, tekdüzelik takıntısı olan rasyonalizmin gölgeleyemediği, mimariyi mümkün kılan en temel koşulları oluşturan sistemleri görünür kılan bir tasarım amaçlamıştır (Jodidio, 2008). Pavyon 2002 yazında üç ay boyunca kullanılmış geçici bir yapı olup Toyo Ito & Associates ve mühendislik firması Arup'dan Cecil Balmond'un ortaklaşa gerçekleştirdikleri bir yapıdır (Şekil 4.6). Toyo Ito kavramsal aşamada, iç içe geçerek rastgele kesişen kutuların kolon ve kirişleri oluşturduğu bir yapı düşünmüştür. Balmond ise Ito'nun istediği kaotik düzene sahip ama bir yandan da altında bir düzene sahip olan tasarımı belirli bir algoritmaya oturtmaya çalışmıştır (Meredith, 2008).



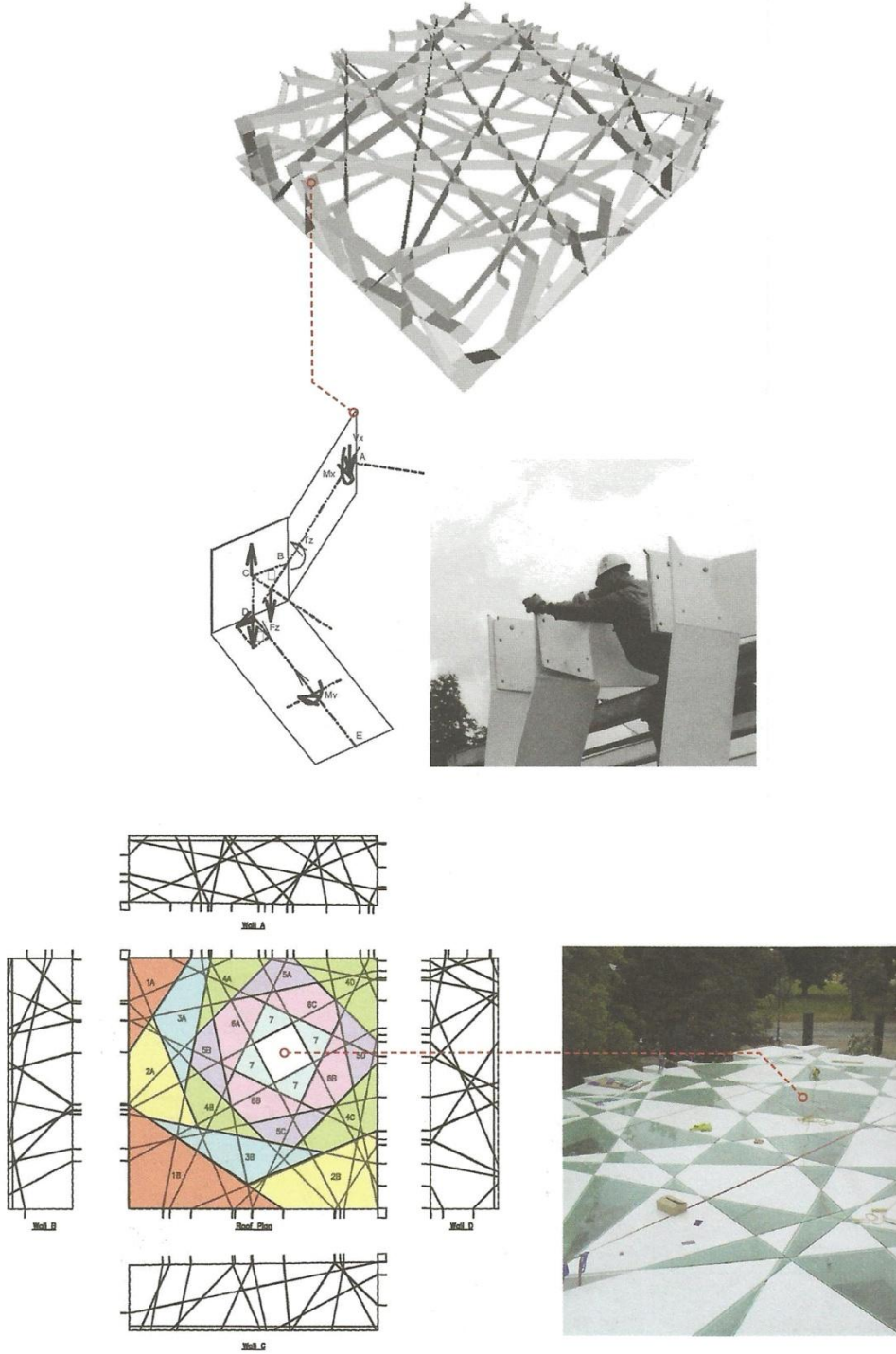
Şekil 4.6 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun içinden görünüm (Url-8).

Bu algoritmayı oluşturmak için öncelikle bir karenin komşu iki kenarının birinin yarısından ötekisinin 1/3'üne bağlanacak bir iç kare oluşturulur. 1/2'den 1/3'e kuralı ilk karenin içerisine kenarları birleşmeyen (köşeleri, kullanılan ilk karenin dışında kalan) başka bir kare çizdirir. Eğer 1/2'ye 1/2 kuralı uygulanırsa, ilk kare içerisinde hep aynı izi izleyen, bir karenin içerisinde bir kenarın orta noktasından komşu kenarın orta noktasına seken bir bilardo topu gibi tekdüze bir geometri elde edilirdi. 1/2'den 1/3'e kuralında ise, ilk kare yeni bir iç kare yaratmaya zorladığından algoritma geometri oluşturmaya devam edebilir. 6 özyineleme yapıldıktan sonra ana geometri kurgulanmış olur (Şekil 4.7). İç içe geçen karelerin kenarları uzatıldığındaysa, çok sayıda kesişim noktası elde edilir. Bu noktalardan bazıları ana taşıyıcıların ve destek elemanlarının olduğu noktaları belirtirken, bir kısmı da kutu tipolojisini bütünleştiren rastlantısal bir örge oluşturmaktadır (Balmond, 2006). Böylece tasarımı oluşturan değişik öğeler aynı geometrik dili kullanarak ifade edilmektedir. Bu yaklaşım tasarımın bütünselliğini güçlendirerek, tasarımın çıkış noktasındaki fikirle olan ilişkisini güçlendirerek, fikri son ürüne kadar taşımaktadır (Şekil 4.8).

Toyo Ito'nun amaçladığı karmaşıklık ve rastlantısallık, Balmond ve Arup tarafından yukarıda açıklanmış olan dönen ve genişleyen karelere dayalı basit kuralın, yinelemeli tekrarına dayalı bir algoritmayla sağlanmıştır.



Şekil 4.7 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun strüktür kurgusunun oluşturulması (Meredith, 2008).



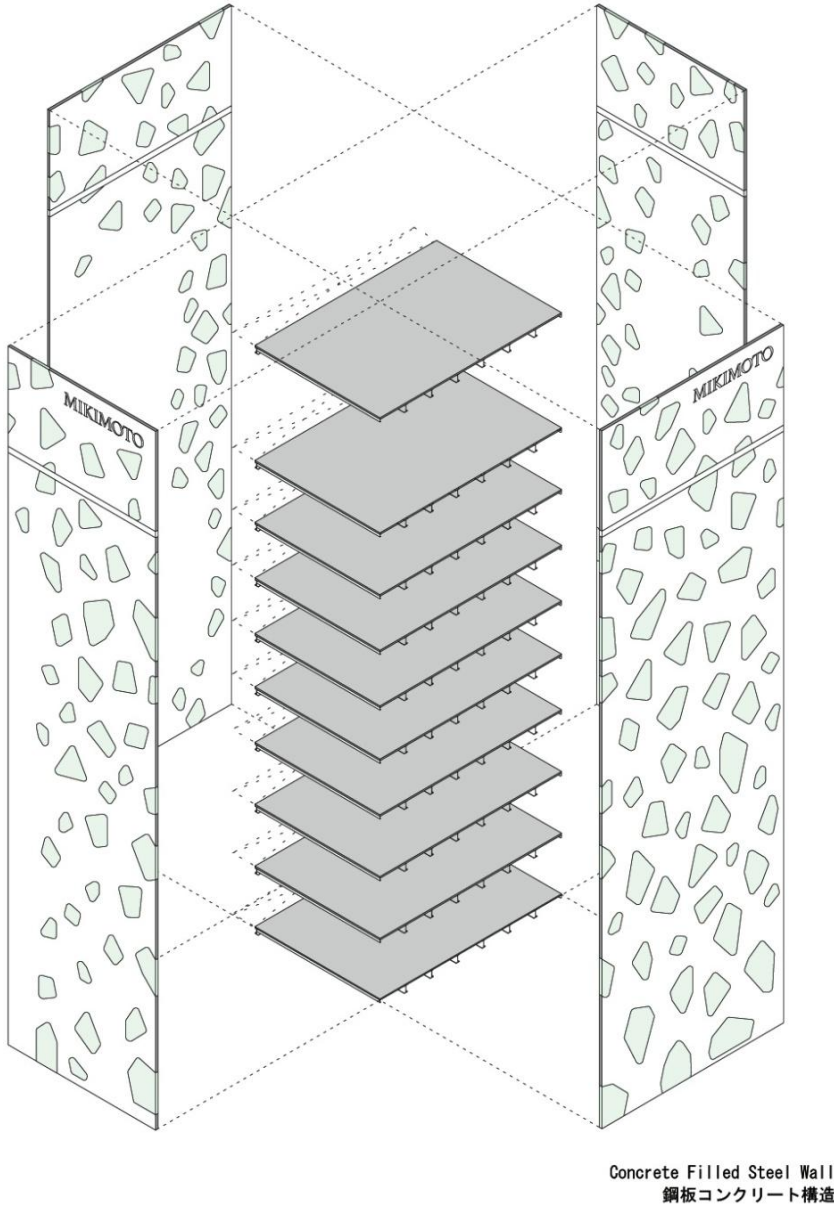
Şekil 4.8 : Serpentine Gallery Pavyonu'nun strüktür kurgusunun uygulanması (Meredith, 2008).

Toyo Ito'nun mimari vizyonu, başlangıçta ortaya konmuş olan kavramsal tasarımın, kullanılan algoritma geliştirme ve uygulama süreçlerinin uyumlu yürütülmesi sonucu son ürüne kadar gelişmesiyle gerçekleşebilmiştir. Tasarımda doğadan öykünme olmamasına rağmen, tasarımı geliştirme süreci incelendiğinde algoritmik biçim gelişimi doğa ile ilişki kurmaktadır.

Toyo Ito & Associates tarafından Tokyo'nun 2006 yılında Ginza bölgesinde Japon mücevher markası Mikimoto için tasarlanmış olan bina, asimetrik pencere boşlukları olan çelik cephe strüktürü tarafından taşınmaktadır (Şekil 4.9). Burada taşıyıcı sistem Tod's Omotesando binasında olduğu gibi taşıyıcı kabuktur. Tod's Omotesando binasından farklı olarak bu cephe beton yerine, içi betonla doldurulmuş çelik panellerden oluşmaktadır. Taşıyıcı kabuk sayesinde Tod's Omotesando binasında olduğu gibi her kat için kolonlardan arındırılmış bütün bir iç hacim elde edilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.9 : Mikimoto Ginza 2 binasının cephe görünüşü (Url-12).

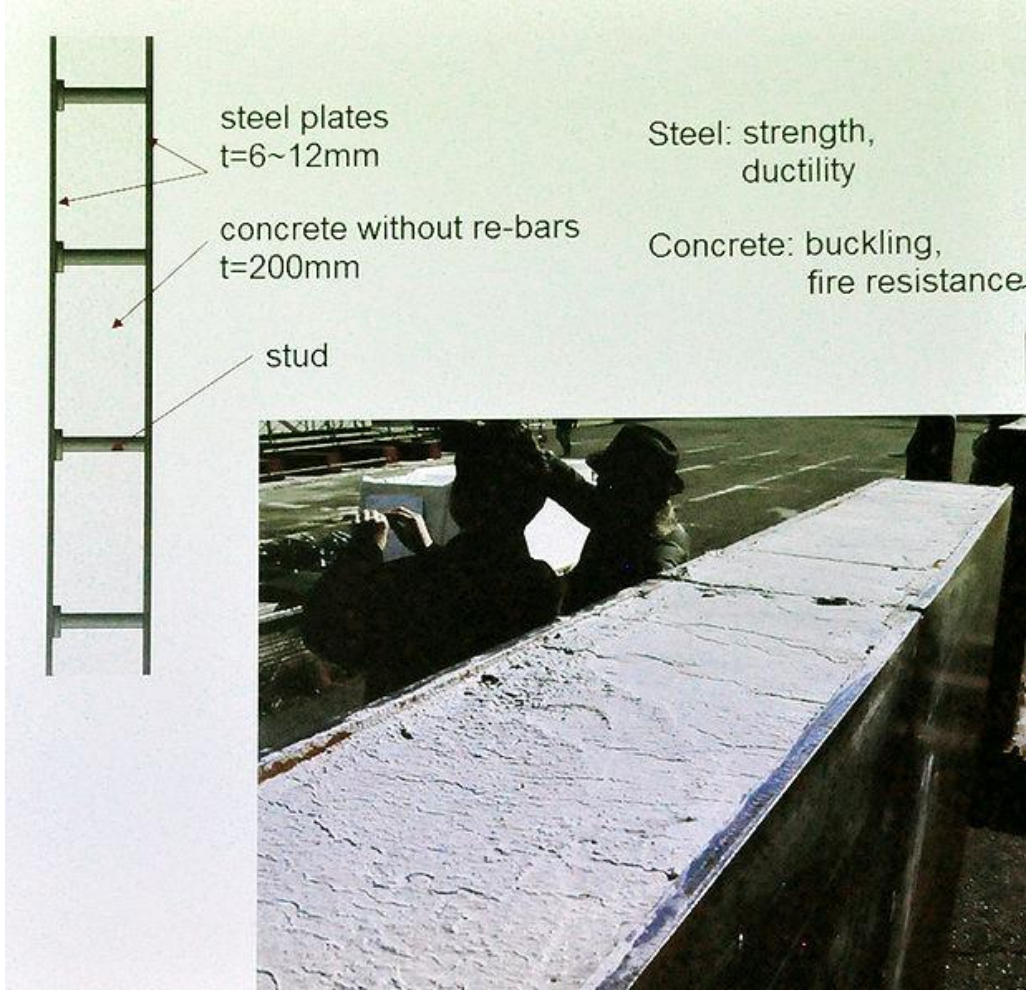


Şekil 4.10 : Mikimoto Ginza 2 binasının cephe ile döşeme ilişkisi (Url-12).

Söz konusu strüktür kurgusunun yaygın kullanım alanı nükleer tesis yapılarıdır. Toyo Ito, Taisei Design ve Sasaki Engineers gibi ortaklarla çalışarak bu strüktür kurgusunu mücevher mağazası için uyarlamaya çalışmıştır (Buxton, 2006).

Cephe strüktürünü oluşturan sandviç paneller, metal çivilerle birbirine tutturulmuş 12mm kalınlığındaki metal levhaların arasına dökülen betonla fabrikada oluşturulmuştur (Şekil 4.10). Birbirinden farklı 163 asimetrik pencere boşluğunu içeren çelik paneller, fabrikada üretildikten sonra inşaat alanında kaynaklanarak birleştirilmişlerdir. Bu strüktür 9 katlı binanın ağırlığını taşıyacak mukavemete sahiptir (Takahashi, 2006).

Pencereleri oluşturan cephedeki boşluklar caddeye bakan güney ve batı cephelerinde yoğunlaşmaktadır. Sokak seviyesinde bu açıklıklar bina girişleri ve dükkan vitrinleri haline gelmektedir. Cephedeki açıklıkların düşey düzlemdeki düzensizliği, kat döşemelerinin düzeniyle uyumlu değildir (Şekil 4.11), bazı açıklıklar kat döşemelerine denk gelmektedir. İç kurgu ile dış kurgu arasındaki bu fark "iki farklı dünya algısı" yaratmaktadır (Buxton, 2006).

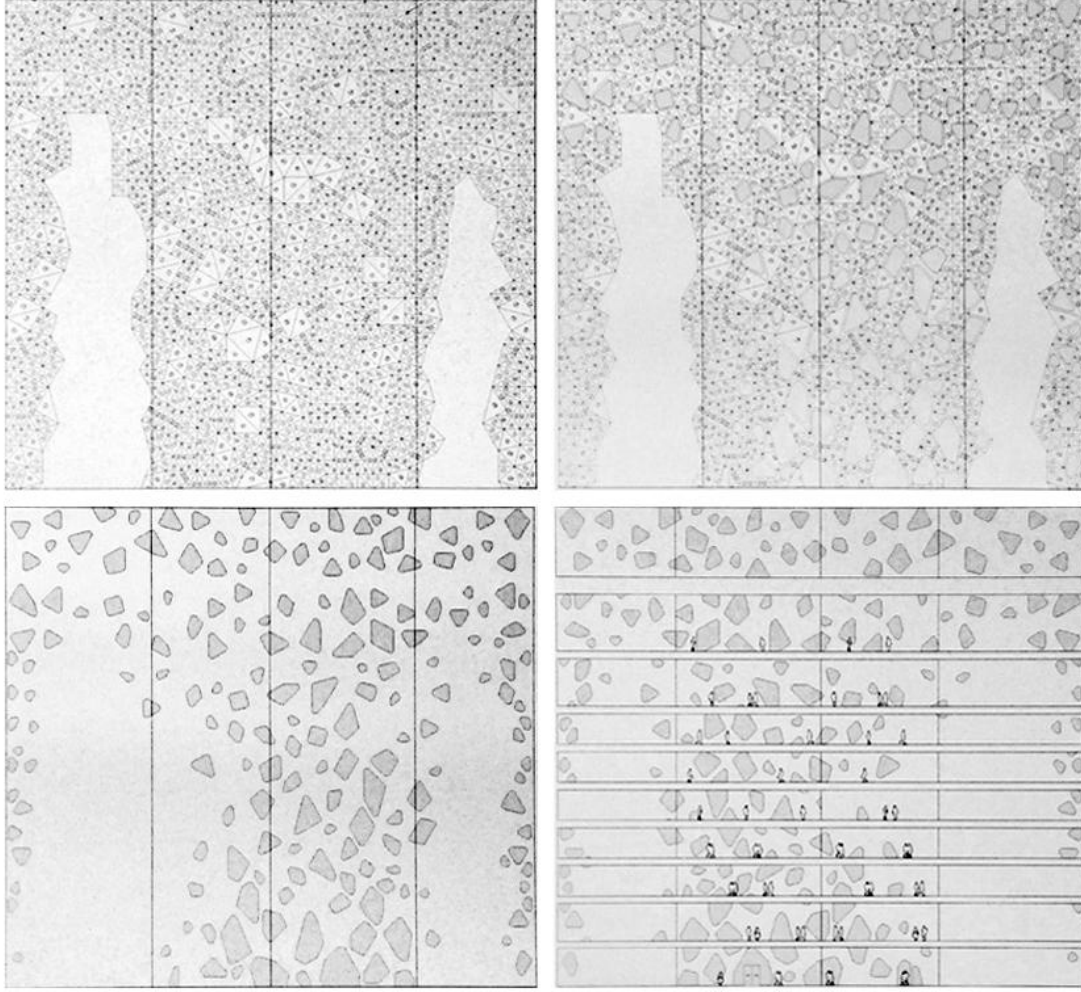


Şekil 4.11 : Bina duvarlar modüllerinin üretim detayı (Url-12).

