



**ÜRETKEN SİSTEMLER İLE VORONOİ DESENLİ MİMARİ CEPHE
TASARIMLARI VE YAPISAL DAVRANIŞLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

Helin POLAT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Helin POLAT

09/05/2023

ÜRETKEN SİSTEMLER İLE VORONOİ DESENİ MİMARİ CEPHE TASARIMLARI VE YAPISAL DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Helin POLAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2023

ÖZET

Matematiksel bir hesaplama tekniği olan Voronoi, doğada pek çok yerde görüldüğü biçimiyle özellikle mimari cephelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Mimari tasarımda bilgisayarlı hesaplama yöntemlerinin kullanılması, Voronoi gibi karmaşık biçimlerin otomatik ve hızlı bir şekilde üretilmesine ve geniş bir tasarım alanının keşfedilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle tasarım sürecine algoritmik yöntem dahil edildiğinde maliyet azaltma, yapısal kararlılık gibi kriterlerin sınırlandırılması ile sonuç ürünler istenilen performansı verecek yönde geliştirilebilmektedir. Tez çalışmasında cephe tasarımlarında Voronoi'nin kullanıldığı örnek binalar incelenmiş bu yöndeki eğilim irdelenmiştir. Mimari tasarımda yaygın kullanılan üretken sistemler tespit edilip, bunların nasıl çalıştıkları incelenmiştir. Belirlenen dört üretken sistem (1-sistemler, hücresel özdevinim, şekil gramerleri ve sürü zekâsı) ile Voronoi desen üretimini sağlayan algoritmalar oluşturularak Voronoi desenler üretilmiştir. Çok farklı çalışma prensiplerine sahip olan dört sistem, karşılaştırılabilir bir çerçeve oluşturmak ve sistemlerin birbirleri ile farklılıklarını tartışabilmek adına değişken parametreler sınırlandırılmış, sadece kuralların değişken olması sağlanmıştır. Dört üretken sistemin nesil sayısı arttıkça ve kurallar değiştikçe üretilen Voronoi desenlerine ait hücrelerin homojen dağılım düzeyi, hücre sayısı ve toplam çubuk uzunluğu gibi geometrik özelliklerindeki değişimler değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapısal elemanlara dönüştürülen bu desenler farklı yükler altında, sabit malzeme ve optimum malzeme özelliklerinin tanımlandığı üç aşamalı analizden geçirilerek yapısal performansları değerlendirilmiştir. Desen tasarım süreci Grasshopper yazılımı içerisinde gerçekleştirilmiş olup, yapısal tasarım süreci bir Grasshopper eklentisi olan Karamba ortamında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda en kararlı ve en verimli deseni üreten sistem tespit edilmiştir. Bu tez ile gelecek çalışmalar için, Voronoi cepheler üretmek amacıyla farklı üretken sistemler denenerek ve optimizasyon algoritmaları da dahil edilerek bu yöndeki potansiyelinin daha fazla keşfedilebileceğine yönelik farkındalık oluşturmak istenmiştir.

Bilim Kodu : 80111

Anahtar Kelimeler : Voronoi diyagramları, üretken sistemler, algoritmik tasarım, cephe desenleri, sonlu elemanlar analizi

Sayfa Adedi : 107

Danışman : Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY

DESIGNING VORONOI PATTERNED ARCHITECTURAL FACADES WITH
GENERATIVE SYSTEMS AND COMPARISON OF THEIR STRUCTURAL
BEHAVIORS

(Master Thesis)

Helin POLAT

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2023

ABSTRACT

Voronoi, a mathematical computational technique, is commonly observed in nature and frequently used in architectural facades. The use of computational methods in architectural design allows for the automatic and rapid production of complex shapes such as Voronoi, enabling the exploration of a wide design space. When algorithmic methods are incorporated into the design process, the cost reduction, structural stability, and other criteria can be limited, resulting in improved performance of the final product. In the thesis, examples of buildings with Voronoi facades were examined, and the trend in this direction was discovered. The generative systems commonly used in architectural design were identified, and their working principles were examined. Algorithms were created to generate Voronoi patterns using four identified generative systems: L-systems, cellular automata, shape grammars, and swarm intelligence. Four different generative systems with very different working principles were compared within a comparable framework, with variable parameters restricted only to the rules, in order to discuss their differences. As the generation number and rules changed, changes in the geometric properties of the generated Voronoi patterns, such as the level of homogenous distribution, the number of cells, and the total rod length, were evaluated. These patterns were transformed into structural elements and evaluated for their structural performance under different loads, with a three-stage analysis defining fixed and optimal material properties. The design process for these patterns was carried out using Grasshopper software, while the structural design process was carried out in the Karamba environment, a Grasshopper plugin. The most stable and efficient system that produces the best pattern was identified as a result of the analyses. With this thesis, it is aimed to create awareness that different generative systems can be tried for producing Voronoi facades in the future, and optimization algorithms can be included to explore their potential further.

Science Code : 80111

Key Words : Voronoi diagrams, generative systems, algorithmic design, facade patterns, finite element analysis

Page Number : 107

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY

TEŞEKKÜR

Bu araştırma sürecindeki en büyük yardımcım ve yol göstericim olan sevgili tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY'a her zaman sabırlı tavrı ve anlayışlıyla beni desteklediği ve daima cesaretlendirdiği için çok teşekkür ederim.

Tezin alan çalışması kısmında kendisinin bilgi birikimlerinden yararlanarak tezimdaki sorunları çözmeme yardımcı olan Sn. İnşaat Mühendisi Ömür ÖZGER'e teşekkür ederim.

Ayrıca, tezin hazırlık sürecinde yanımda olan ve manevi desteğiyle beni motive eden Sn. Doç. Dr. Emine Ekinci DAĞTEKİN'e çok teşekkür ederim.

Beni her zaman cesaretlendiren ve sonsuz sevgileriyle destekleyen canım annem Mine POLAT, canım babam Hakim POLAT, canım abim Siyabend POLAT ve canım kardeşim Sidar POLAT'a içten teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. CEPHE TASARIMINDA VORONOI DESENİ.....	9
2.1. Voronoi Deseni	11
2.2. Mevcut Yapılar Aracılığı ile Voronoi Cephe İncelemesi.....	14
2.3. Voronoi Cephe Yapılarına Yönelik Literatür Taraması.....	17
3. ÜRETKEN SİSTEMLER	21
3.1. Algoritmik Tasarım.....	22
3.2. Üretken Sistemler (ÜS)' e Yönelik Literatür Taraması.....	24
3.2.1. L-sistemler.....	27
3.2.2. Hücresel özdevinim.....	29
3.2.3. Şekil gramerleri.....	33
3.2.4. Sürü zekası algoritması.....	37
3.3. Üretken Sistemlerin Karşılaştırılması.....	40
4. ÇALIŞMA YÖNTEMİ.....	43