Rastlantısal görünümlü cephe boşluklarının tasarımının arkasında bir düzen yer almaktadır. Düzen, sonlu eleman analizi yöntemi olarak adlandırılan strüktür analizi teknolojisine dayanmaktadır. Pencere açıklıklarının düzeni, cepheyi yediye bölerek oluşturulan kuazi-kristal geometrisine dayanmaktadır (Şekil 4.12) (Buxton, 2006).

Kuazi-kristal geometrisini oluşturmak için bölünme kuralıyla birleştirilmiş bir ongense simetri yeterlidir. Kuazi-periodik düzen belirli bir desenin orantısız bir sıklıkta yeniden tekrarlanmasıdır (Lu & Steinhardt, 2007). Burada görülmekte olan

geometrik kendini tekrarlama, fraktallere özgü olan kendine benzeme özelliğini de beraberinde getirmektedir. Bu sayede Şekil 4.12'deki üst iki karede oluşturulan dolu-boş ilişkisi, alt iki karedeki sonuç geometrisine dönüştürüldüğünde aradaki geometrik ilişki rastlantısallıktan çok kendi içinde olan bir düzen etkisi yaratmaktadır.



Şekil 4.12 : Fraktal kurguya dayalı cephe boşluklarının oluşumu (Url-12).

Toyo Ito'nun Mikimoto Ginza 2 binasındaki yaklaşımı Tod's Omotesando'dakiyle benzerlik taşımaktadır. Cephelerde doğadan esinli algoritmaların oluşturduğu açıklıklardan yararlanılmıştır. Mikimoto Ginza 2 binası, yaygın olarak kullanılan inşaat teknikleri yerine, nükleer tesislerin yapımında kullanılan sistemler gibi daha özel durumlar için geliştirilmiş inşaat yöntemleri sayesinde gerçekleştirilebilmiştir. Toyo Ito'nun tasarım açısından farklı yöntem, yaklaşım ve öncelikleri barındıran yenilikçi cephe yaklaşımı, onu tasarımını gerçekleştirmesini sağlayacak farklı uygulama tekniklerini bulup kullanmaya itmiştir.

OCEAN North ve Scheffler + Partner'in Prag'da yapılması düşünülen Yeni Çek Ulusal Kütüphanesi için yarışmaya gönderdikleri tasarımda, tekil ve bütüncül bir görünüm elde etmek isterken, aynı zamanda içinde olduğu peyzajla birlikte devamlığı olan bir mekânsal deneyim yaşatmayı amaçlamışlardır (Şekil 4.13).

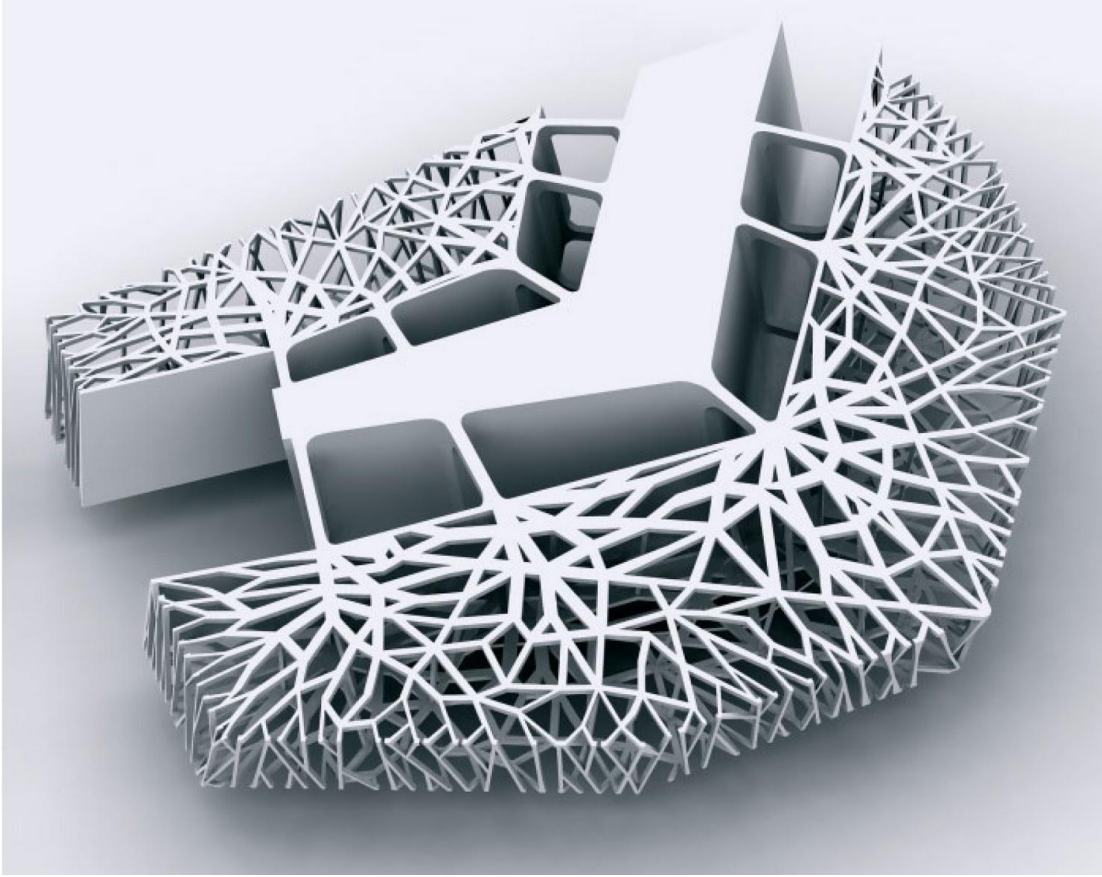


Şekil 4.13 : Yeni Çek Ulusal Kütüphanesi önerisi (OCEAN, 2006).

Limon ağacı, Çek Cumhuriyeti'nin ulusal ağacı olmakla birlikte, Çek ulusunun kurucusu olan Kraliçe Libuše'nin efsanesini yansıtmaktadır. Edebiyat, Çek ulusunun gelişmesinde önemli rol oynamış ve aynı zamanda da toplum hafızasında önemli yer tutmaktadır. Ağaç ve edebiyat bir araya geldiğinde, büyüme ve evrim kavramlarını barındırmaktadır. Bu nedenle ulusal ağaç, kütüphane gibi kültürel dinamikleri içinde barındıran bir yapının tasarımı için önemli bir ilham kaynağı olmuştur (OCEAN, 2006).

Ortada bulunan hacimde ulusal arşiv yer almaktadır. Her iki yana dallanan yapının dallanan uçlarında yönetsel mekânlar ile okuma mekânları yer almaktadır. Dallanan yapı, strüktürel ve mekânsal verilerden yararlanan bir üretken sistemle oluşturulmuştur (Hensel & Menges, 2008).

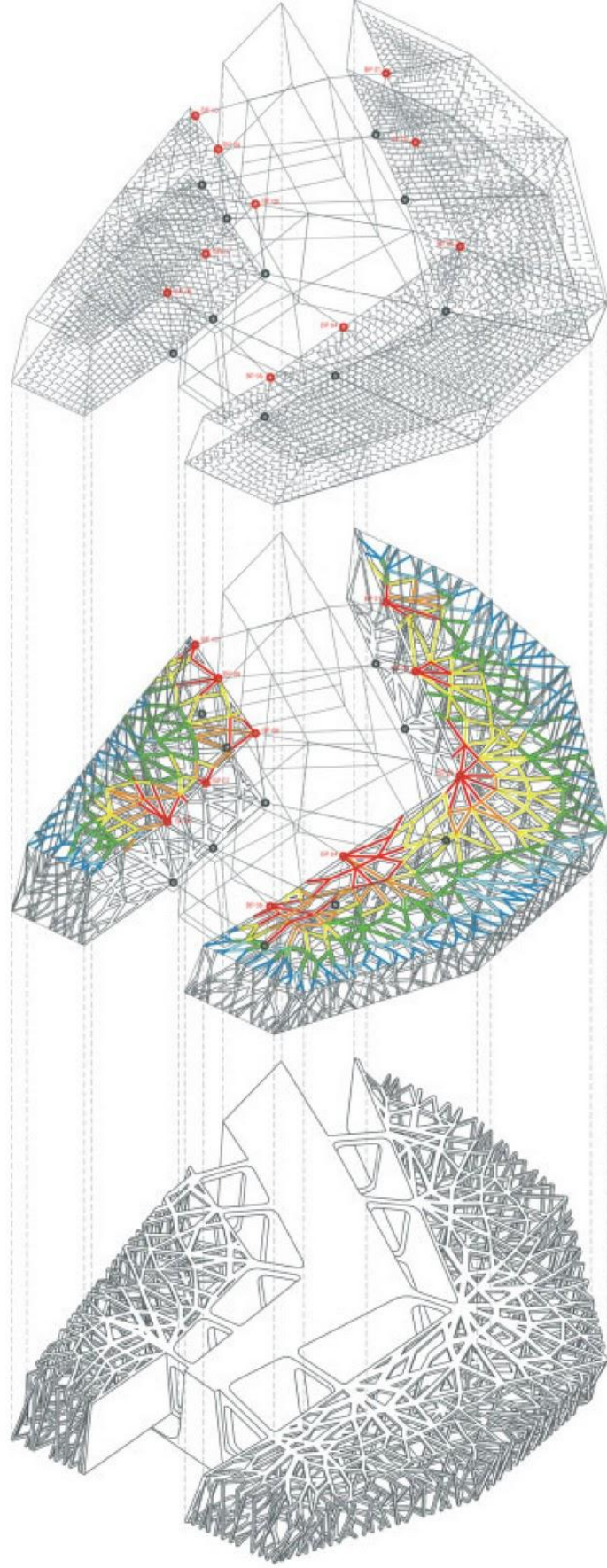
Yapı hacmi üzerindeki yük dağılımı değerlendirilerek temel kuvvetlerden oluşan bir vektör alanı oluşturacak şekilde haritalanır. Strüktürel verilerden yararlanarak birleşen dallardan oluşan ağ sistemi türetilir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 : Üretken sistemle strüktür kurgusunun uygulanması (OCEAN, 2006).

Bu sisteme, güneş ışığı verileri, görünüm eksenleri ve mekânsal özellikler parametre olarak eklenir. Beş taşıma noktası üzerinde yoğunlaşan düzlemler arası kuvvet akışı, hacimlerin sokağa ve parka bakan taraflarının sebep olduğu düzensiz geometri ve uzun konsollar nedeniyle karmaşık bir yapıya sahiptir (Şekil 4.15). Üretken sistem, bütün değişkenleri algılayarak onların strüktürel davranış üzerindeki etkilerini analiz ederek, dallanmayı oluşturan elemanların her birinin boyutunu, açısını ve yönelimini tekrar düzenler (Hensel & Menges, 2008). Bu tasarımı geliştirirken kullanılan yöntem bir çeşit form-bulma yöntemi olarak adlandırılabilir.

OCEAN North ve Scheffler + Partner'ın dallanan yapıyı oluşturmak için kullandığı üretken sistem strüktürel girdilerle ve güneş ışığı geliş açısı, mekânsal kurgu gibi farklı değişkenlerle işlemektedir. Her ne kadar dallanan sistem aynı anda strüktürel ve mimari gereksinimleri karşılasa da, gelişim algoritması tasarımcı ihtiyaçlarına ve strüktürel ihtiyaçlara bağlı olduğundan, doğadaki dallanan sistemlerle aynı gelişim mantığına sahip değildir.



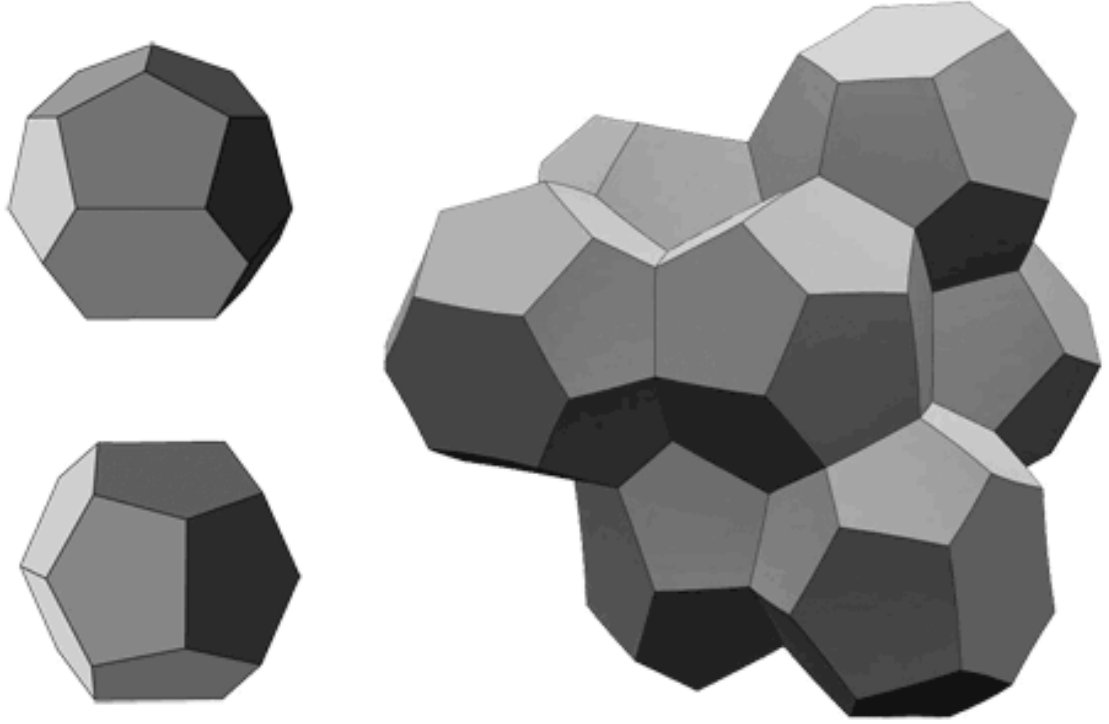
Şekil 4.15 : Üretken sistemle oluşturulan strüktür kurgusu (OCEAN, 2006).

2008 Pekin Olimpiyat Oyunları'nın su sporları ayağının yapılacağı spor oyunları merkezinin tasarımı için açılan uluslararası yarışmayı PTW Architects'in başında olduğu ekip kazandı. Ekip PTW Architects, Arup Australasia, Çin Devlet İnşaat Mühendisliği Şirketi ve Shenzhen Tasarım Enstitüsü'nden oluşmaktaydı. "Water Cube" olarak adlandırılan tasarım, Çin kültüründeki meydan sembolizmini ve sabun köpüklerinin doğal yapılarını mimariyle birleştiren, güçlü ve ikonik estetiğe sahip bir tasarımdır (Şekil 4.16) (PTW Architects, 2013).



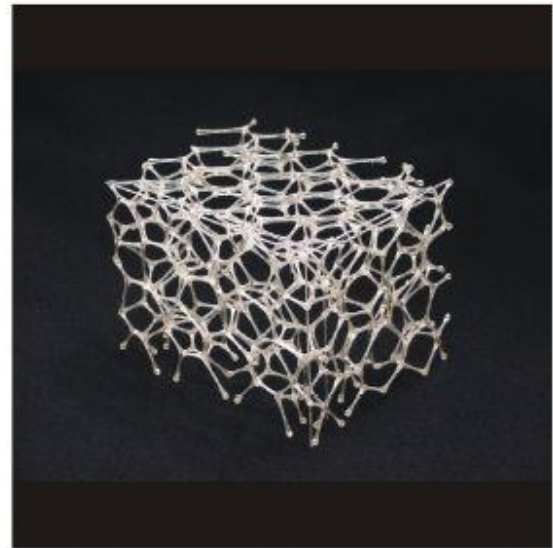
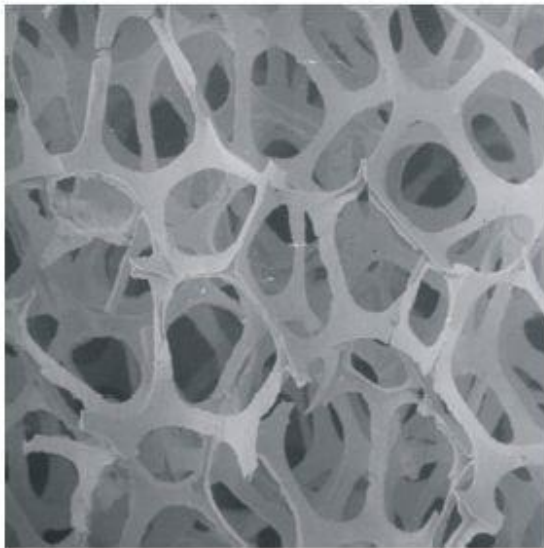
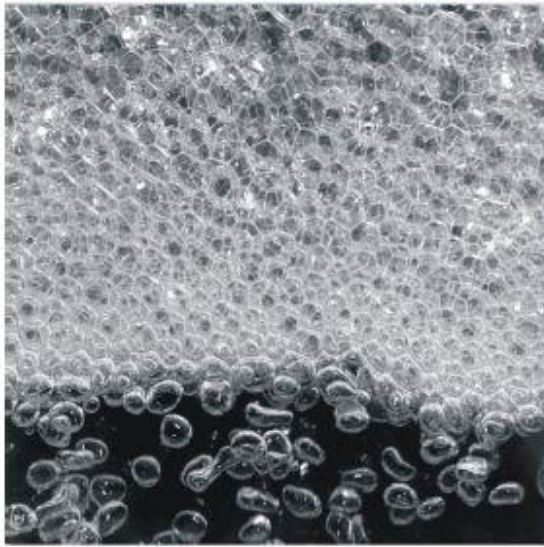
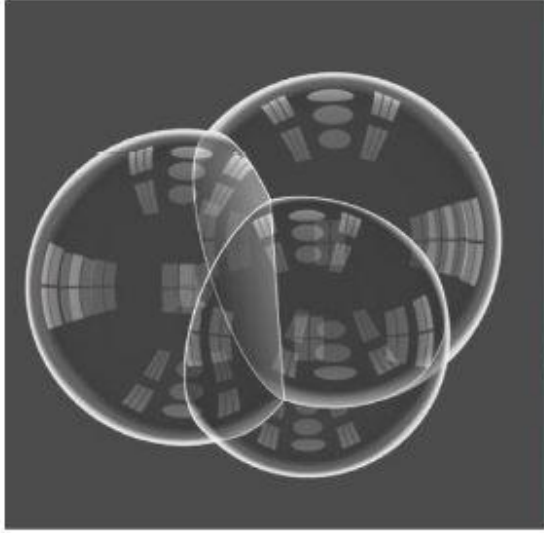
Şekil 4.16 : Water Cube'un cephe kurgusunun sokaktan görünüşü (Url-9).