5. ALAN ÇALIŞMASI	55
5.1. Üretken Sistemler ile Voronoi Desen Tasarım Süreci.....	55
5.1.1. L-sistemler ile desen üretimi.....	56
5.1.2. Hücresel özdevinim ile desen üretimi.....	60
5.1.3. Şekil gramerleri ile desen üretimi.....	64
5.1.4. Sürü zekası algoritması ile desen üretimi.....	68
5.1.5. Voronoi desen üretme bağlamında üretken sistemlerin değerlendirilmesi.....	72
5.2. Voronoi Cephelerin Yapısal Modelleme Süreci.....	74
5.2.1. Birinci aşama: malzeme kesitleri sabit tutulan modellerin karşılaştırılması.....	74
5.2.2. İkinci aşama: seçilen modellerin optimum malzeme özellikleri ile karşılaştırılması.....	79
5.2.3. Üçüncü aşama: her üs için en iyi modelin farklı yüklerin etkisi altında karşılaştırılması.....	83
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	91
EKLER.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Voronoi'nin cephede kullanım örnekleri	16
Çizelge 2.2. Farklı yöntemlerle üretilen Voronoi formu cephelerin yapısal davranışının test edildiği çalışmalar.....	18
Çizelge 3.1. L-Sistem dizilerinin biçimlere dönüşümünü sağlayan kaplumbağa grafiklerine ait komut ve açıklamaları.....	28
Çizelge 3.2. En temel dallanma yapısına ait bilgiler.....	28
Çizelge 3.3. Üretken sistemler karşılaştırma tablosu.....	40
Çizelge 4.1. Çelik malzemenin en kesit özellikleri	52
Çizelge 4.2. S235 alaşımsız yapısal çelik malzemenin özellikleri.....	52
Çizelge 4.3. Cam malzemenin özellikleri.....	54
Çizelge 5.1. L-sistem kurallarına ait aksiyom ve talimatlar.....	57
Çizelge 5.2. Nesillere ait L-sistem dallanma yapısı ve Voronoi görüntüsü.....	58
Çizelge 5.3. L-sistemler ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri.....	59
Çizelge 5.4. Hücresel özdevinime ait kurallar ve özellikleri.....	60
Çizelge 5.5. Kural ve nesillere göre hücresel özdevinim hücre yapısı ve Voronoi görüntüsü.....	62
Çizelge 5.6. Hücresel özdevinim ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri.....	63
Çizelge 5.7. Şekil gramerleri kurallarına ait talimatlar ve özyineleme ile üretilen şekiller.....	64
Çizelge 5.8. Kural ve nesillere göre şekil gramer yapısı ve Voronoi görüntüsü.....	66
Çizelge 5.9. Şekil gramerleri ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri.....	67
Çizelge 5.10. Kural ve nesillere göre sürü zekâsı etmen konumları ve Voronoi görüntüsü.....	70
Çizelge 5.11. Sürü zekâsı ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri.....	71

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.12. Voronoi ile desen üretme bağlamında üretken sistemlerin ÜS özelliği, Voronoi desen özelliği ve tasarımcı için kullanım özelliği açılarından değerlendirilmesi.....	72
Çizelge 5.13. L-sistem ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri.....	75
Çizelge 5.14. Hücresel özdevinim ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri.....	76
Çizelge 5.15. Şekil gramerleri ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri.....	77
Çizelge 5.16. Sürü zekâsı ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri.....	78
Çizelge 5.17. L- sistemler ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ve ölü yük altındaki yapısal performansları.....	80
Çizelge 5.18. Hücresel özdevinim ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ile ölü yük altındaki yapısal performansları.....	81
Çizelge 5.19. Şekil gramerleri ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ile ölü yük altındaki yapısal performansları.....	82
Çizelge 5.20. Sürü zekâsı ile üretilen en kararlı modellerin optimum özellikleri ile ölü yük altındaki yapısal performansları.....	83
Çizelge 5.21. Her sistemin optimum modelinin farklı yükler altındaki yapısal performansları.....	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tez akış şeması.....	7
Şekil 2.1. Solda iki boyutta, sağda üç boyutta Voronoi hücreleri	12
Şekil 2.2. Noktalardan Voronoi diyagramının oluşturulması.....	13
Şekil 2.3. Voronoi diyagramının düzenli nokta dizilimleri ile oluşturulmuş geometrik formlar.....	13
Şekil 2.4. Zaha Hadid tarafından, Voronoi ile düzenlenen peyzaj tasarımı.....	14
Şekil 3.1. Oxman (2006) ve Kotnik'ten (2010) uyarlanan mimaride dijital araçların kullanımı ve modellenmesine ait kategorileri gösteren şema.....	22
Şekil 3.2. Görsel programlama dili olan Grasshopper ile oluşturulan örnek veri akış diyagramı (sağda) ve Rhino ara yüzündeki görsel ifadesi (solda).....	24
Şekil 3.3. Üretken Sistem iş akışı.....	25
Şekil 3.4. Henriques ve arkadaşlarının L-sistem ile yaptığı çalışma.....	29
Şekil 3.5. Hansmeyer'in L-sistem kullanarak ürettiği modüler mimari yapının farklı nesillerdeki görünüşleri.....	29
Şekil 3.6. Conway'in Yaşam Oyunu kuralları.....	31
Şekil 3.7. Sekiz bitlik hücre kombinasyonlarından oluşan 256 olası hücresel özdevinim kuralı dizisi.....	32
Şekil 3.8. Örnek kural dizileri (soldan sağa 250, 90, 30 ve 110 kuralları).....	32
Şekil 3.9. Hücresel özdevinim kurallarının tekrar etmesi ile oluşan grafikler.....	32
Şekil 3.10. HÖ ile yapılan mimari form çalışama örnekleri; (a) Krawczyk'in, çalışmasında ürettiği formlar, (b) Coates'in 3 boyutlu mimari form bulma çalışması, (c) Zawidzki cephe için form bulmada iki boyutlu tasarım çalışması.....	33
Şekil 3.11. (a) analiz edilerek (b) ve (c) olmak üzere iki farklı şekilde ayrıştırılmıştır.....	34
Şekil 3.12. Şekil gramerini kullanarak bir şeklin üretilmesi	35

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Şekil gramerleri ile yapılan çalışmalar: (a) Knight'ın Yunan haçı tasarımları,(b) Palladian villa planları, (c) Wright'ın Prairie tarzı evleri.....	36
Şekil 3.14. Sürü zekâsı nın üç temel ilkesi: ayırma, hizalama ve uyum.....	38
Şekil 3.15. Sürü zekâsı ile üretilen mimari formlar (a) Snooks'a ait Çin ulusal sanat müzesi tasarımı, (b) Snooks'a ait Fibrous Tower tasarım projesi, (c) Tsiliakos'a ait yüksek yapı tasarımı.....	39
Şekil 3.16. Sürü zekâsı yöntemi ile Voronoi cephe üretimi.....	40
Şekil 4.1. Alan çalışmasına ait akış şeması.....	44
Şekil 4.2. Algoritmanın girdi ve çıktılarını ifade eden şema.....	45
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan programlar ve hiyerarşik yapısını ifade eden şema.....	46
Şekil 4.4. Noktalardan Voronoi oluşturma.....	47
Şekil 4.5. (a)Referans cephe olan Fry binası; (b) Cephe boyutları.....	48
Şekil 4.6. Cephe sınırları içerisinde başlangıç noktalarının konumları.....	48
Şekil 4.7. Cephe üzerinde mesnetlerin konumları ve Grasshopper yazılımında mesnetleri tanımlayan bileşen.....	50
Şekil 4.8. Hücrelerin kesişim noktalarına uygulanan rüzgâr yükü yönleri.....	51
Şekil 4.9. Stahlbau o kesitli çelik malzeme listesi ve çalışmada kullanılan çelik malzeme en kesitlerinin aralığı.....	53
Şekil 5.1. Sürü zekâsına ait referans kural ve etmen konumları.....	69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Son yıllarda uygulanmış cephe süsleme örnekleri (a) Expo 2005 İspanya pavyonu; (b) Şanghay Expo 2010 Polonya Pavyonu; (c) Dubai’de 0-14 binası; (d) Londra’da Ravensbourne Tasarım ve İletişim Koleji.....	10
Resim 2.2. Doğada görülen Voronoi desenleri; (a) balpeteği, (b) zürafa derisi, (c) sabun köpüğü, (d) yaprak dokusu.....	12

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

cm	Santimetre
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
L	Uzunluk
m	Kütle
m	Metre
m²	Metrekare
m³	Metreküp
mm	Milimetre
mm²	Milimetrekare
MPa	Megapascal
N	Newton
%	Yüzde işareti

Kısaltmalar

Açıklamalar

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
HÖ	Hücresel Özdevinim
LS	Lindenmayer Sistemler
SZ	Sürü Zekâsı
ŞG	Şekil Gramerleri
ÜS	Üretken Sistem

1. GİRİŞ

Binanın dış yüzeyinin mimarideki yeri her zaman önemli olmuştur. Tarihte her dönem tartışma konusu olan cephe süsleme (ornament) günümüze dek büyük değişimler yaşamıştır. Günümüzde tasarım sürecinin dijitalleşmesi ile cephe sistemleri ve teknolojilerinin denenmesi ve keşfi giderek artmakta, bina yüzeyinin rolünün daha kapsamlı ve tasarım süreçlerinin daha karmaşık hale geldiği görülmektedir. Hesaplama yöntemlerinin kullanılması ile doğadaki süreçlerin ve biçimlenmelerin altında yatan fizik yasalarına yönelik ilgi artmaktadır. Bu bağlamda doğal süreçler mimaride, sürdürülebilirlik problemlerine çözüm bulmak ve yeni formlar keşfetmek gibi amaçlarla uygulama alanları bulmaktadır.

Bu çalışma kapsamında ele alınan dijital tasarımların sürdürülebilirliği, bir taraftan insan yapımı dünyanın biçimsel ve sistemsel olarak doğa ile yakınsanmasına, bir taraftan bu yakınsama ile ortaya çıkan biyolojik formların mimari performansını test etmeye dayanmaktadır. Bu doğrultuda doğa benzeri biçimler ve bu biçimlerin oluşum süreçleri öne çıkmaktadır.

Doğadaki süreçler doğanın temel yasaları tarafından tanımlanmaktadır. İster insan emeği ile üretilsin ister doğada kendiliğinden meydana gelsin, tüm süreçleri hesaplama olarak görmek mümkündür (Wolfram, 2002). Bu fikir doğada görülen son derece karmaşık sistemlerin altında yatan kuralı çözümler bilgisayarlar aracılığıyla bu karmaşıklığı oluşturabilmenin mümkün olabileceğini vurgulamaktadır. Dolayısıyla doğadaki süreçlerin tasarımda kullanımı, sadece doğadaki biçimin fiziksel ve geometrik özellikleri hakkındaki bilgileri almak yerine kod zincirleri ve matematiksel formüller gibi bazı soyut ilkelere dayanmaktadır.

Tasarımcının karmaşık ve özelleştirilmiş tasarımlar oluşturma eğilimi, kolay erişilebilir komut dosyası ortamlarının (hem görsel hem de metinsel) ortaya çıkmasıyla birlikte son yıllarda artmıştır (Dimcic, 2011). Bu sebeple özellikle dallanma yapıları, Voronoi desenleri, Fraktallar gibi biyolojik biçimsel organizasyonların davranışsal özelliklerinin mimari potansiyelini anlamak üzere yapılan çalışmalar giderek önem kazanmaktadır (Oxman and Oxman, 2010). Biyolojik evrim modelleri gibi doğanın diğer üretken modelleri de çağdaş

mimarlıkta dijital tasarım olarak önemli bir rol oynamaktadır (Oxman, 2006). Ancak mimarların, hangi üretken tekniğin neden kullanılacağı veya bunları kullanarak problemlerle nasıl başa çıkılacağına dair net bir referans veya teori olmadığından; mimarlar tasarım ve süreçleri için üretim sistemleri üzerinde deneylere yönelmektedir (El-Khaldi, 2007).

Üretken sistemlerle birlikte performatif süreçler de önem kazanmaktadır. Performans için gerekli parametre ve kısıtlamaların belirlenmesi, malzeme bilgisinin sisteme tanıtılması gibi işlemleri yapmayı gerektirmektedir. Tasarımcı bu yönde mekanizmalarla etkileşime girme, onları kontrol etme ve yönetme gibi yeni görevler üstlenmektedir. Bu tür değerlendirmelere yönelik analitik süreçler genellikle maliyet tahmini, yapısal davranışlar ve çevresel performans vb. ile ilişkili olmaktadır (Oxman, 2006).

Bununla birlikte geometrinin yapısal elemana dönüştürülmesi ve malzeme özelliklerinin tasarıma dahil edilmesi, ardından çevresel etkenlere bağlı olarak yapısal davranışının test edilebilmesi algoritmik yöntemde daha mümkün olmaktadır. Tasarımcı, üretken sistem ile oluşturduğu algoritmada başlangıç noktasından ayrıntılara kadar tasarım ürününün öğelerine her zaman erişebilmektedir. Bunun sebebi tasarım ürününün bir algoritmanın sonucu olmasıdır ve algoritmanın girdilerinin değiştirilebilir olması, buna göre sonucu da güncellemektedir. Bu sayede dijital olarak bir model üretmek ve çok temel geometrik parametreleri ayarlayarak yüzlerce proje varyasyonu oluşturmak mümkün olmaktadır (Bessa, 2009).

Bu bağlamda bu tez çalışması, algoritmik yöntem kullanarak biyolojik morfolojiye sahip bir desen olan Voronoi'nin mimari cephe yüzeyi oluşturmak için kullanımını irdelemektedir. Bu desenlerin, mimaride en sık kullanılan üretken sistemler ile birlikte cephe tasarımları için geliştirilmesi ve yapısal uygunluğunun araştırılmasını içermektedir.

Çalışmanın hedefi

Dijital teknolojinin sağladığı tasarımsal ve üretimsel dönüşümler, araştırmacıları mimarlık alanındaki etkilerini incelemeye teşvik etmektedir. Bilgisayar destekli tasarım yöntemleri, erken tasarım evresinde son ürünün bir temsili ve performansını test etme imkânı sunmaktadır. Bu nedenle, dijital araçlar mimari tasarım sürecine giderek daha fazla dahil olmakta ve daha aktif bir rol üstlenmektedir. Bunun sonucunda, tasarımcıların yeni araçları

nasıl kullanabilecekleri ve bu yöntemlerin fikir oluşturmada nasıl yardımcı olabileceği gibi konuların önem kazanmasına neden olmaktadır.