Watercube, kabuğunu oluşturan strüktürle dikkat çekmektedir. Sabun köpüğünden ilham alınarak geliştirilmiş kurgunun geometrik temeli çok daha eski tarihlerde atılmıştır. 1887 yılında Lord Kevin köpüğün yapısını araştırmış ve köpük yapısını geometrik olarak temsil etmek için birbirine en az temas yüzeyine sahip olan, eşit hacimlerde hücrelere bölünmüş bir geometri kurgusunu öne sürmüştür. Bu geometri kurgusu, 14 yüzlü tetrakaidekahedron olarak adlandırdığı hacim dolduran tetrakaidekahedronlardan (6'sı kare ve 8'i altıgen olmak üzere toplan 14 yüzlü kesilmiş bir oktahedron) oluşmaktaydı. 1993 yılında Weaire ve Phelan köpük balonları kümesini daha eniyilenmiş şekilde modellemenin yolunu buldular. Pekin'deki Water Cube'ün strüktür tasarımında kullanılan geometriyi oluşturma aşamasında (Şekil 4.17 ve Şekil 4.18) bu yöntemden yararlanılmıştır (Borgart ve Stach, 2008).

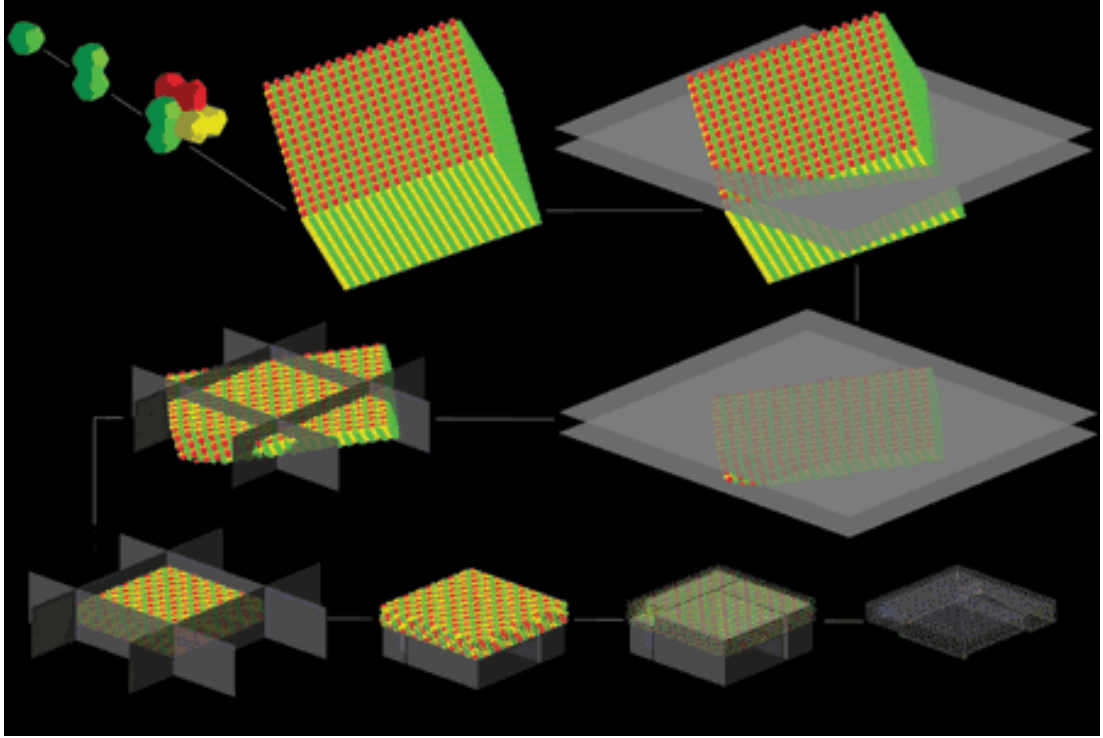


Şekil 4.17 : Weaire-Phelan köpüğünün geometrik temsili (Url-11).

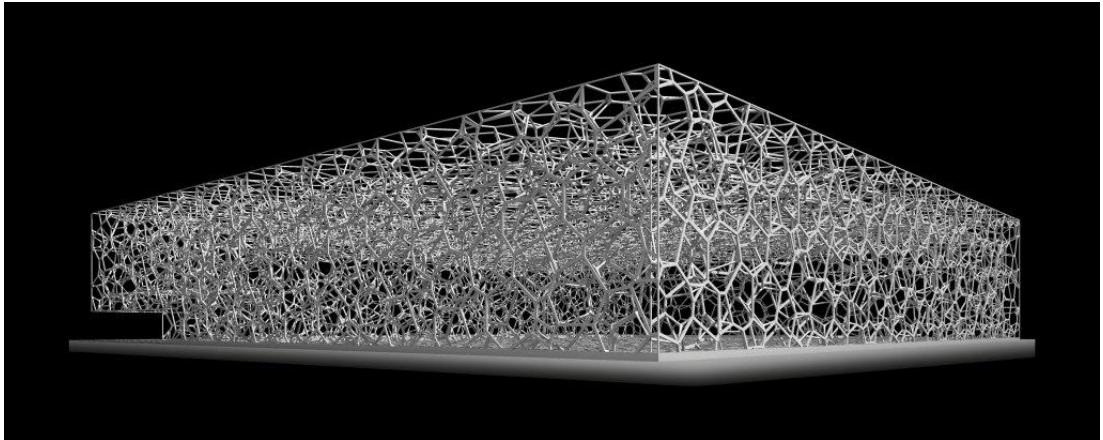
Arup için yarışmayı kazandıktan sonraki aşama, strüktürü inşaa edilebilir hale getirmektir. Bunu dijital model yaparak gerçekleştirdiler. Bu modelde polihedron hücreleri yatay ve düşey eksenlerde aralarında boş alan kalmayacak biçimde bina hacmini kaplayacak biçimde yerleştiriliyorlardı. Sonraki aşamada ise rastlantısal bir görünüm elde etmek için çapraz bir eksen üzerinde 60 derece döndürülüyorlardı (Şekil 4.19) (Fountain, 2008).



Şekil 4.18 : Sabun köpüğü ile strüktürel kurgu ilişkisinin anlatımı (Url-10).



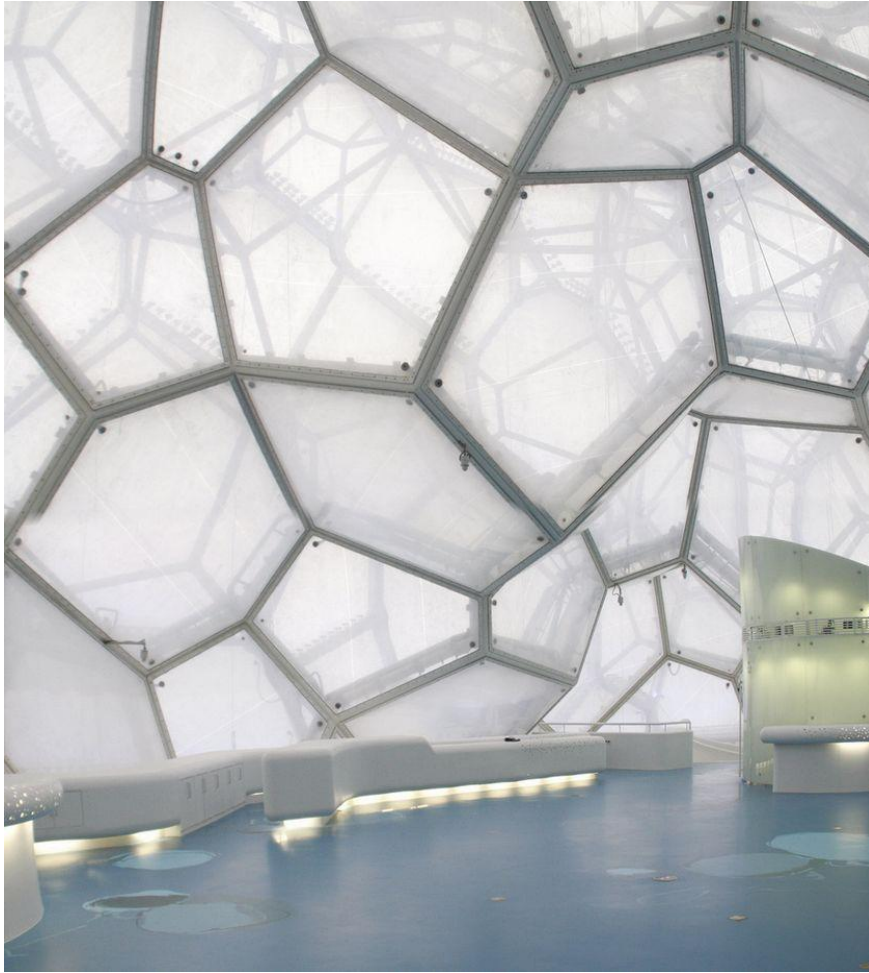
Şekil 4.19 : Weaire-Phelan köpük sisteminden Water Cube'ün dış cidarının oluşturulması (Url-11).



Şekil 4.20 : Çelik tüplerle oluşturulan strüktür kurgusu (Url-10).

Arup bir sonraki adımda otomatik olarak strüktür elemanlarının boyutlarını özzyineleme yaparak belirleyen eniyileme yazılımını kullanmıştır. "Strand7 Structural FEA Software" adındaki yazılımla, hücre boyutu, açıları ve bağlantı sayıları değişkenlerinin değerlerini, yapı için hedeflenen geçirgenliği ve sağlamlığı sağlayacak biçimde eniyilemek üzere tasarlanmıştır (Şekil 4.20). Yazılım sayesinde kullanılan çelik miktarı en aza indirilmiş ve mevcut çelik tüplerin kesitleri ve geometrileri en yüksek mukavemete sahip olacak biçimde düzenlenmiştir (Arkininstall, 2008).

Form bulma işlemi aynı zamanda strüktürün aralarındaki boşlukları dolduran ETFE yastıklarının oluşturan folyoların geometrilerinin belirlenmesi için kullanılmış ve bu hesaplamada dinamik gevşeme algoritmasından yararlanılmıştır. Yazılım ETFE yastıklarının minimum temas yüzeyine sahip olmaları ve içlerindeki hava basıncının ayarlanması için de kullanılmıştır (Şekil 4.21). Yapı son aşamada 22.000 çelik tüpten ve 12.000 birleşim noktasından oluşmaktaydı (Arkininstall, 2008). Kullanılan yazılım ile tasarım uygulanabilecek bir biçimde üçüncü boyuta taşınabilmiştir. Bu sayede uygulama çizimleri otomatik olarak üretilebilmiştir. Süreç sonunda oluşturulan sistem tasarım üzerinde büyük değişiklikler yapıldığında bile bir haftadan kısa süre içerisinde gerekli uygulama projesi çizimlerini üretebilmiştir.



Şekil 4.21 : Water Cube'ün iç mekânından alınmış bir görsel (Url-9).

Matematiksel bir model kullanarak Arup, PTW Architects'in tasarımını uygulanabilir hale getirebilmiştir. Yapılan binada doğadan ilham alınmış, matematiği kullanarak strüktürel sorunlara çözüm üretilmiş ve teknolojiyi kullanarak da eniyileme sağlanmıştır (Taylor, 2011).

Pekin Olimpiyat Oyunları için açılan bir başka yarışma da 91.000 kişi kapasiteli Pekin Ulusal Stadyumu yarışmasıydı. Herzog & de Meuron ve ArupSport ortak olarak katıldıkları projeye yarışmayı kazanmışlardır. Proje, kabuk yapısının kuş yuvasına benzemesi nedeniyle kısa sürede "Bird's Nest" olarak anılmaya başladı (Şekil 4.22) (McCorquodale, 2008). Proje tasarımında içeriden dışarıya doğru bir süreç işlemiştir. Önce izleyicileri ve spor sahasını içeren kase şeklindeki yapı tasarlanmıştır (Burrows ve Simpson, 2009).

Herzog & de Meuron ve ArupSport stadyumun kütle etkisini görsel olarak hafifletmek için dikme ve kemer gibi öğeleri kullanmak gibi mimari çözümlerden kaçınıp, bunun yerine çatı strüktürünü tribünler için oluşturulan geometrik sınırlara yakın olacak biçimde sarma yolunu tercih etmişlerdir. Sıra strüktürel bir çözüm üretmeye geldiğinde, oluşturulacak kabuğun tribünleri oluşturan yapıdan koparılmasının en iyi çözüm olacağı düşünülmüştür (Şekil 4.24) (Burrows ve Simpson, 2009).

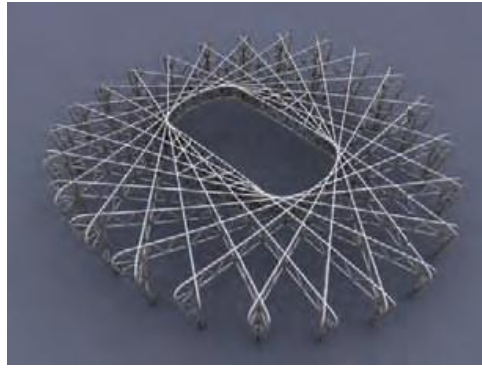


Şekil 4.22 : Bird's Nest'in cephe strüktürü kurgusu (Url-14).

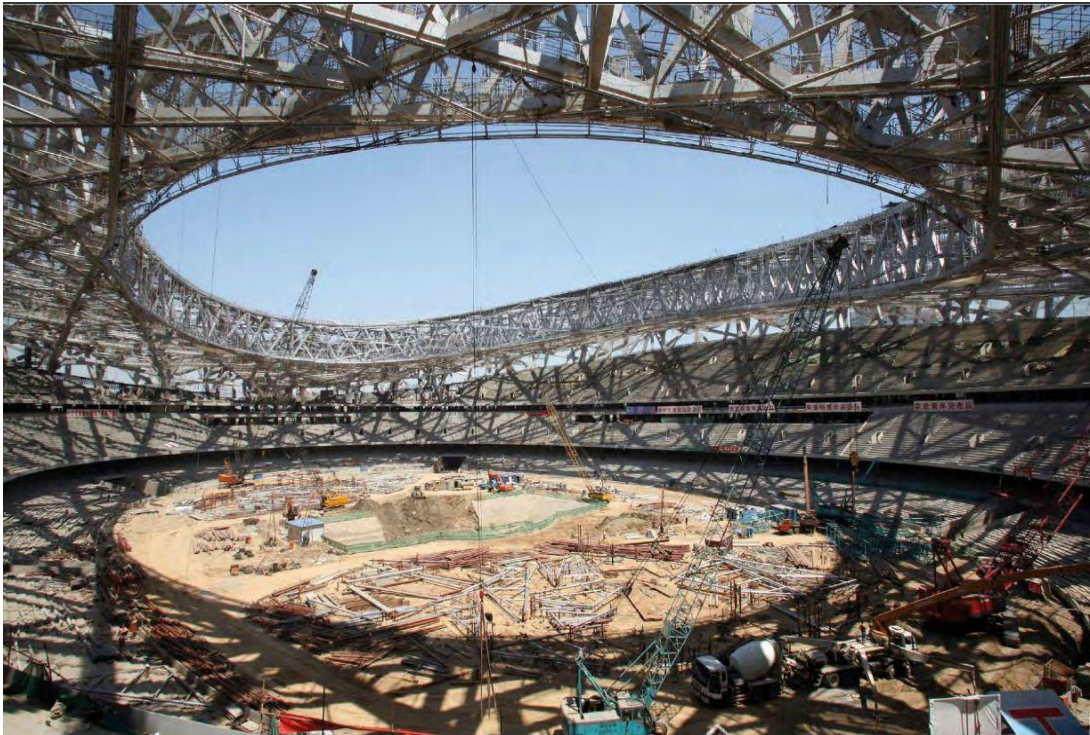
Pekin Ulusal Stadyumu "Bird's Nest" adını almış olmasına rağmen, tasarımda ilham alınan objeler Çin'in yerel zanaat eserlerinden olan çatlak sırlı seramik ile yoğun damarlı yapıya sahip "scolars' stone" dur (Burrows ve Simpson, 2009).

Çalışmaların sonunda geliştirilen taşıyıcı sistem üst üste gelecek biçimde tasarlanmış olan üç farklı gruptan oluşmaktadır. Pekin Ulusal Stadyumu'nun kaotik yapıya sahip olan geometrisini oluşturmak için, bu farklı sistemlerin birbirleriyle uyumlu birleşimleri sağlanmış ve yapıyı inşaa etmek mümkün olmuştur:

- Birincil: Uzay kafes çizgileri ve ana taşıyıcı sistemden oluşur (Şekil 4.23).
- İkincil: Kaplama sistemi panellerini taşıyan ana taşıyıcı sistemin oluşturduğu panel boyutunu küçültmek için oluşturulmuştur
- Merdivenler



Şekil 4.23 : Birincil geometriyi oluşturan uzay kafesler (Burrows ve Simpson, 2009).



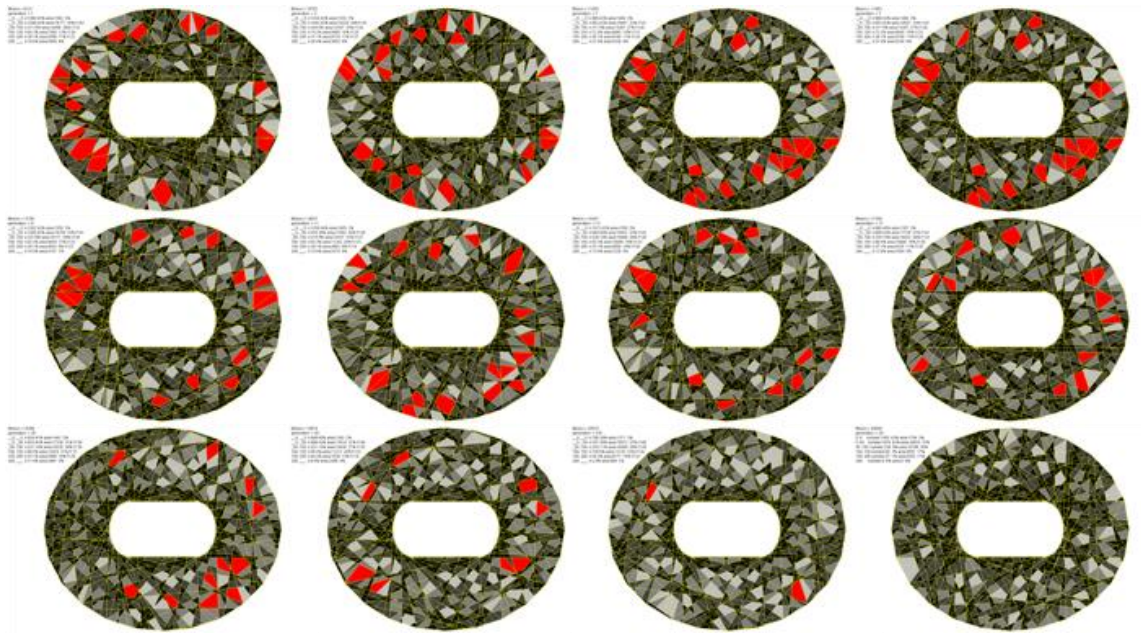
Şekil 4.24 : Kabuk ile tribün yapılarının ayrı işleyen inşaat süreci (Url-13).

Oluşturulan kabuk tribünleri oluşturan kase şeklindeki kütleye olabildiğince yakın olacak şekilde sarılarak, eğimli duvarlara sahip eliptik geometride bir plan ve çatı yüzeylerini oluşturan bir eğerden oluşturulmuştur.

Birincil geometriyi oluşturan uzay kafeslerin en yüksek noktaları 60 metre yüksekliğindedir ve geçtikleri açıklığın uzunluğu 313 metredir.

İkincil geometri, ana yapı elemanlarının alt bölümlenmelerini yapmaktadır ve cephenin dış katmanında yer almaktadır.

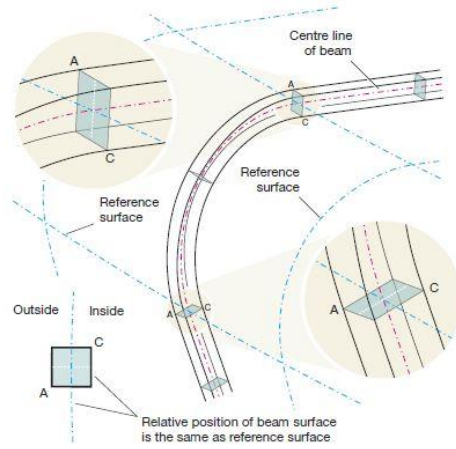
İlk geometriyi oluşturmak için yazılım kullanılmasına rağmen tasarımı son haline getirmek için elemanların yerleri tasarımcı tarafından değiştirilerek son haline getirilmiştir. Yazılım sayesinde, sisteme yeni bir giriş tanıtıldığında, oluşan maksimum ve minimum büyüklük aralığında yer alan üçgenleri sağlayan (kırmızı ile işaretlenmiş geometriler, yazılımın parametre dışı tutup kabul etmediği geometrilerdir) eniyilemeyi hesaplamak için haftalarca sürececek bir zaman kaybı yerine, kabul edilebilir hesaplama süreleri içerisinde tasarımcının kabuk tasarımını değiştirmesi mümkün kılınmıştır (Şekil 4.25). Genetik algoritmaların evrimsel süreçlerini uygulayarak maksimum ve minimum büyüklükteki geometriler arasındaki gerekli eniyileme sağlanmıştır. Düzensiz ve kaotik yapının performatif bir şekilde ele alınışına örnek olarak verilebilir (Url-13). Heykelsi yapı mühendis ile mimarın yakın çalışma ilişkisini ortaya koyar niteliktedir (Burrows ve Simpson, 2009).



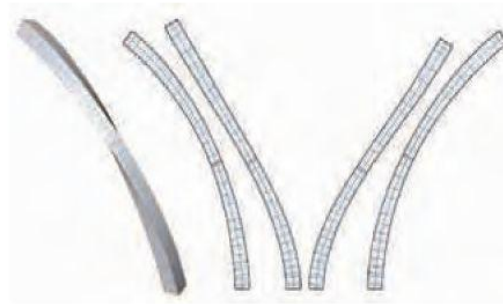
Şekil 4.25 : Kabuk örgüsünün genetik algoritmalarla eniyilemesi (Url-13).

Stadyum geometrisi içerisinde gerçekleştirilmesi en zor olan parça, bütün cepheyi saran devamlı kutu profilydi. Kutu profili, stadyum geometrisinin en dış katmanına paralel olan bir kontrol yüzeyiyle tanımlanmıştır. Kutunun dış flanji kontrol yüzeyine daima paralel kalarak, dönen ve kıvrılan bir yüzey oluşturmuştur. Bu dönme, özellikle stadyumun saçak bölgesinde belirgindir (Şekil 4.26).

CAD yazılımının kullanımı stadyumun inşasında kritik rol oynamıştır. Otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan CATIA yazılımı sayesinde karmaşık yüzeyler ve elemanların geometrik detayları tek bir yazılım ortamında bir araya getirilebilmiştir. CATIA ile oluşturulan model, bütün taşıyıcı elemanları ve aralarında olan etkileşimleri içermektedir. Bütün yapı elemanların birleştirilip test edildiği yaklaşıma "sanal prototipleme" (virtual prototyping) denmektedir. CATIA parametrik bileşenlere dayalı bir modelleme yazılımıdır. Parametrik yazılım kullanarak, aynı model üzerindeki bazı parametrelerin sayısal değerlerini değiştirerek tasarımın farklılaştırılması ve varyasyonların oluşturulması sağlanır. Bu parametreler bileşenlerin boyutları, açıları vb. olabilir (Burrows ve Simpson, 2009).



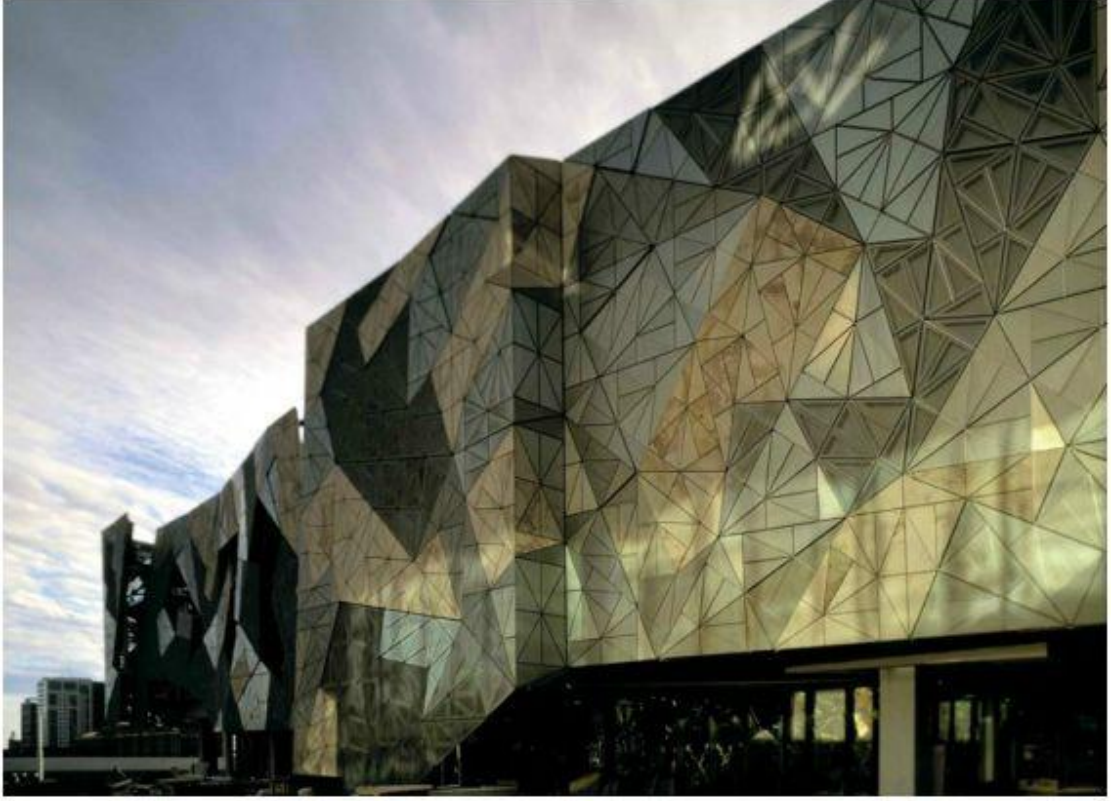
11. Detail of curved element at the eaves.



12. Twisted element, showing the four surfaces flattened out.

Şekil 4.26 : Cepheyi saran kutu profillerin geometri oluşumu (Burrows ve Simpson, 2009).

Lab Architecture Studio ve Bates Smart Architects'in birlikte 2002 yılında Avustralya'nın Melbourne şehrindeki Federasyon Meydanı'nı (Federation Square) çevreleyen binalar için yaptıkları cephe tasarımı, fraktal kurgu taşımaktadır (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 : Federasyon Meydanı'ndaki fraktal kurguya sahip bina cephesi (URL-15).

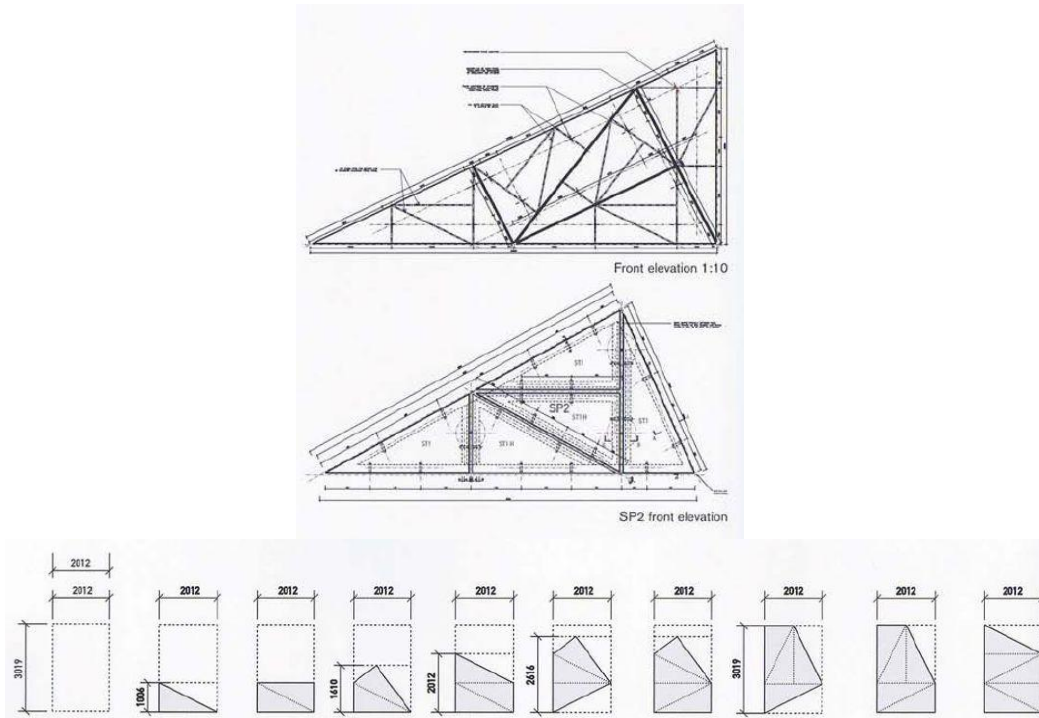
Farklı eyaletlerden oluşan Avustralya'yı birleştiren ve ulus bilinci oluşturma amacı taşıyan Federasyon Meydanı, bina cephelerinin geometrilerinde gözlemlenen küçük birimlerin birleşerek daha büyük birimleri oluşturması ve aynı zamanda da kendine benzeme özelliği barındırmasıyla mimariyi, "farklılıklara rağmen birliktelik" mesajı vermek için kullanmaktadır (Burry ve Burry 2012).

Cephe sistemi, fraktal kurgu sayesinde Federasyon Meydanı'ndaki farklı binaların birbirlerinden farklılaşırken aynı zamanda kendine benzerlik özelliği ile genel bir bütünlük hissi vermektedir. Söz konusu farklılıklar, gerekli endüstriyel, prefabrike inşaat teknikleri dahilinde yüzey ve malzeme değişiklikleri ile sağlanmaktadır. Cephelerde kumtaşı, masif veya delikli çinko ve cam gibi farklı malzemelerden üretilmiş modüler levhalar, üçgensel fırıldak ızgarası (triangular pinwheel grid) oluşturacak biçimde kullanılmıştır (Şekil 4.28). $1:2:\sqrt{5}$ oranına sahip üçgen levhalar,

5'li kümeler halinde birleşerek daha büyük üçgenleri oluşturmakta, yeni ortaya çıkan büyük üçgenlerden 5 tanesi yine birleşerek bir sonraki ölçekteki üçgen levhaları oluşturmaktadır (Şekil 4.29).



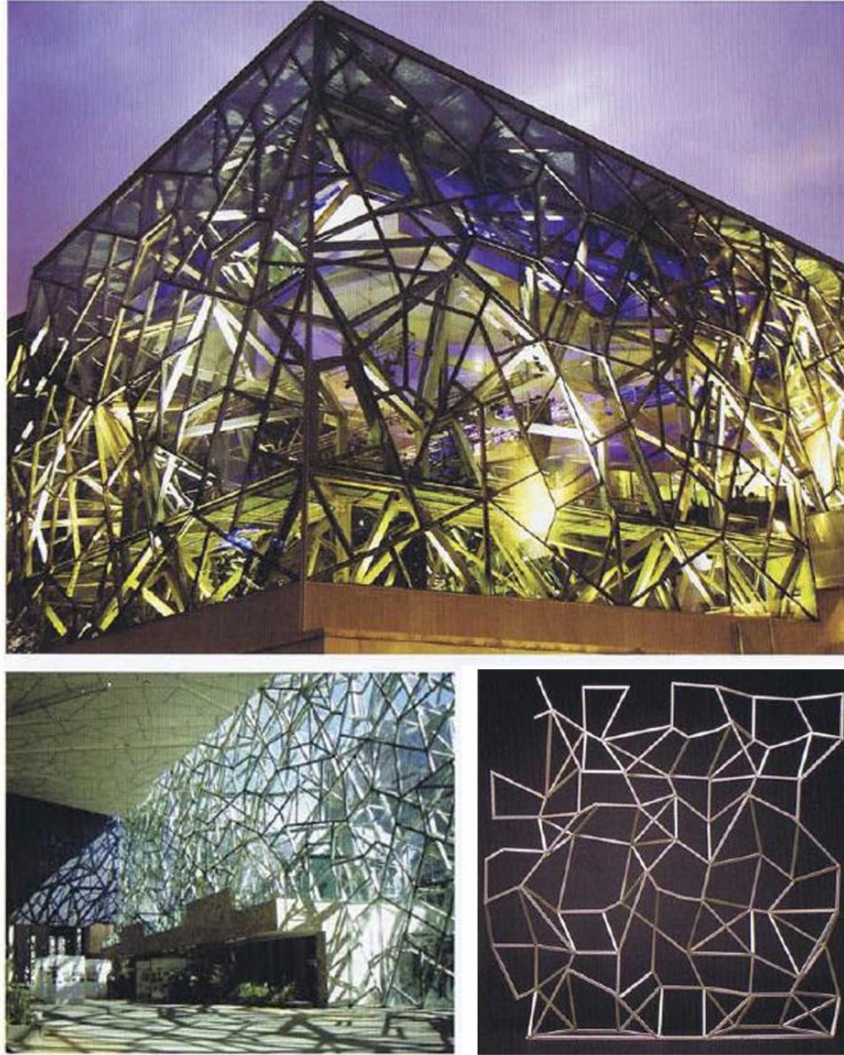
Şekil 4.28 : Federasyon Meydanı'ndaki binası cephesi detayı (URL-16).



Şekil 4.29 : $1:2:\sqrt{5}$ oranındaki üçgenlerin birleşim şeması (Burry ve Burry 2012).

Bu şekilde devamlı değişimler sağlanarak sadece binalar arasında değil, aynı binanın farklı cepheleri arasındaki tekdüzeliğin önüne geçmek amaçlanmıştır (Burry ve Burry 2012).