Özellikle doğadaki morfolojik - fiziksel yapı - sistemlerin mimaride form bulmak üzerine çözümlenmesi ve formüle edilmesi, parametrik tabanlı programların kullanımı ile önem kazanmıştır. Bu yöntem sayesinde, tasarımcılar doğal süreçlerin temsillerini bilgisayar ortamında üreterek daha yaratıcı, özgün ve estetik mimari üretmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda, doğadaki biçimlenme olarak ifade edilen "biyomorfik" özellikte karmaşık süslemeler cephede giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca, doğada yaygın olarak karşımıza çıkan Voronoi desenlerinin de mimari cephede kullanımı artmaktadır. Bu desenlerin kendi kendine organize olma özelliği sayesinde doğadaki düzensiz etkileri yaratabilmeleri ve bunu en az malzeme ile sağlamaları nedeniyle, mimarlar yeni ifade biçimleri ararken Voronoi desenlerini tasarımlarında kullanmaktadır.

İncelenen cephe örneklerinde Voronoi'nin tıpkı doğada görüldüğü gibi düzensiz bir şekil olarak kullanıldığı görülmüştür. Yapılan literatür araştırmasında ise cephe için Voronoi deseni tasarlama ve yapısal olarak test etmeye yönelik çalışmalar arasında formların belirlenen bir üretken algoritma ile üretildiği örneklerin olduğu (Torghabehi ve von Buelow, 2014), (Gawell ve Nowak, 2015), (Mele, Fraldi, Montuori ve Perrella, 2016), (Angelucci ve Mollaioli, 2018), (Agirbas, 2019); ancak üretken sistemlerin birlikte ele alınarak benzer bir tasarım için uygulandığı çalışmaların olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan araştırma bu eksiği doldurmak amacıyla, Voronoi biçimli desenleri üretken sistemlerle üretmenin potansiyelini keşfetmeyi hedeflemektedir. Bu bağlamda çalışmanın, Voronoi desen üretmek için bir üretken sistem seçme konusunda tasarımcıya yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

Problemin tanımı ve araştırma sorusu

Voronoi, matematik alanındaki bir hesaplama tekniği olarak, mimarlıkta cephe tasarımında kullanılabilir. Dolayısıyla Voronoi yöntemi, yapının cephesinde düzensiz ve organik şekiller oluşturulmasını ve bu şekillerin doğada yaygın olarak görülen formları ve desenleri yansıtmasını sağlamaktadır.

Voronoi, aynı zamanda birçok üretken sistem ile bütünleşik kullanılabilen bir yöntemdir. Bu sayede cephe için daha modern ve benzersiz görünmesini sağlayan şekiller üretilebilir. Ayrıca bu yöntem ile daha çok alternatif şeklin hızlı üretimi sağlanabilmektedir.

Bu durumda üretilen pek çok şeklin inceleme ve değerlendirme aşamalarının geleneksel yöntemler ile yapılması zaman alıcı bir süreç olmaktadır. Bu süreci, algoritmik tasarım teknikleri ile istenen kriterler ve sınırlamaları tanımlamak suretiyle kısaltmak mümkündür. Algoritmik yöntem ile şekiller enerji etkinliği veya yapısal performans açısından test edilebilmekte ve en uygun şekiller elde edilebilmektedir. Bu bağlamda “*Mimari cephede Voronoi esaslı tasarımlar için yenilikçi desen keşfetmek amacıyla üretken sistemlerin kullanılma potansiyeli nedir?*” sorusu araştırmanın motivasyonu olmuştur.

Alt araştırma soruları şu şekilde belirlenmiştir:

- Mimari tasarımda kullanılan üretken sistemlerin Voronoi desen üretme bağlamında birbirlerine göre farklılıkları nelerdir?
- Üretken sistemler ile Voronoi cephe üreten tasarımcının üstlendiği görevler nelerdir?
- Değişen üretken sistemler ile ortaya çıkan modellerin uygulanabilirlik açısından birbirlerine göre yapısal farklılıkları nelerdir?

Farklı üretken sistemler ile oluşturulan her bir örüntünün farklı biçimsel ve yapısal davranışlar ortaya koyması beklentisi çalışmanın hipotezini oluşturmaktadır. Hipotezi test etmek için aynı başlangıç domain'ine sahip bir cephe uygulaması için dört farklı üretken tasarım algoritması kullanılarak 96 adet cephe alternatifi elde edilmiştir. Bu tasarımların imal edilebilmesi hedefiyle üretilen modellerin yapısal verimliliği de değerlendirilmiştir.

Çalışmanın yöntemi ve tezin aşamaları

Bu tez, üretken tasarım ve performans tabanlı tasarım bağlamında yer almaktadır. Tasarım süreci boyunca tasarımla ilgili sorunları, potansiyelleri ve kısıtlamaları formüle etmeyi, uygun hesaplama araçlarını ve tekniklerini kullanarak sonuçta ortaya çıkan tasarım alternatiflerini yinelenmeli olarak keşfetmeyi ve performanslarını değerlendirmeyi

içermektedir. Tez toplamda altı bölümden oluşmakta olup teze ait akış şeması Şekil 1.1’de yer almaktadır.

Birinci bölümde Voronoi’nin mimarlıkta kullanımına yönelik potansiyeline vurgu yapılmıştır. Çalışmanın hedefi, amacı, motivasyonu, araştırma sorusu ve yöntemi açıklanmıştır.

İkinci bölümde, bina cephesinin mimarideki önemi ve görevlerine değinilmiştir. Bu bağlamda mimaride cephe süsleme kavramı ele alınmıştır. Tarihte pek çok kez tartışılan bir konu haline geldiği ve farklı anlamlar yüklendiğinden bahsedilmiştir. Günümüzde dijital teknolojilerin gelişimi ile birlikte mimarlıkta süslemenin kullanım sebeplerinin ve yöntemlerinin değiştiğine vurgu yapılmıştır. Bu değişimin özellikle doğadaki morfolojik süreçleri taklit etmeye yönelik yaklaşımlar doğrultusunda olduğu açıklanmıştır. Bu bağlamda Voronoi’nin doğadaki örneklerinden bahsedilmiş ve bu diyagramın matematiksel açıklaması yapılmıştır. Ardından Voronoi ile tasarlanan cephe örnekleri, kullanım amacı ve uygulanma tipleri bakımından değerlendirilerek Voronoi desenli cephe tasarımlarının günümüzdeki önemi vurgulanmıştır. Ayrıca Voronoi’nin yapısal performansını keşfetmeyi içeren çalışmalar araştırılmıştır. Buna göre, Voronoi formlarının üretken sistemler ve farklı parametreler ile birlikte çalışma uyumu, tasarımsal kolaylığı, malzeme performansı ve yapısal uygunluğuna yönelik ideal sonuçların alındığı görülmüştür.

Üçüncü bölümde, üretken sistemler ile cephe formları üretme amacıyla algoritmik tasarım yönteminin nasıl kullanılabildiği ve mimarlar için öneminden bahsedilmiştir. Bununla birlikte mimari tasarımda en çok kullanılan üretken sistemler tespit edilip, her sistem, kısa tarihçesi, algoritmik tanımı ve mimarideki örnekleri ile kısaca açıklanmıştır. Son olarak literatür araştırması sonucu elde edilen, üretken sistemlerin karşılaştırıldığı bir çalışma üzerinden her sistemin kendisini oluşturan bileşenler, kuralın çalışma prensibi, üretilen formun niteliği ve avantajlarına değinilmiştir.