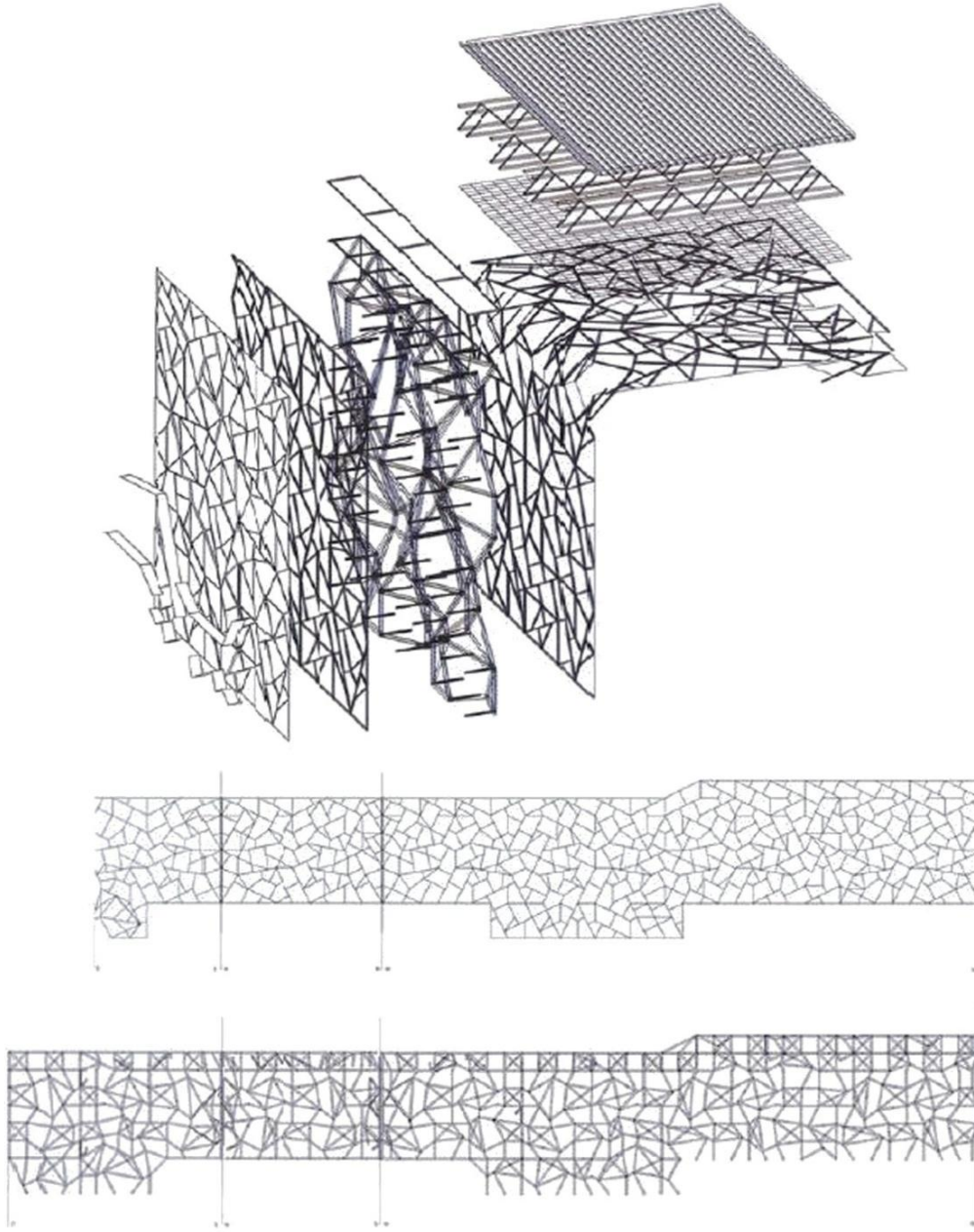
Federasyon Meydanı'nda yer alan Kuzey Atriyum (Şekil 4.30) binası, geometrisini diğer cephelerde olan üçgensel geometrilerden alan, galvanize çelikten yapılmış taşıyıcı çerçevelerden oluşmaktadır.



Şekil 4.30 : Kuzey Atriyum Binası (Burry ve Burry 2012).

Burada diğer cephelerde okunan birleştirici üretken geometri kolaylıkla okunamamaktadır. Önceki üçgensel cephe geometrilerinden farklı olarak, atriyum cephesi hem içe hem de dışa doğru katlanmış üç boyutlu sistemden oluşmaktadır (Burry ve Burry 2012). Strüktür 200 milimetrelik kutu profillerden oluşmaktadır ve çift cidarlı cepheyi oluşturan çerçeveler arasında ortalama olarak 1.5 metre boşluk yer almaktadır (Şekil 4.31). Çerçeveler 4 ile 5 kenardan oluşan düzensiz

poligonlardan oluşmaktadır ve önceki cephelerde kullanılan "fırıldak ızgara" ya göre konumlandırılmışlardır. İki cidar, düzlem dışı çapraz bağlantılarla birleştirilerek rüzgar yüklerine direnç için gerekli olan yanal dayanımı sağlamaları mümkün kılınmıştır (Fraser ve diğerleri, 2003).



Şekil 4.31 : $1:2:\sqrt{5}$ oranındaki üçgenlerin birleşim şeması (Burry ve Burry 2012).

İç ve dış cidarları oluşturan cephe geometrileri ve onları birbirine bağlayan çapraz elemanlar arasındaki varyasyonlar, sahip oldukları karmaşık yapı nedeniyle Benoit Mandelbrot'un fraktal geometri tanımına uymaktadır (Burry ve Burry 2012).

5. BİNA KABUĞU TASARIM SÜRECİNDE KULLANILABİLECEK ÜRETKEN MODEL YAKLAŞIMLARI

Üretken sistemlerin kullanımıyla tasarımcı çok sayıda alternatif son ürünü gözden geçirerek kendi beğenisine ve mimari programa en çok uygun olan ürünü seçme avantajına sahiptir. Üretken sistemlerde varyasyon üretmek alışıldık yöntemlere göre çok daha hızlı olduğundan, gerekli olan durumlarda mimar birden fazla tasarım alternatifi elde edebilmektedir. Önerilen modelde elde edilmek istenen kavramsal bina kabuğu tasarımı aşamasında mimara yardımcı olabilecek bütüncül bir örüntü sistemi kurgulamaktır. Doğadaki yapılanmalar geometrik açıdan değerlendirildiğinde topolojik açıdan bir uyum içerisindedir. Özellikle bitki türleri incelendiğinde, sahip oldukları fiziksel ve kimyasal etkenlerle yönlendirilen dallanma sistemleriyle kendine-benzeme özelliği göstermektedirler. Bu nedenle tasarımın çıkış noktasını oluşturan algoritmayı oluşturmak için Lindenmayer sistemlerinden yararlanılarak bütüncül olarak gelişen ve yapılacak parametrik değişikliklere bütüncül olarak yanıt verebilecek bir bina kabuğu modeli oluşturulacaktır.

5.1 Üretken Sistem Önerisi

Modelde üretken sistem olarak kullanılacak olan L-sistemleri, önceki bölümde incelenen (Bölüm 4.1) Toyo Ito & Associates tarafından Tokyo'nun Aoyama bölgesindeki Omotomachi Caddesi üzerinde yapılmış olan Tod's binasının kavramsal cephe tasarımı aşamasında kullanılmıştır. Önerilen model ile, L-sistemlerinin yeniden yazma özelliklerinden yararlanılarak, binaların kavramsal tasarım aşamasında kullanılabilir bir kabuk sistemi oluşturulmak istenmektedir. Bunun için bu binaların, plan düzlemleri ile cephe kurguları arasındaki ilişkiler bakımından Tod's binasında olduğu gibi, cephe ile plan arasında kesin ve rasyonel ilişkiler bulunmayan, esnek planlamaya dayanan bir kabuk sistemi düşünülebilir. Alışveriş yapılarının kendi içlerine dönük olan kurguları, kabuk sistemi açısından bakıldığında, planı kabuk kurgusundan koparmayı mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşımın türettiği çözümleri Toyo Ito'nun Tod's ve Mikimoto Ginza 2 binalarında görmek mümkündür

(Bölüm 4.1). Bina kabuğu geçirgen ve geçirgen olmayan olmak üzere iki ana alt başlığa ayrılabilir.

5.2 Lindenmayer Sistemlerinden Üretken Sistem Olarak Yararlanılması

Lindenmayer sistemlerinin belit, üretim kuralları ve özyineleme sayısına bağlı olarak türettikleri dizgiler kaplumbağa grafikleri tarafından görselleştirilmektedir. L-sistemlerinin karmaşık biçimleri üretmedeki hızları, oluşan biçimde genellikle rastlanan kendine-benzeme özelliği ve varyasyon üretmenin kolaylığı L-sistemlerini mimari tasarım için cazip bir üretken sistem yapmaktadır.

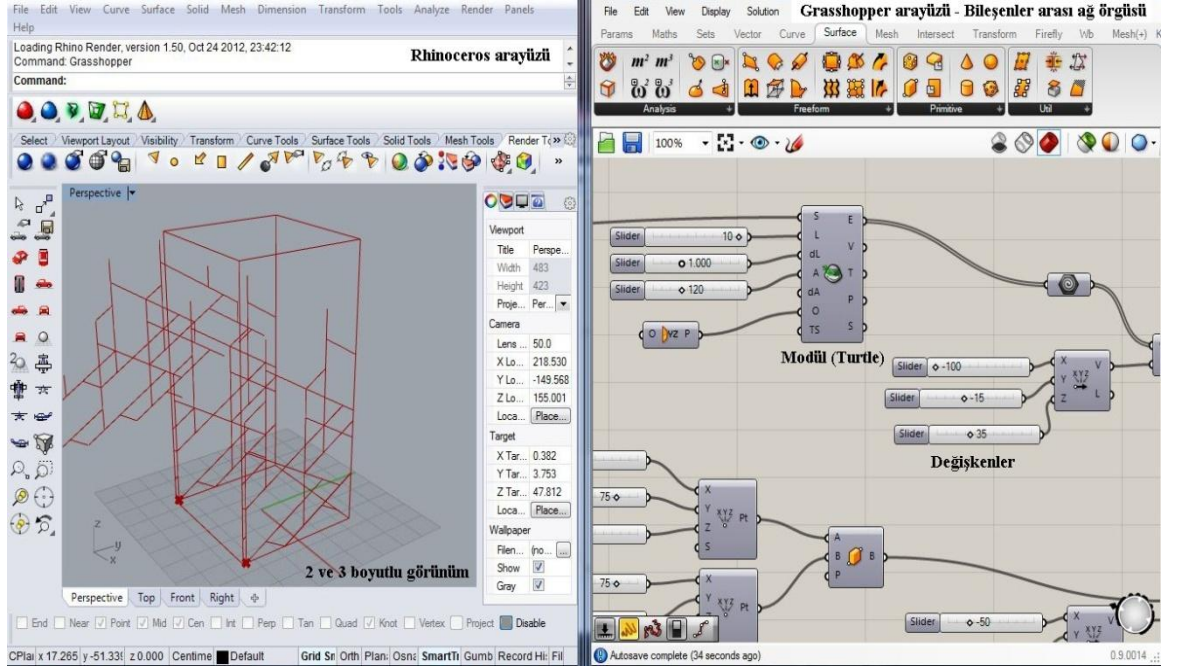
Oluşturulan cephe sistemi modeli için iki farklı üretken sistem yaklaşımında bulunulmuştur. Bu yaklaşımlardan ilkinde, L-sistemleri iki ve üç boyutlu geometriler oluşturacak biçimde düzenlenerek Toyo Ito'nun Tod's binasında uyguladığı yaklaşım kullanılacaktır. Bu yöntem izdüşüme dayalı yaklaşımdır. Dallanan bir yapı oluşturmak istendiği için L-sistemleri gramerlerinden parantezli DOL-sistemi kullanılacaktır.

İkinci üretken sistemde ise, binanın kütesinin içinde oluşturulan ağaç benzeri üç boyutlu geometrinin binanın dış kabuğuyla yaptığı kesişimler üzerinden cephe biçimlenmesi sağlanacaktır. Geometriyi oluşturmada metaball adındaki bileşenlerden yararlanılacaktır. Bu nedenle bu yöntem metaball yöntemi olarak adlandırılmıştır.

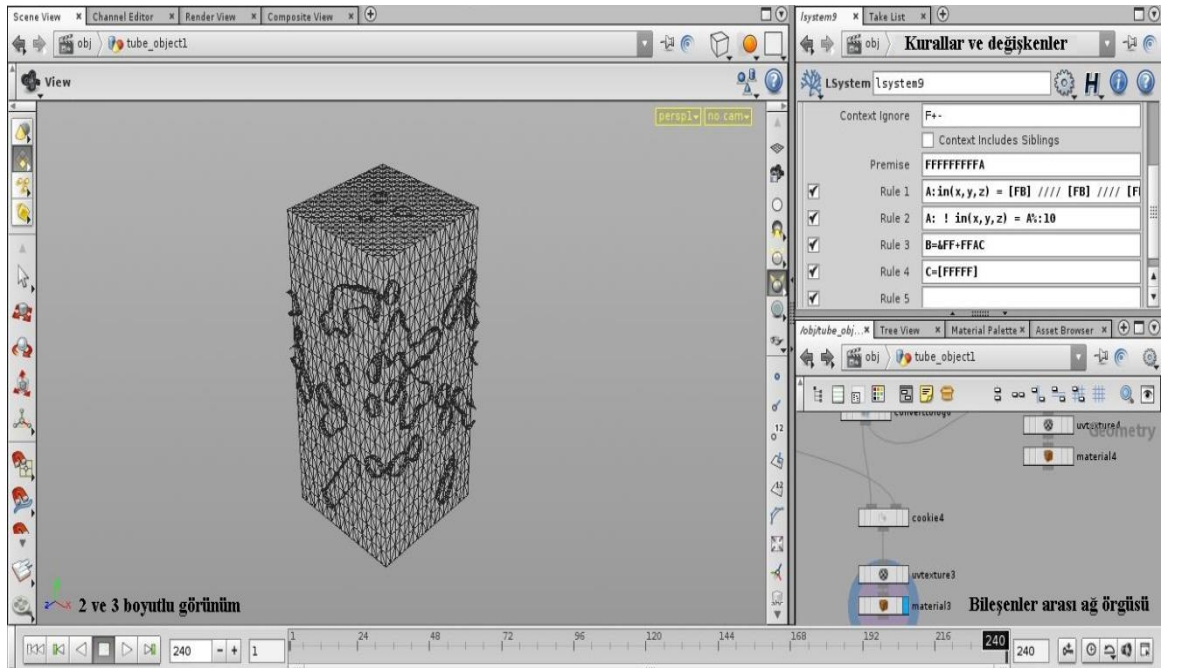
İki model de izledikleri farklı geometrik dönüşümler nedeniyle farklı yazılımlarda kurulmuşlardır. Bu farklılık L-sistemlerden ve kaplumbağa grafiklerinden sonra gelen aşamalar nedeniyle ortaya çıkmıştır. İzdüşüm yöntemi Rhinoceros yazılımının Grasshopper eklentisi ortamında yapılmıştır (Şekil 5.1). L-sistem ve kaplumbağa grafikleri Grasshopper'ın Rabbit eklentisi ile türetilmiş olup, algoritmanın ilerleyen aşamalarında ise Grasshopper'da olan "izdüşüm yansıtma", "taşım", "aynalama", gibi bileşenlerden yararlanılmıştır.

Metaball yönteminde ise metaball geometrisini türetmek için Grasshopper yazılımından çok daha hızlı olan Houdini yazılımı kullanılmıştır. L-sistemler ve kaplumbağa grafikleri Houdini yazılımında bulunan modül ile türetilmiştir (Şekil 5.2). Sonraki aşamalarda ise Houdini yazılımında bulunan diğer bileşenlerden yararlanılmıştır.

Algoritmalar düzenlenirken yazılım arayüzlerinde ağ örgüleriyle istenen ilişkiler kurulmuştur.



Şekil 5.1 : Rhinoceros ve Grasshopper yazılımlarının arayüzleri.



Şekil 5.2 : Houdini yazılımının arayüzü.

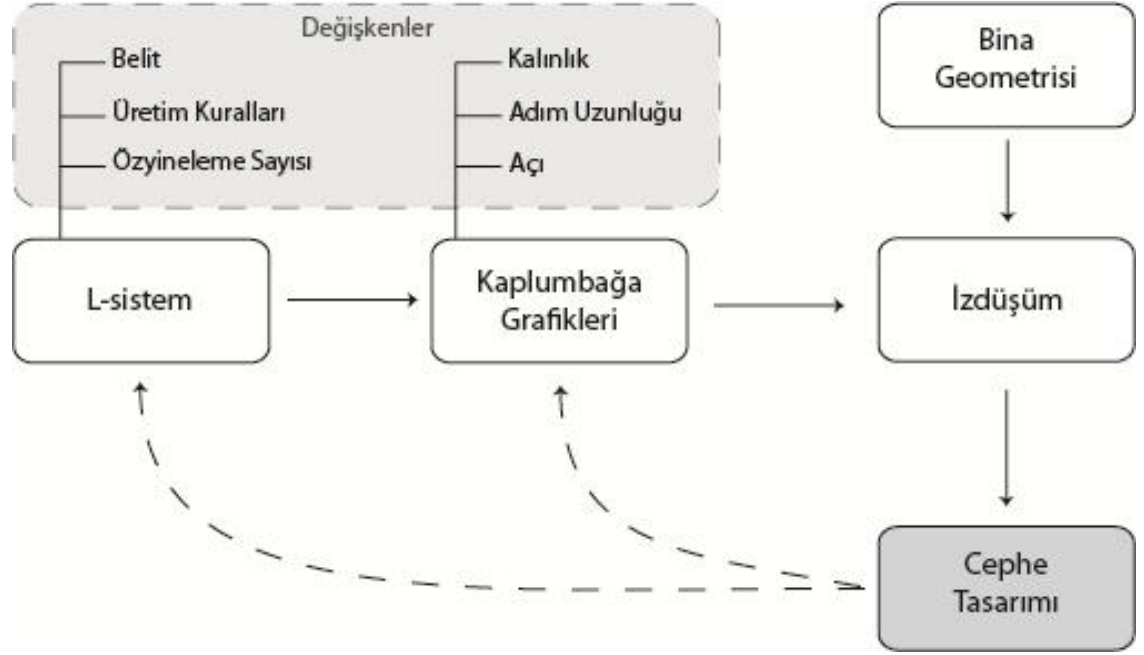
L-sistemlerinin dizgi türetimi ve kaplumbağa grafikleri tarafından yorumlanış aşamalarında Aristid Lindenmayer ve Przemyslaw Prusinkiewicz'in "The Algorithmic Beauty of Plants" kitabındaki alfabe (semboller) kullanılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 : Geliştirilen modelde kullanılan kaplumbağa komutları.

Kaplumbağa Komutları		
L-sistemi Alfabeti	Tanım	Etmen davranışı
F(d)	çiz	d uzunluğunda çizgi çizer.
f(d)	çizmeden devam et	d uzunluğunda çizgi çizmeden devam eder.
+(δ)	sola dön	+x eksenini etrafında, δ açısında döner.
-(δ)	sağa dön	+x eksenini etrafında, δ açısında döner.
^(δ)	yukarı yunuslama yap	+z eksenini etrafında, δ açısında döner.
&(δ)	aşağı yunuslama yap	+z eksenini etrafında, δ açısında döner.
\(δ)	sola yuvarlan	Kendi eksenini etrafında, δ açısında döner.
/ δ)	sağa yuvarlan	Kendi eksenini etrafında, δ açısında döner.
	geri dön	180 derece döner
J	konuma nokta koy	Kaplumbağanın bulunduğu konuma nokta koyarak düğüm noktası oluşturur.
"(s)	uzunluğu çarp	Mevcut uzunluğu s değişkeniyle çarp.
!(s)	kalınlığı değiştir	Mevcut kalınlığı s değişkeniyle çarp.
[dallanmayı başlat	Yeni bir dal oluşumunu başlatır.
]	dallanmayı bitir	Dal oluşumunu bitirir.
A/B/C/D...	yer tutucu	İlgili harfin kuralına geçişi sağlar.
:	koşullu ifade	Koşula bağlı kural uygulamasını sağlar.

5.3 İzdüşüme Dayalı Yaklaşım

İzdüşüme dayalı yaklaşımın temelinde L-sistemlerin türettikleri dizgilerin kaplumbağa grafikleri ile oluşturduğu geometrinin izdüşümünü bina cephesine yansıtarak bina kabuğunu biçimlendirme fikri yatmaktadır. Sonraki aşamada bu yansıtılan geometri örgüsü kalınlaştırılıp inceltilerek cephedeki doluluk-boşluk kurgusu düzenlenir (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 : Algoritma akış tablosu.

Bu yöntemle bina kabuğu biçimlendirilirken L-sistem iki veya üç boyutlu olabilir. İki boyutlu L-sistemin kullanıldığı durumda geometri tıpkı Tod's binasında olduğu gibi cepheye aktarılır.

Üç boyutlu L-sistemde ise, kaplumbağa grafiklerinin çizime başladıkları nokta bina tabanının merkez noktasıdır. Böylece bina türetilen geometriyi içinde bulundurur. Sonraki aşamada ise binanın iç hacminde oluşturulan geometri paralel izdüşüm tekniğiyle bina cephelerine yansıtılarak tasarım oluşturulur.

5.3.1 Kurallar

Üretken sistem olarak kullanılan iki boyutlu L-sisteminin beliti ve üretim kuralları aşağıdaki gibidir:

$$V=\{F, [,], +, -\}$$

$\omega : F$

$p_1 : FF[+F]F-[+F]F$

Üretken sistem olarak kullanılan üç boyutlu L-sistemin beliti ve üretim kuralları aşağıdaki gibidir:

$V=\{F, A, L, S, ', /, |, ^, \%, !, \&, [,], +, -\}$

$\omega : A$

$p_1 : A \rightarrow [\&FL!A] // // // [\&FL!A] // // // [\&FL!A]$

$p_2 : F \rightarrow S // // // F$

$p_3 : S \rightarrow F L$

$p_4 : L \rightarrow [""^{ \wedge } \{ -F+F+F-|-F+F+F \}]$

5.3.2 Değişkenler

Cephe tasarımını etkileyen değişkenler, üretken sistem algoritma akış şemasında belirtilmiştir (Şekil 5.3). L-sisteme bağlı olan değişkenler, dizgiyi oluşturan belit, üretim kuralları ve özyineleme sayısı n'dir. Özyineleme sayısı arttıkça geometri karmaşıklığı artarak büyümektedir.

Sonraki aşamada kaplumbağa grafiklerine bağlı olan değişkenler yer almaktadır. Bu değişkenler her F komutu için çizilecek çizginin uzunluğunu belirleyen d ve açısı değeri olan δ 'dır. δ doğrultu değiştirmenin olduğu her birim ilerlemede doğru parçaları arasında bulunan açıdır. k değişkeni ise, kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş geometrinin kalınlığını belirler.

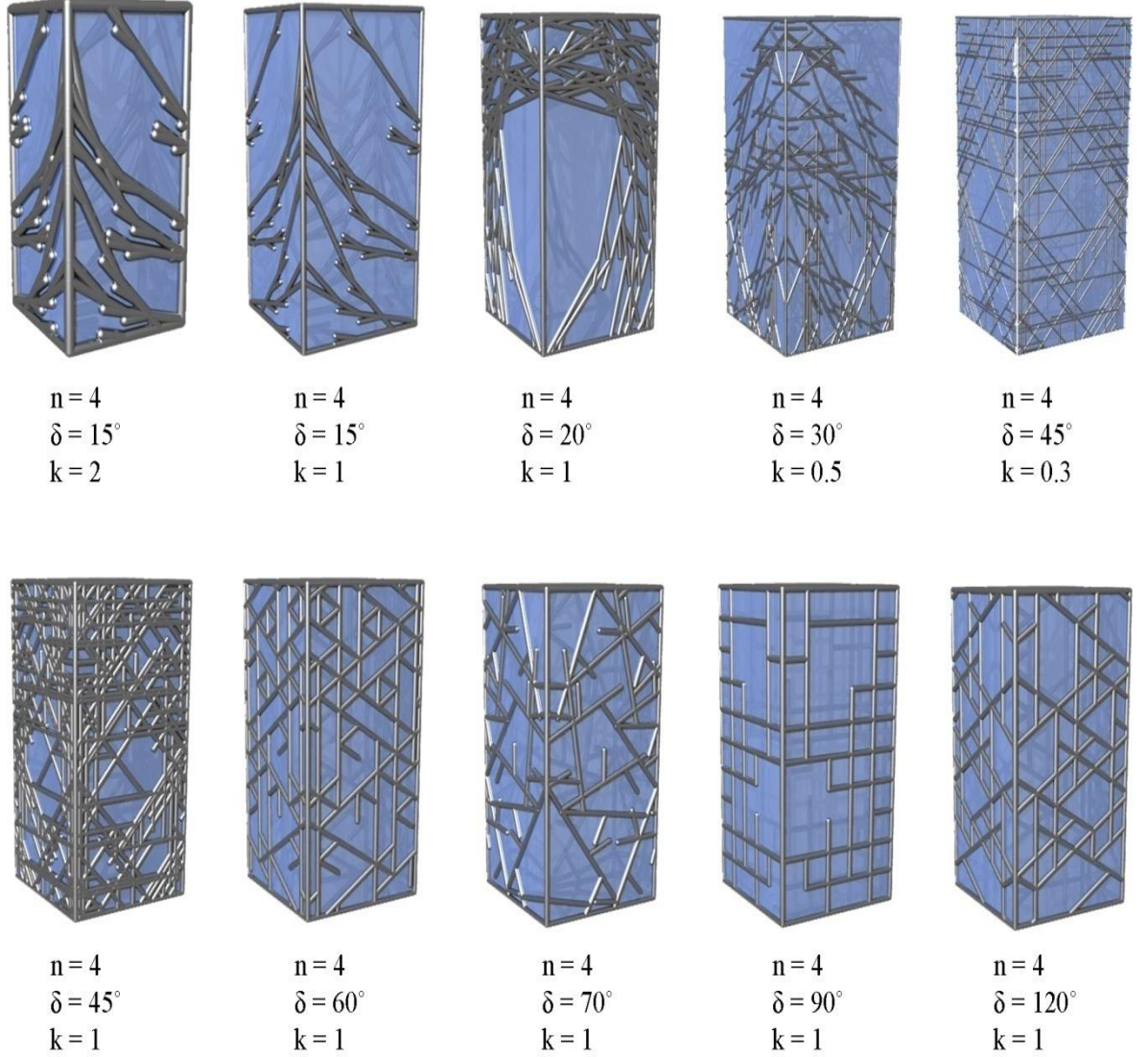
5.3.3 Türetilen parametrik varyasyonlar

Yukarıda bahsi geçen değişkenler dahilinde iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere iki farklı yaklaşımla bina kütlesi üzerine yansıtma yöntemi uygulanmıştır. Üretimler Grasshopper Yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

5.3.3.1 İki boyutlu L-sistemi

İki boyutlu L-sistemindeki geometri izdüşümü olduğu gibi bina cephesine aktarılır. Değişkenlere bağlı olarak üretilmiş farklı tasarımlar aşağıdaki görselde

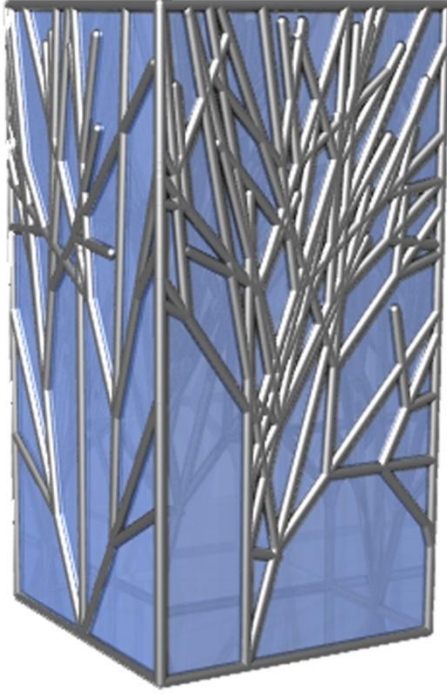
görülmektedir (Şekil 5.4). Bina kabuğundaki geometrileri birleştirmek için, bina kenarlarından geçen bir çerçeve eklenmiştir. $\delta = 15^\circ$, $\delta = 20^\circ$ ve $\delta = 30^\circ$ değerlerinde bitkilerde görülen dallanmalara benzer yapılar gözlemlenirken $\delta = 45^\circ$, $\delta = 60^\circ$ ve $\delta = 120^\circ$ değerlerinde ise diagrid düzenine sahip geometriler ortaya çıkmıştır. $\delta = 90^\circ$ değerinde ise dik kenarlara sahip bir geometri ortaya çıkmıştır.



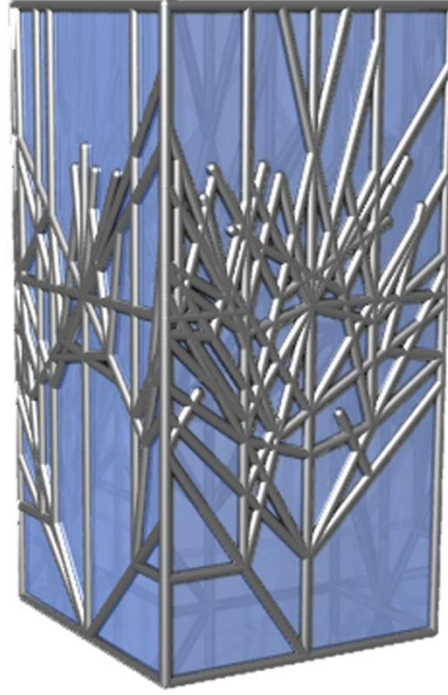
Şekil 5.4 : İki boyutlu L-sistemiyle türetilmiş cephe tasarımları.

5.3.3.2 Üç boyutlu L-sistemi

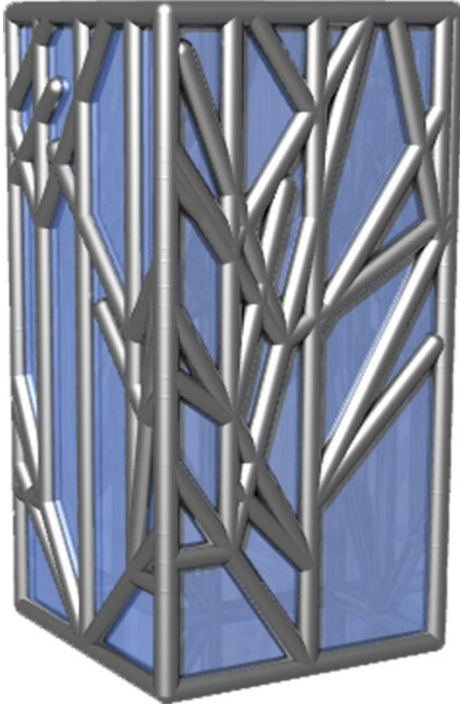
Üç boyutlu L-sistemindeki geometri paralel izdüşüm tekniği ile bina cephesine yansıtılır. Görselde değişkenlere bağlı olarak üretilmiş farklı tasarımlar görülmektedir (Şekil 5.5). Bu yaklaşımda karşılaşılan zorluk, yansıtılan geometrilerin bina köşelerinde nadiren birleşmeleridir. Bu nedenle bina köşelerinden geçen bir çerçeve tasarıma eklenerek görsel ve strüktürel devamlılık sağlanmıştır.



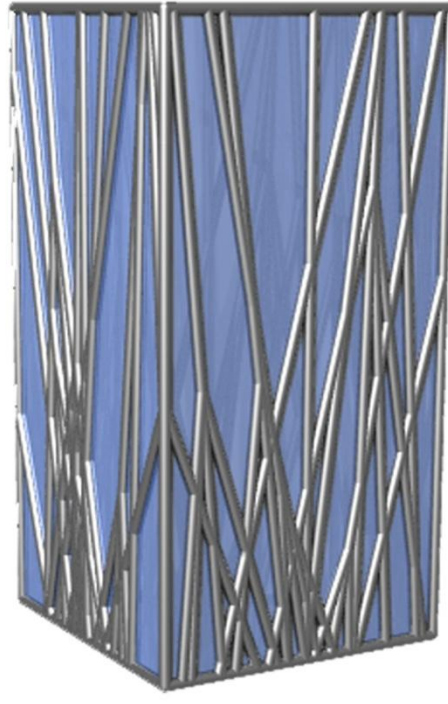
$n = 5$
 $\delta = 30^\circ$
 $k = 1$
 $d = 20$



$n = 4$
 $\delta = 45^\circ$
 $k = 1$
 $d = 20$



$n = 4$
 $\delta = 45^\circ$
 $k = 2$
 $d = 21.25$

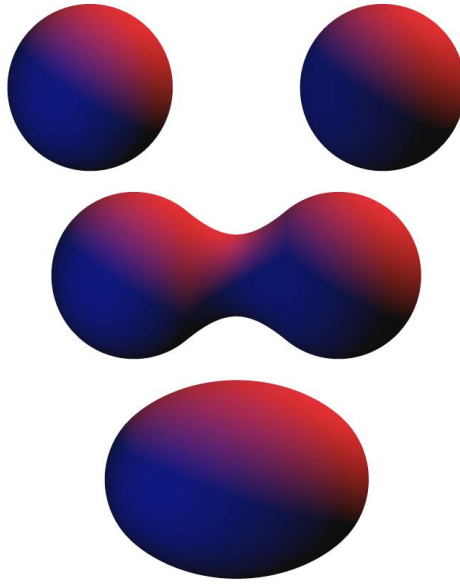


$n = 4$
 $\delta = 190^\circ$
 $k = 1$
 $d = 21.6$

Şekil 5.5 : Üç boyutlu L-sistemiyle türetilmiş cephe tasarımları.

5.4 Metaball Yaklaşımı

Metaball, bilgisayar grafikleriyle oluşturulmuş organik görünümlü n-boyutlu objelere verilen addır. 1980'lerin başında Jim Blinn metaball'ları bilgisayar grafiklerine adapte edip grafiksel yorumlanmalarını sağlayacak yöntemi bulmuştur. Metaball'lar taşıdıkları alan çekim kuvvetleri doğrultusunda birbirlerine yaklaşınca biçim değiştirip uzayarak birleşen ve ayrılırlarken, tam tersi şekilde uzayarak kopan formlardır (Şekil 5.6) (Blinn, 1982).

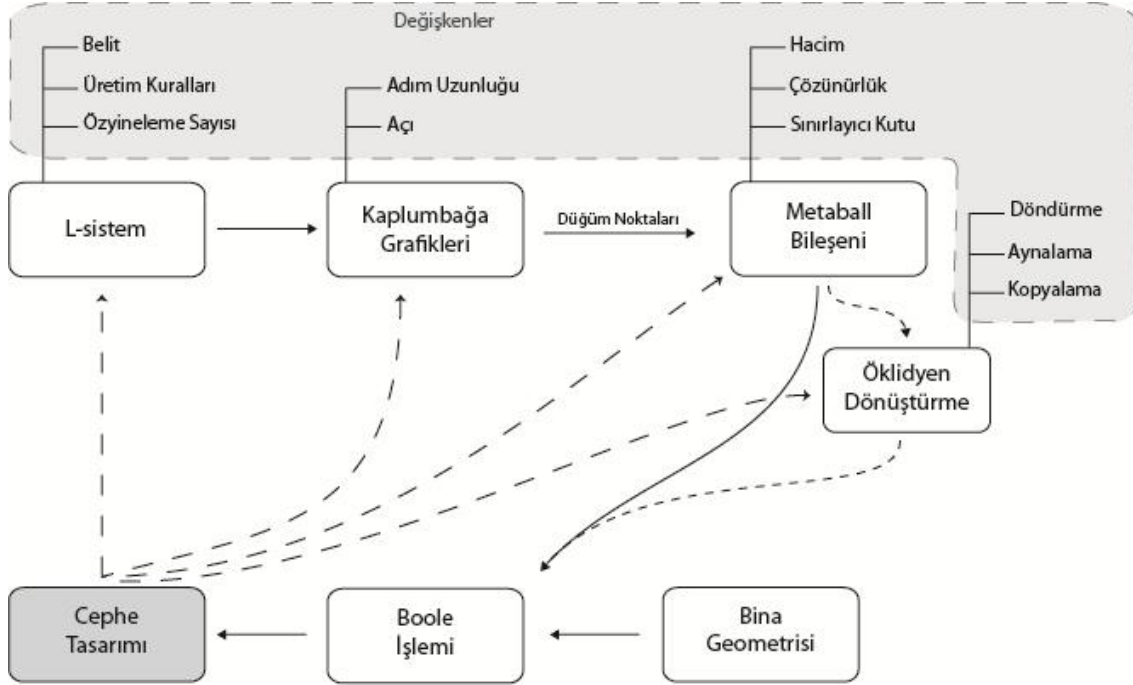


Şekil 5.6 : Metaball'ların birleşimi (Url-22).

Uzayıp birleşme özelliğine sahip metaball'lar L-sistemlerle oluşturulmuş geometri ile birleştirilebilir. L-sistemlerle oluşturulmuş geometrinin her bir düğüm noktasına (node) bir metaball konumlandırarak ve onların hacim ilişkilerinde değişiklikler yapılarak mercan benzeri dokuya sahip organik formlar elde edilebilir.