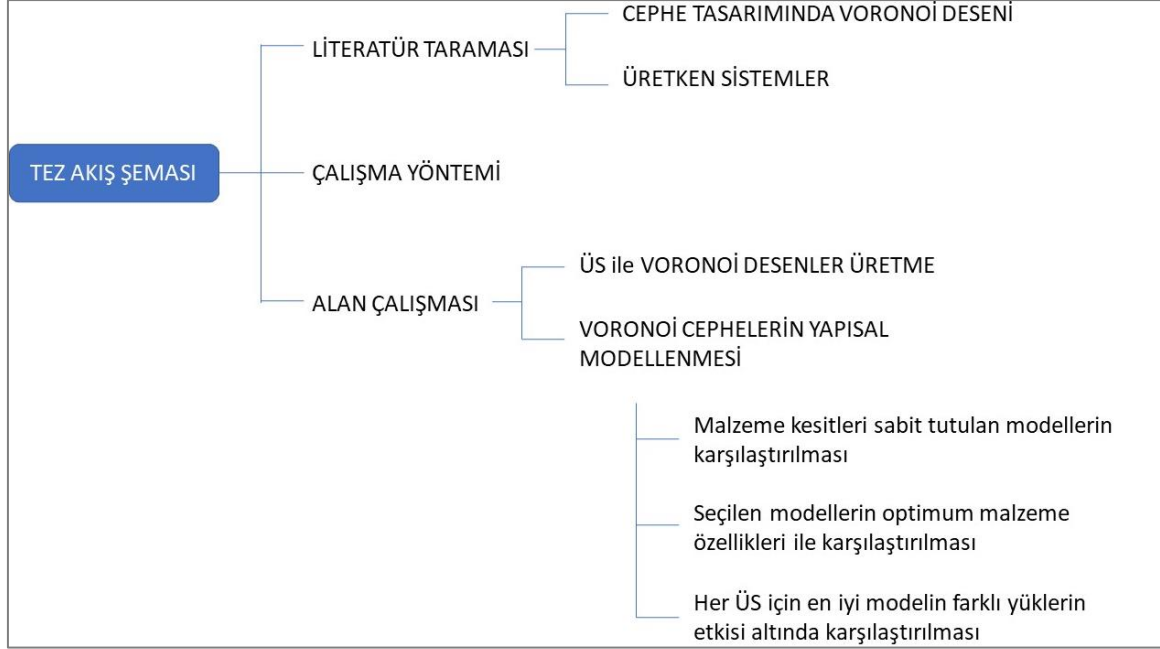
Dördüncü bölüm, tezin alan çalışmasına ait yöntem bilgisini içermektedir. Çalışma kapsamında kullanılacak yazılımlar kısaca açıklanmıştır. Ardından cephe geometrisinin sınırları ve cephe üzerinde üretken sistemlerin desen üretmeye başladığı konumlar yani başlangıç noktalar belirlenmiştir. Ardından yapısal analizi gerçekleştirmek için gerekli bilgiler belirlenmiştir. Bunlar; mesnetler, yükler ve malzeme özellikleridir.

Beşinci bölüm olan alan çalışmasında üretken sistemler ile Voronoi cephe üretimi için gerekli olan parametre verileri sunulmuştur. Her sistem için algoritmayı oluşturan kurallar ve diğer parametreler belirlendikten sonra özyineleme ile üretilen desenler geometrik özellikleri ile birlikte tablo olarak sunulmuştur. Ardından desenler yapısal elemanlara dönüştürülerek farklı yükler altındaki performans verilerine ulaşılmıştır. Elde edilen verilere göre üretken sistemler karşılaştırılmış, Voronoi cephe tasarımı için en uygun sistemin tespiti yapılmıştır.

Alan çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, her üretken sistem için ortak parametreler ve referans kurallar belirlenmiştir. Bu veriler ile algoritmalar oluşturulup desenler üretilmiştir. Üretilen desenlerin *geometrik özellikleri* ve desen üretimi bağlamında tasarımcı açısından *olumlu/olumsuz yönleri* karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada, bu Voronoi desenler yapısal elemanlara dönüştürülüp yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz çalışması, birbirini takip eden üç değerlendirme aşamasından oluşmaktadır. Başlangıçta, her bir üretken sistem için dört kural belirlenmiş ve bu kuralların altı nesil sonrasında toplam 24 farklı desen üretilmiştir. Ardından elde edilen 96 desenin ölü yük altındaki statik davranışı incelenmiştir. Her bir ÜS'nin kendi içerisinde bulunan kurallar için en iyi sonucu veren desenler tespit edilmiştir. İkinci kısımda optimum tasarım hedefi bakımından her bir kural için en efektif sonucu veren desene ulaşmak amaçlanmıştır. Her ÜS için 4 olmak üzere toplam 16 desenin, malzeme en kesitleri optimize edilerek statik yük altındaki davranışları incelenmiştir. Bu aşama sonucunda ise her bir ÜS için en ideal Voronoi deseni seçilmiştir. Üçüncü kısımda dört ÜS'nin en efektif ve en kararlı desenleri karşılaştırılmıştır. İncelenen cephe şartlarının uygulanabilirliğine yönelik gerçekçi sonuçlar elde etmek için cephe kaplama ve rüzgâr yükleri de yapısal performansa dahil edilmiştir. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde puanlama yöntemi ile en iyi performansı gösteren üretken sisteme ulaşılarak detaylar yorumlanmıştır.

Çalışmada üretken sistemler ile Voronoi desen üretildiği, yapısal elemana dönüştürüldüğü ve simülasyonların gerçekleştirildiği algoritma, bilgisayar ortamında tasarlanmıştır. Kullanılan yazılım Rhino ve içerisinde gömülü çalışan Grasshopper yazılımları kullanılmıştır. Her üretken sistem için ayrı tasarlanan algoritmalar, Grasshopper içerisinde kullanılan eklentiler yardımıyla oluşturulmuştur. Yapısal analiz için ise Grasshopper eklentisi olan Karamba 3d kullanılmıştır.

Altıncı bölümde, yapılan analizler sonucu elde edilen verilere göre sonuçlar tartışılmış, gelecekte yapılacak çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.