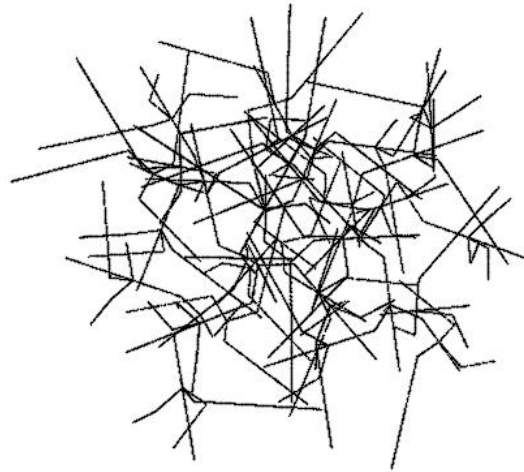
Modelde (Şekil 5.7) L-sistemleri gramerlerinden parantezli ve olasılıksal olanı kullanılmıştır. L-sistemiyle üretilmiş dizgi çizime binanın taban alanının merkezinden başlayan kaplumbağa grafikleriyle geometriye dönüştürülür (Şekil 5.8). Bu yöntemin öncekinden farkı, kaplumbağa grafiklerinin oluşturduğu geometrideki düğüm noktalarının kullanımındır. Düğüm noktaları, kaplumbağanın her adımının (F) sonunda oluşturduğu noktalardır. Bu düğüm noktalarının her birine metaball bileşeni tarafından birer metaball konumlandırılır. Metaball'lar birbirlerine olan yakınlıkları nedeniyle etkileşime girerek uzayıp birleşirler ve devamlı geometrik iskeleti çevreleyen hacimleri oluştururlar (Şekil 5.9). Yeni oluşan kütle kendini

çevreleyen bina geometrisi ile kesiştiği noktalarda Bool işlemi uygulanarak boşluklar açılır ve cephedeki boşluklar oluşturulmuş olur. Kütle bina kabuğunu delip geçtikten sonra metaball bileşenine ait olan sınırlayıcı kutu ile kütle 50 cm daha uzatılarak güneş kırıcılarını oluşturması sağlanır (Şekil 5.10).

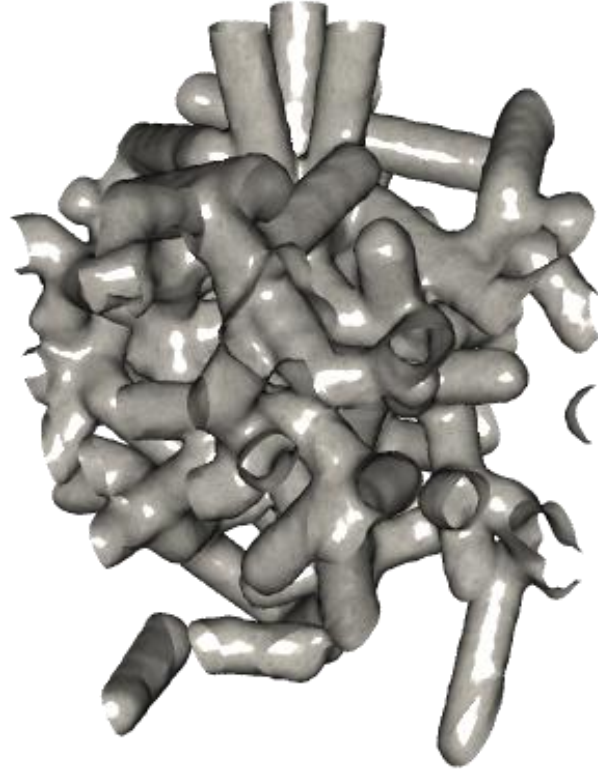


Şekil 5.7 : Algoritma akış tablosu.

Bu üretken modeli kurgulamak için metaball'ları Rhino/Grasshopper'a göre çok daha hızlı biçimde görselleştirebildiği için Houdini Yazılımı kullanılmıştır. L-sistem dizgileri yazılım içindeki L-sistem modülü ile oluşturulmuştur. Süreç Şekil 5.7'deki algoritma akış şemasına göre işler. Son ürünle ilgili bir değişiklik istendiğinde üretken sistem parametreleri ile oynanarak yeni sonuçlar elde edilir.



Şekil 5.8 : L-sistem ve kaplumbağa grafikleriyle oluşturulmuş geometri.



Şekil 5.9 : Metaball'lar ile oluşturulmuş iskelet.



Şekil 5.10 : Oluşturulan cephe tasarımı.

5.4.1 Kurallar

Üretken sistemin başlangıcında bulunan L-sisteminin beliti ve dört üretim kuralları aşağıdaki gibidir:

$$V = \{F, A, B, C, /, %, !, \&, [,], +, -\}$$

$$\omega : \text{FFFFFFFFFA}$$

$$p_1 : A : \text{in}(x,y,z) = [\text{FB}] \text{ /// } [\text{FB}] \text{ /// } [\text{FB}] : 80$$

$$p_2 : A : ! \text{in}(x,y,z) = A \%$$

$$p_3 : B = \& \text{FF} + \text{FFAC}$$

$$p_4 : C = [\text{FFFFFF}]$$

Üretim kuralları arasında yer alan "in" sınaması, kaplumbağanın bir sonraki özyinelemede çizeceği geometrinin x, y ve z ile tanımlanan geometrinin (bu durumda bina geometrisi) dışına çıkmamasını sağlar. Kullanılan ":" sembolü, "eğer" anlamı taşımaktadır. Bu durumda üretim kurallarından p_1 'e göre eğer üretilen geometri tanımlanmış sınırlar dahilindeyse %80 olasılıkla p_1 , %20 olasılıkla da p_2 kuralı uygulanarak ilerleyen dallanmalar "%" komutu ile budanır. Bu bir önceki düğüm noktasına geri dönme anlamına gelir. p_3 ve p_4 kuralları ise dallanma geometrilerini belirlerler.

5.4.2 Değişkenler

Cephe tasarımını etkileyen değişkenler, üretken sistem algoritma akış şemasında belirtilmiştir. L-sisteme bağlı olan değişkenler, dizgiyi oluşturan belit, üretim kuralları ve özyineleme sayısıdır. Şekil 5.7'de kullanılan özyineleme sayısı $n = 9$ 'dur. Özyineleme sayısı arttıkça geometri yoğunlaşarak büyümektedir.

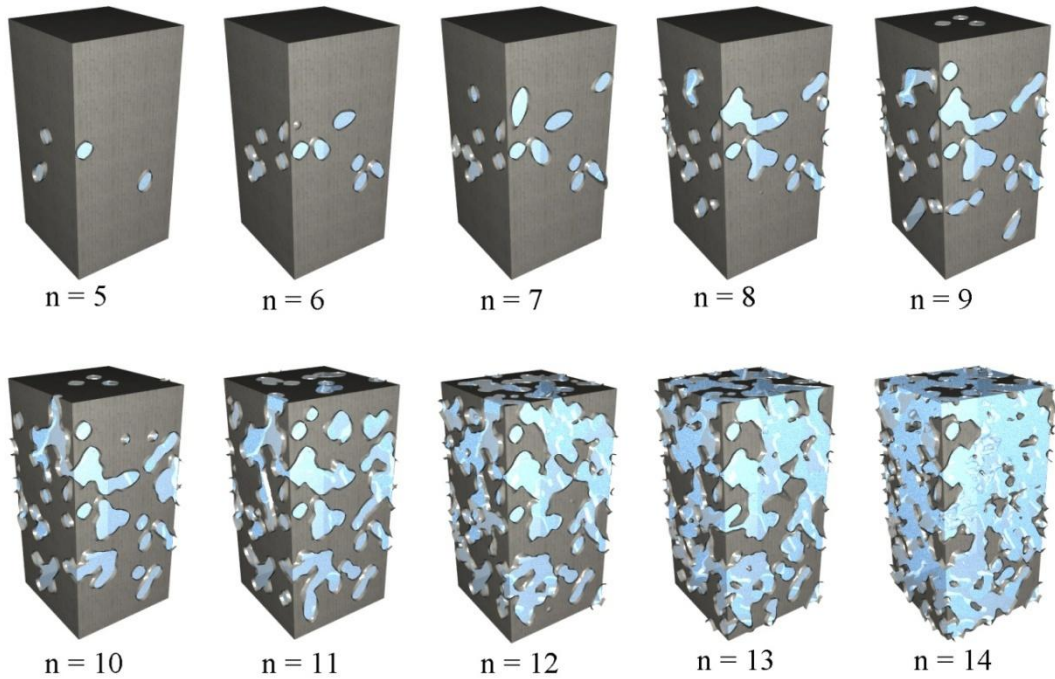
Sonraki aşamada kaplumbağa grafiklerine bağlı olan değişkenler yer almaktadır. Bu değişkenler, her F komutu için çizilecek çizginin uzunluğunu belirleyen d ve açısı olan δ 'dir. δ doğrultu değişiminin olduğu her birim ilerlemede doğru parçaları arasında uygulanan açıdır. Şekil 5.10'da gösterilen örnekte $\delta = 60^\circ$ değerindedir.

Metaball bileşeni üç farklı değişkenden oluşmaktadır. Bunlar metaball'ların büyüklüklerini belirleyen hacim değeri, metaball'ların birleşim noktalarının detay seviyesini belirleyen çözünürlük ve oluşan iskeletsi yapının büyüme sınırlarını belirleyerek, o sınırlarda geometriyi kesen sınırlayıcı kutudur. Bu değişkenlerden olan hacim, cephede açılan boşluk büyüklüklerini belirlerken, çözünürlük değişkeni sadece üç boyutlu geometrinin daha yumuşak hareketlerle oluşturulmasını sağlar. Sınırlayıcı kutu ise güneş kırıcı olarak kullanılabilen bölümlerin derinliklerini belirler.

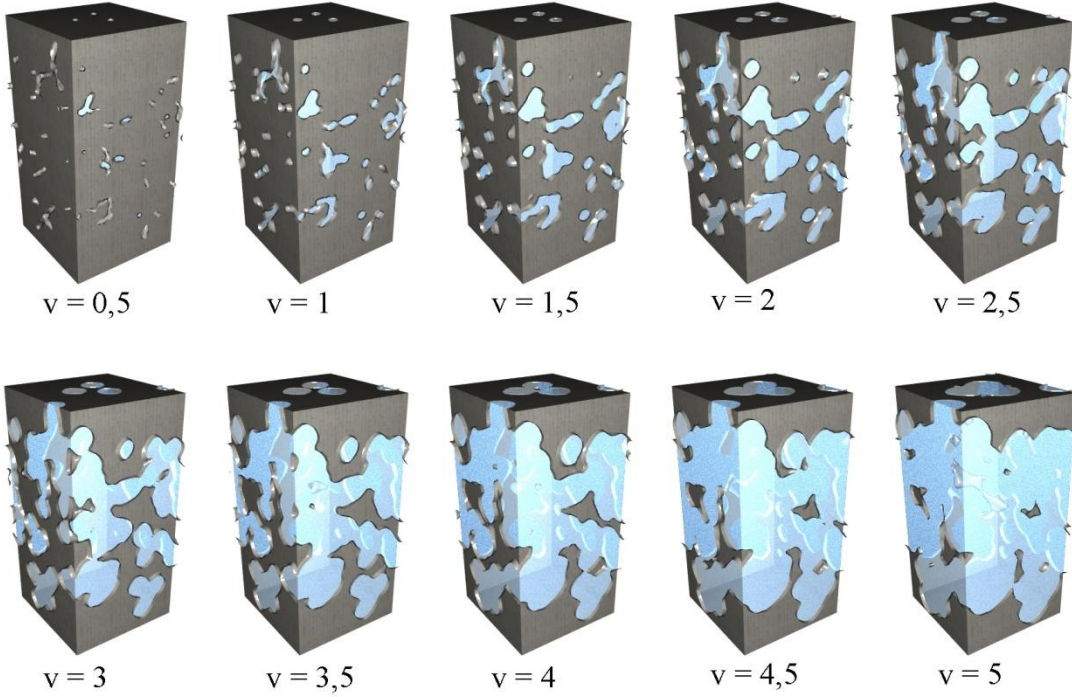
Son değişken ise, Öklidyen dönüşümleri sağlayan modüldür. Burada geometri kendi etrafında döndürülerek veya kopyalanıp yinalanarak cephe ile yaptığı keşişim sayısı ve boyutu değiştirilerek istenen özelliklere sahip cephe tasarımı elde edilebilir.

5.4.3 Türetilen parametrik varyasyonlar

Geliştirilen modeli etkileyen kural ve değişkenler irdelenmiştir. Bu kural ve değişkenler belirli kural grupları oluşturarak tasarımın istenilen yönde değiştirilmesini sağlayabilir (Şekil 5.11 ve 5.12). Öncelikle L-sistemin özinyeleme sayısı n 'ye bağlı varyasyonları oluşturulmuştur. Özinyeleme sayısı arttıkça buna bağlı olarak cephede oluşan açıklık sayıları da artmış, açıklıklar birleşerek daha büyük açıklıkları ortaya çıkarmışlardır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 : Özinyeleme sayısına bağlı değişim.



Şekil 5.12 : Metaball hacim değişkenine bağlı varyasyonlar.

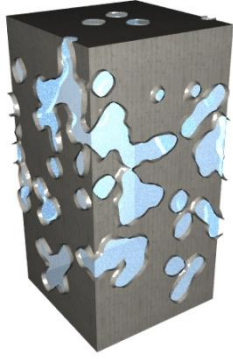
Metaball hacimlerini belirleyen bileşenin değeri değiştirilerek yukardaki sonuçlar elde edilmiştir. Hacim birimi olan v değişkenine bağlı değişimlerde özyineleme sayısı $n = 10$ olacak biçimde sabit tutulmuştur. Özyineleme sayısının artışıyla elde edilen varyasyonlardan farklı olarak bu değişim setinde açıklıklar birleşerek geometrik olarak sade yapıda olan daha büyük açıklıkları oluşturmaktadır (Şekil 5.12).

Güneş kırıcıların yaptıkları çıkma miktarları sınırlayıcı kutu değişkeniyle belirlenmiştir. Binanın içinde açıklıkları yaratan geometrinin uzantıları olan güneş kırıcılar, s değeri yükseldikçe çıkma uzunluğunu arttırıp, açıklığın önünde gittikçe daralarak, ışığı ayarlayan kamera diyaframı gibi işlev görürler (Şekil 5.13).

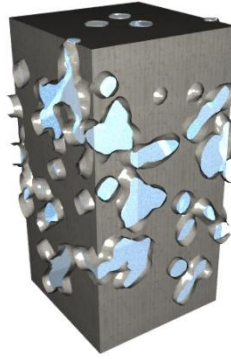
Oluşturulan son varyasyonlarda tasarımın, farklı değişkenlerle aynı anda oynanarak belirli bir ihtiyaca yanıt vermesi amaçlanmıştır. Bunlar arasında A örneğinde cephede küçük ve çok sayıda açıklık oluşturulmak istenmiştir. Bu durumda özyineleme sayısı n arttırılıp, metaball hacmini belirleyen v değişken değeri küçültülerek istenilen sonuç elde edilmiştir (Şekil 5.14).

B örneğinde ise bu açılan boşlukların binanın belirli bölgelerinde kümelenmeleri istenmiştir. Bunun için de Öklidyen dönüşümlerle oranlamadan faydalanılmıştır. C örneğinde ise birbirine yakın olan küçük açıklıklar birleştirilmek istenmiştir ve bu

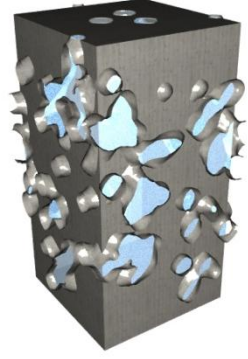
nedenle de metaball hacmini belirleyen v değışkeni arttırılarak açıklıkların birleşerek büyümeleri sağlanmıştır.



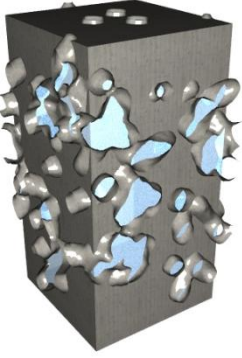
$s = 18$



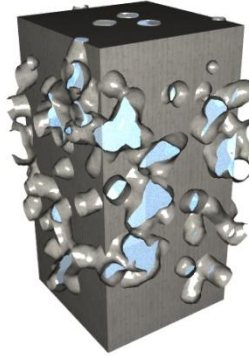
$s = 18,5$



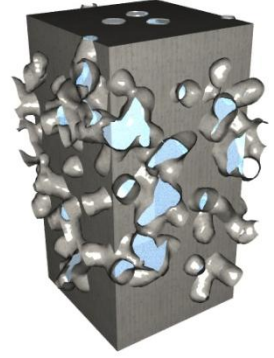
$s = 19$



$s = 19,5$



$s = 20$



$s = 20,5$

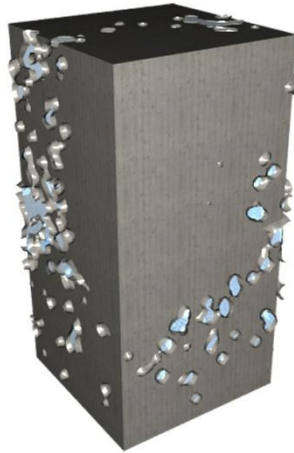
Şekil 5.13 : Sınırlayıcı kutunun büyüğüne bağılı değışim.

A



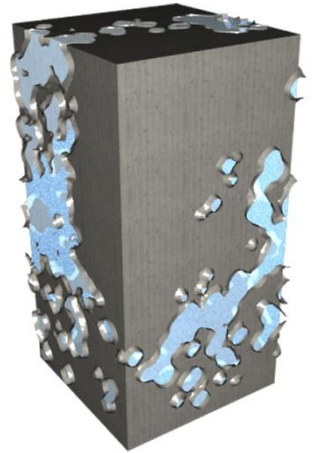
$n = 14$
 $v = 1,6$

B



$n = 14$
 $v = 1,6$

C



$n = 14$
 $v = 2,5$

Şekil 5.14 : Farklı değışkenlerin aynı anda uygulanmasıyla oluşturulan tasarımlar.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mimari tasarıma bir araç olarak dahil olan ve günümüzde de yaygın olarak kullanılan CAD uygulamaları, önceleri sadece mimari çizim üretme sürecini hızlandırma amacını taşıyan araçlar olarak kullanılmaktaydı. Bilgisayarların tasarım sürecine etken olarak dahil olmalarıyla birlikte üretken sistemler, mimari tasarımda mimarın tasarım sürecinde bir tür tasarım ortağı olarak rol oynamaya başladılar. Burada tasarımcının görev tanımı genişlemekte, tasarımı tasarlayan yazılımın kullanımı ve geliştirilmesi tasarımcıya ait bir sorumluluk haline gelmektedir. Bunun karşılığında üretken sistemler tasarımcıya kullanabileceği çok sayıda varyasyon sunarak tasarımcının doğru kararları almasında ve olası sorunlara çözüm üretmesinde avantaj sağlamaktadır.