Şekil 1.1. Tez akış şeması

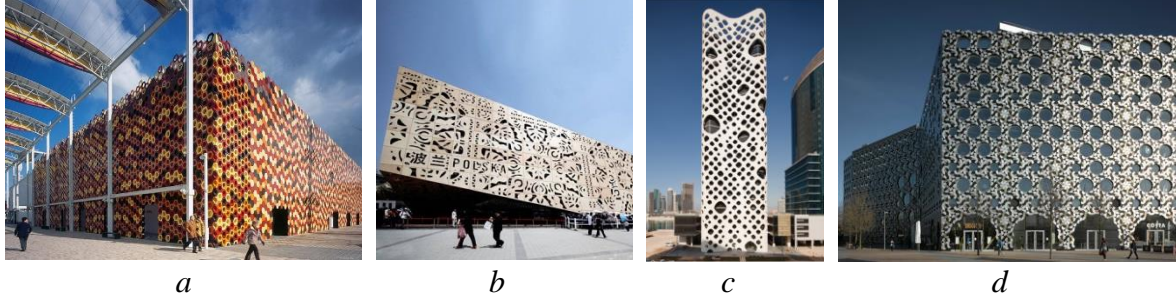
2. CEPHE TASARIMINDA VORONOI DESENİ

Bina Cephesi, binalarda genel olarak iki önemli rol oynamaktadır. Birincisi binanın içi ve dışı arasında aracı bir unsur olmasıdır. Görsel ve termal kontrolü sağlamak ve enerji tüketimini azaltmak cephenin bu bağlamdaki önemli görevleri olmaktadır. İkincisi, binanın kimliği ve kentsel bağlamıdır. Bu rolde cephe sadece kendi kimliğini oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda kentsel ölçekte kentsel kimliği oluşturur. Dolayısıyla bağlamıyla tutarlı olmalı ve estetik yönü dikkate alınmalıdır (Sendi, 2016).

Mimari cephe tasarımında süsleme kavramı, mimarın gerekli bir bileşeni olarak görülmektedir. Geleneksel anlamda bir yapının karakterini ve sosyal statü içerisindeki yerini belirlemiştir (Schumacher, 2009). Süsleme üzerine önemli teoriler geliştiren ve materyalist sanat üzerine tartışmaların kaynağı olan Semper'e göre mimarın kökeni giyim ve maskeleyedir. Bir yapının duvarları üzerinde süsleme olduğu takdirde onun bir mimari eser olabileceğini savunmuştur (van Eck, 2009). Ancak Modernist akım ile süsleme anlayışında bir kırılma yaşanmıştır. Mimaride süsleme, bir ana yüzeye veya nesneye uygulanan ilave, gereksiz bir yapı bileşeni olarak kavramsallaştırılmıştır (Miller, 2011). Viyanalı mimar Loos (1998)'a göre Modernizm çağının büyüklüğü dekorasyonun olmaması ile sağlanmalıdır. Sadeliği, insanlığın evriminin ulaştığı bir nokta olarak görmüş; süslemeyi devam ettirmeyi, harcanan malzeme ve para bakımından bir israfa neden olması sebebiyle suç olarak yorumlamıştır (Opel, 1998).

Ardından Postmodernizm, işlevin okunabilirliği ve sadeliğin önemini vurgulandığı Modernizm'e bir eleştiri olarak ortaya çıkmış, bu paradigmayı alaycı bir tavırla yorumlamıştır (Moussavi ve Kubo, 2006). Ancak süslemenin yeniden yaygın bir biçimde kabul görmesindeki tetikleyici unsur Postmodern girişimden ziyade bilgisayarların mimaride kullanımı olmuştur. 1990 yıllarından günümüze bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD) teknolojileri yeni süsleme perspektifleri meydana getirmiştir. Yazılım araçları ile birlikte CNC makineleri gibi üretim teknolojileri (CAM) ve yenilikçi malzemeler sayesinde daha karmaşık geometrilerde desenleri ve dokuları üretmek kolaylaşmıştır. Günümüzde pek çok çağdaş mimaride desenleme ve mozaikleme gibi süsleme uygulamaları cepheye kullanılmaktadır (Picon, 2013). Expo 2005 İspanya pavyonu (WEB-1), Şanghay

Expo 2010 Polonya Pavyonu (WEB-2), Dubai’de 0-14 binası (WEB-3) ve Londra’da Ravensbourne Tasarım ve İletişim Koleji (WEB-4) örnekler arasındadır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Son yıllarda uygulanmış cephe süsleme örnekleri (a) Expo 2005 İspanya pavyonu; (b) Şanghay Expo 2010 Polonya Pavyonu; (c) Dubai’de 0-14 binası (2010); (d) Londra’da Ravensbourne Tasarım ve İletişim Koleji (2010)

Günümüzde cephede aranan süsleme arayışına yönelik genel bağlamda üç işlevsel nedenden bahsedilmektedir. *Birincisi* büyük mağazalar, alışveriş merkezleri, sinema salonları, kütüphaneler ve müzeler gibi iç ve dış mekân arasında herhangi bir ilişki gerektirmeyen yapı tiplerinin cephede geniş bir boş alana sahip olmasıdır. *İkincisi* cephede geniş bir alanda yer verilen cam malzemenin tek başına enerji etkin bir çevresel konforu sağlayamıyor olmasıdır. *Üçüncü* neden ise süslemenin bir iletişim aracı olarak kullanılmasını temel almakta, binanın kentsel ortamla bağlantı kurmasını sağlamaktır (Moussavi ve Kubo, 2006). Ancak pek çok niteliğin bir araya geldiği cephe sistemlerinin, karmaşıklıkmaya ve çeşitlenmeye başlaması ile doğa esinli yaklaşımların artışı fark edilebilir kılınacaktır.

Özel bağlamda ise süslemenin kullanımını tetikleyen nedenler; mimarın teknoloji bilgisini gösterme arzusu, itibar – güç – marka sembolü ve bina işlevinin veya programının bir temsilini oluşturarak ne tür bir amaca hizmet ettiğinin dışarıdan algılanmasını sağlamak (Balik ve Allmer, 2016) ve doğa esinli tasarımların insanlar tarafından daha estetik bulunması olarak sıralanabilir.

Bu doğrultuda Levit, mimaride yeni desen anlayışının biyolojik hücresel biçimlenmeye doğru yöneldiğini vurgulamış, bunun sebeplerini tartışmıştır. Yazara göre iç içe geçmiş hücresel biçimler toplumu oluşturan bireylerin farklı eylemleri ve arzuları ile bütün içerisinde uyumlu yaşamını temsil etmektedir. Bu sebeple organik yapıdaki hücresel süslemeler toplumun doğal bir görüntüsü olarak bir çekiciliğe sahip olmaktadır. Bunun

yanında organizma benzeri hücresel biçimlerin kullanılması insan yapımı dünyanın doğa ile yakınsanmasını sağlamakta böylelikle bu formları cazibeli kılmaktadır.

İçinde bulunduğumuz dijital dönemde hedeflenen desenler ise matematik, hesaplama ve sanatın bir uyumu olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek teknolojinin sunduğu imkanlar sayesinde karmaşık desenleri oluşturmak kolaylaşmakta ve tasarımcıları doğadaki oluşumların süreçlerini anlamaya yöneltmektedir. İlham alınan doğal biçimler arasında deriler, kristaller, protein kıvrımları, virüs ve mikroorganizmalar, damlalar, Voronoi hücreleri, Lindenmeyer sistemleri, ağlar, sürüler vb. yer almaktadır (Garcia, 2006). İnsanın doğadan öğrenme biçiminin içinde bulunduğu zamanın bilimsel ve teknolojik düşünce yapısına bağlı olarak değiştiği göz önüne alındığında; doğayı incelemeye yönelik araç ve yöntemlerin gelişmesiyle mimarinin doğanın bir parçası olarak tasarlanma gayreti artmaktadır (Mutlu Avinç & Arslan Selçuk, 2020).