Doğa üretken sistemlerle işleyiş açısından benzerlikler göstermektedir. Çevremizde gördüğümüz organizmalar ve doğal oluşumlar sayısız etmene bağlı olarak, milyonlarca yıllık deneme-yanılma aşamalarından geçerek ortamlarına uyum sağlayan etkenler haline gelmişlerdir. Buradaki nedenselci ve olasılıksal yaklaşım, üretken sistemlerle mimari tasarıma taşınabilmektedir. Mimarlığın doğaya öykünmesi, doğadaki basit biçimsel oluşumları biçimsel olarak kopyalamaya çalışarak başlamış, günümüzde ise doğal süreçleri taklit eden veya onlardan faydalanan tasarım modelleri haline gelmiştir. Bina cephe tasarımında da bu yaklaşım değişimi izlenebilmektedir. İdealize edilmiş kanonlarla başlayıp, işlevi öne çıkaran planın bir tür işlevsel izdüşümü haline gelmiş, sonra da bu yaklaşımdan ayrılarak teknolojinin gelişimi ve içinde bulunduğumuz neoliberal çağın etkisiyle özellikle ticari yapılarda yapıyı bir çekim merkezi haline getirme çabasında olan bir "ekran" haline gelmiştir. Bu yeni oluşan ekonomik ekosistemde çeşitlilik doğada olduğu gibi ödüllendirilir.

Lindenmayer sistemleri bitki gelişimini gözlemlemek amacıyla geliştirilmiş bir yeniden yazma sistemi olsa da, biçim türetme üzerinde sahip olduğu üretkenlik mimarlığın yanında daha bir çok disiplinin de dikkatini çekmiştir. L-sistemleri ve kaplumbağa grafiklerinin kullanımı ile hacimler oluşturulabilmekte, mekânlar

yaratılabilmektedir. Bu geometrilerin sahip olduğu kendine-benzeme özelliği sayesinde, özyineleme sayısı arttırılıp, kurallar ve değişkenlerin değerleri değiştirilerek üretilebilecek tasarım alternatiflerinin sayısı da artmaktadır. Böylece sanal bir doğal oluşum modeli ortaya konabilmektedir. Bu çeşitlilik ve uyumu bina kabuklarına uyarlamak ise farklı yöntemlerle mümkün olabilmektedir.

Geliştirilen modeller arasında izdüşüm yönteminde rastlantısallık ön plandadır. Son tasarım, ancak bir sürü varyasyon arasından seçilebilmektedir ve tasarım üzerinde ufak değişiklikler yapmak genelde mümkün değildir. Kaotik yapı nedeniyle kurallar üzerinde yapılan bir sembol değişikliği kimi zaman öngörülemeyen geometrilerin ortaya çıkmasına neden olmakta ve elde olan tasarımın kaybolmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu yöntem çok uzun bir deneme-yanılma süreci gerektirmektedir. İlham alma açısından bakıldığında L-sistemlerin bu değişkenlik kabiliyeti yararlı gibi görünürken, mevcut tasarım üzerinde ufak bir değişiklik istendiğinde bütün tasarım tamamen değişebilmektedir. Bu değişimleri yaratmada açı değişkeni δ çok önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle 30° , 45° , 60° , 90° gibi eş kenarlı temel platonik biçimlerde görülebilecek açı değerleri kullanıldığında, tasarımda hakim olan kaotik yapı, bir düzen oluşturmaktadır. Özyineleme sayısı da tasarımın kendine benzeme seviyesini kontrol ederek daha detaylı örüntüler elde etmeyi mümkün kılmaktadır.

Metaball'lara dayanan modelde ise kullanıcı tasarımın kaotik görünüşüne rağmen tasarım üzerinde daha çok kontrole sahiptir. Bina kabuğundaki açıklıkların boyutları ve cephede yoğunlaştıkları yerler gibi değişkenler doğrudan L-sistem üzerinde yapılan değişikliklerle kontrol edilebilmektedir. Türetilen kabuk örüntüleri karşılaştırıldığında metaball yöntemi geometrik üretkenlik açısından ilk sisteme göre daha az varyasyon sunmaktadır. Ortaya çıkan cephe tasarımı tek bir tasarımın varyasyonları gibi görünmektedir. Bunun nedeni L-sistemin kendi geometrisi yerine onun bir uzantısı olan geometrinin kabuğa yansıtılmasıdır. Buradaki tasarım L-sisteme dayalı olmuş metaball geometrisi ile kabuğu belirleyen sınırların çakışmalarından oluşmaktadır.

L-sistemleri çok sayıda sembol dizgilerinden oluşan karmaşık geometriler oluşturdukları için, iki farklı yaklaşım denenmiştir. İlkinde üretken sistem olarak L-sistemlerinin geometri üretimi sınırlandırılmazken elde edilen tasarım üzerinde sistem dahilinde (Öklidyen olmayan) değişiklikler yapmak mümkün değildir. Bu

nedenle üretilen geometri üzerinde değişiklik yapılmak istenirse bu değişim katı modelleme araçları ile yapılacağından dolayı zaman açısından kazançlı değildir.

İleride yapılacak çalışmalarda sisteme dahil edilecek eklentilerle L-sistemlerinden bağımsız olarak çalışarak ve tasarımın ilk aşamasından sonra devreye girerek açıklıkların büyüklüklerini kontrol edecek parametrik bir sistem düşünülebilir. Bu sistem aynı zamanda cephedeki boşluk-doluluk kurgusuna uygun panel türü seçimi yaparak (önceden detayları tanımlanmış bir havuzdan seçerek) tasarımda istenen özelliklere sahip bir cephe örüntüsü üretebilir. Mevcut geliştirilen kabuk sistemi L-sistemleri üzerinden işleyecek genetik algoritmaların da kullanımıyla strüktürel eniyileme sağlanacak biçimde düzenlenebilir.

Aynı eniyileme yaklaşımı güneş ışığından en fazla yararı sağlamak için de kullanılabilir. Metaball yönteminde oluşturulan pencere açıklıklarının devamı olan güneş kırıcı geometrilerin açıklık boyutları ve yönelimleri denetlenerek bu istek gerçekleştirilebilir. Böylece istenen mekânlar için en fazla güneş ışığı sağlanırken, diğer mekânlar için fazla olan güneş ışığı engellenebilir. Bir başka yaklaşımla L-sistemini oluşturan gramere güneşe yönelimi sağlayacak üretim kurallarının eklenmesiyle, binanın merkezinde bulunan L-sistem geometrisinin güneşe doğru yönelimi sağlanarak güneş ışığından en fazla yararı sağlamak mümkün olabilir.

Tasarım ile tasarımcı talepleri arasında ilerideki çalışmalarda kurulabilecek bu bağlantılar sayesinde tasarım ile kurulan biyomimikri seviyesi ilerletilebilir. Böylece doğayı bir akıl hocası olarak gören yaklaşımla tasarımcı, istediği sonuca uygun olan kuralların seçilimiyle istediği yönelimde bir mimari tasarım elde edebilir.

KAYNAKLAR

- Arkininstall, M. ve Carfrae, T.** (2009). Structural Design and Optimisation of the Beijing National Aquatics Center. *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, http://www.engineersaustralia.org.au/shadomx/apps/fms/fmsdownload.cfm?file_uuid=5E6A0D1A-AD5C-629D-8A46-457845CBC345&siteName=ieaust
- Balmond, C.** (2006). Serpentine Gallery Pavillion 2002. in *N. Tsukui (ed.) A+U Cecil Balmond, A+U Publishing, Tokyo.*
- Batty M. ve Longley, P.** (1994). Fractal Cities: A Geometry of Form and Function. *Academic Press, London.* *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, <http://www.fractalcities.org/>
- Beesley, P. ve Bonnemaison, S.** (2008). On Growth and Form: Organic Architecture and Beyond. *Tuns Press, Halifax.*
- Benyus, J. M.** (2002). Biomimicry: Innovation Inspired by Nature, *Perennial, New York.*
- Biomimicry Guild,** (2007). Innovation Inspired by Nature Work Book. *Biomimicry Guild, April.*
- Blinn, J. F.** (1982). A Generalization of Algebraic Surface Drawing. *ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 1 Issue 3, July.* *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=357306.357310>
- Borgart, A. and Stach, E.** (2008). Computational Structural Form Finding and Optimization of Pneumatic Structures. *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, http://ecommons.cornell.edu/bitstream/1813/11543/1/New_Optimization_Techniques.pdf
- Bovill, C.** (1996). Fractal Geometry in Architecture and Design. *Birkhauser Verlag, Boston.*
- Burmanje, W. J. F. ve Mik, E.** (2005). Interview Toyo Ito. *ArchIdea.* *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, http://www.archidea.com/media/uploads/archidea_31.pdf
- Burrows, S. ve Simpson, M.** (2009). The Arup Journal: The Beijing National Stadium Special Issue. *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013*, http://www.arup.com/Home/Publications/Periodicals/The_Arup_Journal.aspx

- Burphy, J. ve Burphy, M.** (2012). The New Mathematics of Architecture. *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://digiitalarchfab.com/portal/wp-content/uploads/2012/01/Federation-Square.pdf>*
- Buxton, P.** (2006). Tokyo's Jewel Box. *BD Plus Envelope. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.bdonline.co.uk/tokyo%E2%80%99s-jewel-box/3070771.article>*
- Çağdaş, G., Gözübüyük, G. ve Ediz, Ö.** (2006). Mimari Tasarımda Fraktal Kurguya Dayalı Form Üretimi. *Journal of İstanbul Kültür University, 2006/2 pp.1-12. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://www.iku.edu.tr/EN/iku_gunce/GunceC3S2veS3FenMuh/Gunce/GunceC4S2Temmuz06FenMuh/1.pdf*
- Durmisevic, S. ve Çiftçioğlu O.** (1988). Fractals in Architectural Design. *Mathematics and Design. Javier Barrallo the university of the Basque Country, Alındığı tarih: 05 Aralık 2013,*
- Ediz, Ö. ve Çağdaş, G.** (2006). Kaos, Fraktaller ve Mimari Tasarım. *Journal of İstanbul Kültür University, 2006/3 pp.155-160. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://www.iku.edu.tr/EN/iku_gunce/GunceC3S2veS3FenMuh/Gunce/GunceC4S3Ekim06FenMuh/155.pdf*
- Eglash, R.** (1999). African Fractals: Modern Computing and Indigenous Design. *Rutgers University Press, New Jersey.*
- Eglash, R. ve Odumosu, T. B.** (2005). Fractals, Complexity, and Connectivity in Africa. *Dept. of STS, Sage Labs, Rensselaer Polytechnic Institute, Polimetrica Publisher, Milano.. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://homepages.rpi.edu/~eglash/eglash.dir/afractal/Eglash_Odumosu.pdf*
- Fountain, H.** (2008). A Problem of Bubbles Frames an Olympic Design. *New York Times, 5 Ağustos, 2008. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.nytimes.com/2008/08/05/sports/olympics/05swim.html>*
- Fraser, C., Brizzi, D. ve Hira, A.** (2003). Vision-based, Multi-epoch Deformation Monitoring of the Atrium of Federation Square. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Melbourne. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <https://www.fig.net/commission6/santorini/I-Monitoring%20Static%20and%20Dyn/18.pdf>*
- Hensel, M. ve Menges, A.** (2007). Designing Morpho-ecologies: Versatility and Vicissitude of Heterogeneous Space. *Architectural Design, vol. 78.*
- Hansmeyer, M.** (2003). L-systems in Architecture. *Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.michael-hansmeyer.com/flash/l-systems.html>*
- Hensel, M. ve Menges, A.** (2007). Designing Morpho-ecologies: Versatility and Vicissitude of Heterogeneous Space. *Architectural Design, vol. 78.*
- Griswold, R. E.** (2004). Designing with L-Systems. *Department of Computer Science, The University of Arizona. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://www.cs.arizona.edu/patterns/weaving/webdocs/gre_ls01.pdf*
- Güdükbay, U., Gülbeden, A. ve Kaya, F.** (2001). L-sistemler Kullanarak Bilgisayarda Bitki Sentezleme. *Popüler Bilim, 94, 42-46.*

- Jodidio, P.** (2008). *Architecture Now! 3. Taschen GMBH, Cologne.*
- Laurenza, D., Taddei, M., Zanon, E.** (2007). *Leonardo'nun Makineleri. Pegasus Yayınları, İstanbul.*
- Lindenmayer, A.** (1975). *Developmental Systems and Languages in their Biological Context. Developmental Systems and Languages, G. T. Herman ve G. Rozenberg, (editörler), American Elsevier, North-Holland.*
- Lu, P. J. ve Steinhardt J. P.** (2008). *Decagonal and Quasi-crystalline Tilings in Medieval Islamic Architecture. Science, 23 Şubat, 2007. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://peterlu.org/sites/peterlu.org/files/Science_315_1106_2007.pdf*
- Lu, X., Croome, D. C. ve Viljanen, M.** (2011). *Fractal Geometry and Architecture Design: Case Study Review. Proceedings, 4th Chaotic Modeling and Simulation International Conference. 05 Aralık 2013, http://www.cmsim.org/images/Proceedings_CHAOS_2011_K-L.pdf*
- Mandelbrot, B.** (1982). *The Fractals and Geometry of Nature. New York, W. H. Freeman and Company.*
- Meredith, M.** (2008). *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture. ACTAR, Barcelona.*
- McCormack, J.** (1996). *Evolutionary L-systems. Design by Evolution: Advances in Evolutionary Design, Springer, Berlin.*
- McCorquodale, D.** (2008). *Solutions for a Modern City: Arup in Beijing. Black Dog Publishing, London.*
- OCEAN** (2006). *New Czech National Library in Prague. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.ocean-designresearch.net>*
- O'Connor, J. J. ve Robertson, E. F.** (2000). *Niels Fabian Helge von Koch. MacTutor History of Mathematics. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Koch.html>*
- Panchuk, N.** (2006). *An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design. Master of Architecture Thesis, University of Waterloo.*
- Pawlyn, M.** (2011). *Biomimicry in Architecture. RIBA Publishing, London.*
- Pollack, N.** (2005). *Toyo Ito Fuses Structure and Wrapper in a Network of Concrete Trees at the New Tod's Omotesanso Building in Tokyo. Architectural Record, vol.193.*
- Prusinkiewicz, P. ve Lindenmayer, A.** (1996). *The Algorithmic Beauty of Plants. Springer-Verlag, New York.*
- PTW Architects,** (2013). *Water Cube – National Swimming Centre. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.ptw.com.au/>*
- Salomaa, A.,** (1973). *Formal Languages. Academic Press, New York.*
- Selçuk, S. A. ve Sorguç, A.G.** (2007). *Mimarlık Tasarımı Paradigmasında Biomimesis'in Etkisi. Mimarlık Fakültesi, ODTÜ. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013,*

http://www.mmfdergi.gazi.edu.tr/2007_2/DERGI%202007%20V22%20NO2%20_sayfa%20451-459_.pdf

Singh, V. ve Gu, N. (2011). Towards an Integrated Generative Design Framework. *Design Studies*, doi:10.1016/j.destud.2011.06.001.

Takahashi, M. (2006). A Window on Luxury. *Interior Design*, April 2006, Sandow Media LLC, New York.

Taylor, R. P. (2011), The Art and Science of Foam Bubbles. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 129-136. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, http://materialscience.uoregon.edu/taylor/human_response/FractalFoams.pdf

Thompson, D. W. (1942), On Growth and Form. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.

Zari, M. P. (2007). Biomimetic approaches to architectural design for increased sustainability, Transforming Our Built Environment: New Zealand Sustainable Building Conference, Auckland, 14-16 Kasım, 2007. Alındığı tarih: 05 Aralık 2013, <http://www.cmnzl.co.nz/assets/sm/2256/61/033-PEDERSENZARI.pdf>

Url-1 <<http://el.media.mit.edu/logo-foundation/logo/turtle.html>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-2 <<http://el.media.mit.edu/logo-foundation/logo/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-3 <<http://archrecord.construction.com/projects/portfolio/archives/0506tods.asp>> , alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-4 <<http://www.wired.com/wiredscience/2010/09/fractal-patterns-in-nature/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-5 <<http://fractalfoundation.org/OFC/FractalInstitute/FractalInstitute/art/KochProg.png>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-6 <<http://www.michael-hansmeyer.com/flash/l-systems.html>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-7 <<http://www.toyo-ito.co.jp/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-8 <<http://www.archdaily.mx/206835/serpentine-gallery-pavilion-2002-toyo-ito-cecil-balmond-arup/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-9 <<http://www.flickr.com/photos/88315679@N00/2243509435/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-10 <<http://www.chrisbosse.de/watercube/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-11 <<http://www.structuremag.org/article.aspx?articleID=754>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-12 <http://en.wikiarquitectura.com/index.php/Mikimoto_Ginza_2>, alındığı tarih: 13.12.2013.

Url-13 <[http://www.kaisersrot.ch/kaisersrot02/2003_National_Beijing_Olympic_Stadium_\(CN\).html](http://www.kaisersrot.ch/kaisersrot02/2003_National_Beijing_Olympic_Stadium_(CN).html)>, alındığı tarih: 13.12.2013.

- Url-14** <http://www.bustler.net/index.php/article/herzog_de_meuron_and_ai_weiwei_to_design_serpentine_gallery_pavilion_2012>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-15** <<http://www.batessmart.com.au/#/projects/community--culture/federation-square-melbourne/proj/photo2>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-16** <<http://www.fedsquare.com/information/about-us/history-design/>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-17** <<http://www.tecnoloxia.org/principal/?tag=velcro>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-18** <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandel_zoom_00_mandelbrot_set.jpg>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-19** <<http://www.ccd.rpi.edu/eglash/csdt/african/fractal/baila.html>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-20** <<http://www.flickr.com/photos/ganjo/1428161859>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-21** <http://architecture.rmit.edu.au/About/Storey_Hall.php>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-22** <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Metaballs.png>>, alındığı tarih: 13.12.2013.
- Url-23** <<http://www.wright-house.com/frank-lloyd-wright/fallingwater-pictures/F1SW-fallingwater-in-fall.html>>, alındığı tarih: 13.12.2013.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Behiç Can Aldemir

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 9 Mart 1987

Adres: Kozyatağı Mahallesi Forsa Sokak No:8/15 Kadıköy İstanbul

E-Posta: bcaldemir@gmail.com

Lisans: Bahçeşehir Üniversitesi