Bu bağlamda günümüzde mimari tasarım sürecinin dijital ortamda gerçekleştirilmesi doğadaki karmaşık biçimlenmelerin hedef alınmasının bir sebebi olmaktadır. Schumacher'in zarafet olarak tanımladığı bu karmaşıklığın özünü doğa yasaları oluşturmakta ve biçimler bağımsız parçalara ayrılamamaktadır. Bunun aksine bilgisayar tabanlı parametrik teknikler ile sistemi oluşturan parçalar net bir şekilde ayrılabilen, doğal morfolojilerin mimariye aktarılması için kaynak olabilmektedir. Doğadaki fiziksel sistem yasalarının simüle edilmesi ile oluşturulan kendi kendine organize biçimler tıpkı doğadaki gibi ayrışmaz, karmaşık ve dolayısıyla zarif olmaktadır (Schumacher, 2007).

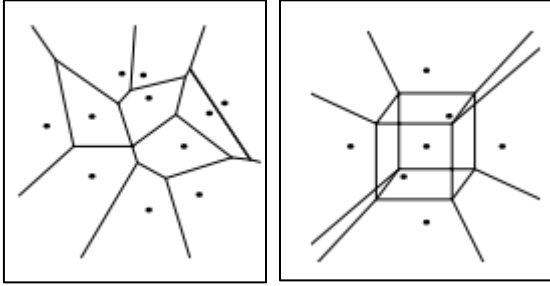
2.1. Voronoi Deseni

Mimaride yapısal yüzey şekillendirmede kullanımı giderek artan biyolojik eğilimlerden biri Voronoi Diyagramıdır. Voronoi, doğada pek çok biçimlenmeyi tanımlamaktadır. Yusufçuk kanadı, bal peteği, zürafa derisi, sabun köpüğü veya bir yaprak dokusu örnekler arasındadır (Resim 2.2) (Burry ve Burry, 2010). Bu yapıların bilgisayarlar aracılığıyla hesaplanabilme kolaylığı mimari tasarımda iki ve üç boyutlu yapısal elemanların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



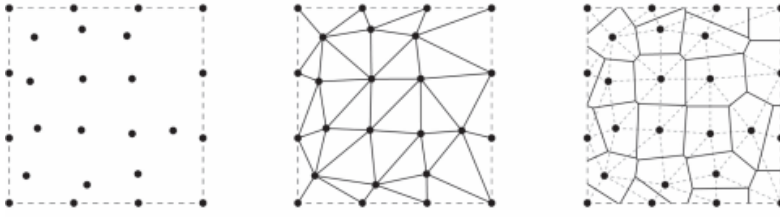
Resim 2.2. Doğada görülen Voronoi desenleri; (a) balpeteği, (b) zürafa derisi, (c) sabun köpüğü, (d) yaprak dokusu

Voronoi diyagramı doğadaki bu formları modellemede mükemmel uygulanabilirliği olan, bir yüzeyi veya uzayı bölgelere ayıran geometrik yapıda matematiksel bir formüldür. Tüm alanı noktaların dağılımına göre alt alanlara bölmekte, her nokta dahil olduğu hücre kenarlarına diğer noktalardan daha yakın konumda bulunmaktadır (Coates, Derix, Krakhofer ve Karanouh, 2005). Adını, kuadratik çalışmasında iki ve üç boyutlu Voronoi diyagramları kullanan matematikçi Georgy Voronoi'den (1868-1908) almıştır. Lejeune Dirichlet'ten (1805-59) sonra ise Dirichlet mozağı olarak da bilinmektedir (Burry and Burry, 2010). İki boyutta yüzeyi bölerek çokgenler oluştururken; üç boyutta uzayı bölerek çok yüzlüler (polyhedron) oluşturmaktadır (Şekil 2.1) (Fortune, 2017).



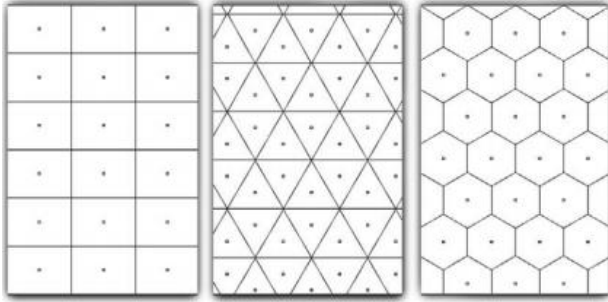
Şekil 2.1. Solda iki boyutta, sağda üç boyutta Voronoi hücreleri

Diyagramı oluşturmak için Fortune'un Tarama Çizgisi ve Delaunay üçgenleme gibi algoritmalar farklı araştırmacılar tarafından tanımlanmıştır (Dimcic, 2011). En basit tekniğiyle bir Voronoi diyagramı oluşturmak için düzlem üzerinde tanımlı n tane nokta Delaunay üçgenleme ile birleştirilerek çizgiler oluşturulmaktadır. Bu çizgilerin orta noktalarının birleştirilmesi ile n tane hücre meydana gelmektedir (Şekil 2.2) (Rokicki ve Gawell, 2016).



Şekil 2.2. Noktalardan Voronoi diyagramının oluşturulması

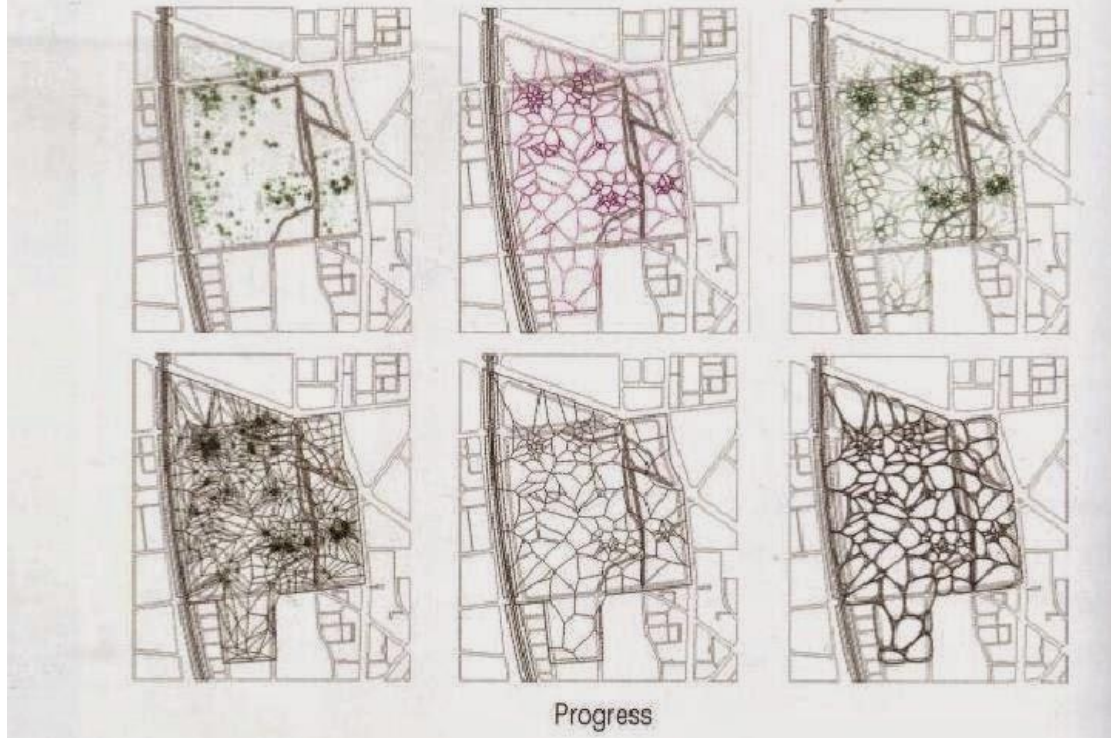
Voronoi noktaları ile düzenli veya düzensiz çeşitli ızgaralar oluşturulabilmektedir. Düzensiz yerleşimi doğada görülen desenleri elde etmeyi sağlamaktadır. Düzenli yerleşim durumunda ise üçgen, dörtgen, altıgen gibi geometrik ızgaralar oluşturmak mümkün olmaktadır (Şekil 2.3) (Dimcic, 2011).



Şekil 2.3. Voronoi diyagramının düzenli nokta dizilimleri ile oluşturulmuş geometrik formlar

Voronoi diyagramları; antropoloji, astronomi, arkeoloji, biyoloji, haritacılık, kimya, hesaplamalı geometri, kristalografi, ekoloji, ormancılık, coğrafya, jeoloji, pazarlama, metalografi, meteoroloji, yöneylem araştırması, fizik, fizyoloji, uzaktan algılama, istatistik, kentsel planlama ve mimari gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin astronomide evrenin yapısını anlamak, meteorolojide yağış sürecini tahmin etmek, şehir planlamasında devlet okullarına yer bulmak için kullanılabilir (Okabe, Boots, Sugihara ve Chiu, 2000). Mimaride planlama ve peyzaj düzenleme gibi alanlarda ve özellikle cephe yüzeyi için form bulma amacıyla kullanımları artmaktadır. Önemli örneklerden biri olan, Zaha Hadid tarafından *Tayvan Ulusal Gösteri Sanatları Merkezi* için tasarlanan peyzaj çalışması Voronoi diyagramları ile yapılmış bir kentsel düzenleme örneğidir (WEB-5). Projede, değerli ağaçlar, tarihi yapılar ve sitenin sınırları Voronoi diyagramının elemanları olarak tanımlanmış, böylece meydanın dolaşım alanları ve etkinlik

yerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak oluşan desen sitenin mevcut durumuna saygı duyarken, bina ile kendisini çevreleyen park alanı arasında güçlü bir bağlantı kurulmuştur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Zaha Hadid tarafından, Voronoi ile düzenlenen peyzaj tasarımı

2.2. Mevcut Yapılar Aracılığı ile Voronoi Cephe İncelemesi

Voronoi'nin benzersiz hücrelerden oluşan karmaşık biçiminin mimari cephede uygulanabilirliği yeni teknoloji ve malzemelerin keşfi ile bağlantılı gelişmektedir. Hesaplamaya yönelik bir form olma özelliğinden dolayı tasarımı, bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple Voronoi, mimaride dijitalleşmenin temsili biçimlerinden biri olmaktadır.

Yenilikçi bir desen olmasının yanı sıra mimarlar tarafından tercih edilmesinin önemli sebeplerinden biri doğadaki pek çok biçimsel oluşumu temsil ediyor olmasıdır. Biçimsel benzerliği ile birlikte tıpkı doğadaki gibi en az malzeme ile oluşma eğilimine sahip olmaktadır. Bu durum doğa ile mimarinin yakınsamasını amaçlayan tasarım yaklaşımlarının dijitalleşme ile daha sistemik ve verimli formlar üretmeye yöneldiğinin bir göstergesidir.










Voronoi, birçok araştırmacı tarafından mimari cephede bilinen düzenli mozaiklere alternatif bir ızgara olarak değerlendirilmiştir. Brzezicki, cephede kullanılan eğik ızgara türlerini sınıflandırırken Voronoi mozaiğini düzensiz bir ızgara türü olarak değerlendirmiştir (Brzezicki, 2018). Kardasis, yumuşak ızgara (soft grid) diye tabir ettiği dikdörtgen olmayan ızgara tiplerini yüksek simetri, yerel zorlama, global sistemler, alt bölüm şemaları ve paralel yüzölçümler ve Voronoi diyagramları olmak üzere toplam altı kategoride incelemiştir (Kardasis, 2011). Chan, çağdaş mimari tasarımda popüler olarak kullanılan temel yapısal cephe türlerini diagrid, sert dikdörtgen ızgara, delikli kaplama ve Voronoi olmak üzere 4 kategori olarak ele almıştır (Chan, 2009).

Mimari cephede Voronoi deseni kullanmak günümüzde popüler bir tercih olmakta ve genellikle binanın kullanım amacına uygun bir sebepten veya modern bir yaklaşım sergileme amacından dolayı tercih edilmektedir. Voronoi tercih edilme sebepleri ve uygulama esasları yönünde mevcut yapılar üzerinden bir değerlendirme yapılmasına gereksinim duyulmuştur. Bu noktada 14 adet yapı bina görüntüsü, yapı ismi, yapım yılı, yeri, uygulama tipi ve Voronoi'nin kullanılma sebebi başlıklarında tabloladıştır (Çizelge 2.1).






Mevcut yapılardan referansla ilk olarak, farklı coğrafyalar ve kültürlerde uygulanmış örneklere ulaşılmıştır. Tasarım fikri bakımından binanın bir doğa müzesi olduğu, bir sağlık tesisi olduğu veya doğa ile iç içe olduğu durumlarda Voronoi'nin, doğadaki organizmalara benzer biçimlenmeyi oluşturmak amacıyla kullanıldığı görölmüştür. Binanın bir matematik okulu olduğu veya bir araştırma merkezi olduğu durumlarda da Voronoi'nin, matematiksel çağrışımlar yapmak amacıyla kullanıldığı beyan edilen örnekler mevcuttur (Çizelge 2.1).

Voronoi'nin cephede uygulanma tipine göre giydirme cephe, yüzey işleme, yüzey kaplama, yapısal desen ve ikinci cephe yüzeyi olarak karşımıza çıkmaktadır. İncelenen örneklerin %50'sinin ikinci cephe olarak kullanıldığı görölmektedir.

Çizelge 2.1. Voronoi'nin cephede kullanım örnekleri

	Bina görüntüsü	Yapı ismi	Yıl / Yer	Uygulama Tipi	Voronoi kullanım sebebi
1		Melbourne Resital Merkezi	2008, Melbourne	Giydirme cephe ve yüzey işleme	İçinde canlı müzik gösterilerinin düzenlendiği binanın dış cephesi müzik ekipmanlarını koruyan bir ambalajı sembolize etme amacı taşımaktadır (WEB-6).
2		Şangay Doğa Tarihi Müzesi	2015, Şangay	Giydirme Cephe sistemi	Bina, doğa müzesi olması sebebiyle cephe duvarı biyolojik yaşam formlarının temelini simgeleyen hücre zarını temsil etmektedir (Ronnett and Abdullah, 2010).
3		Brüksel Frankofon Parlamentosu	2013, Brüksel	Giydirme cephe sistemi	Restorasyon projesi kapsamında çağdaş ve tarihi yaklaşımın bir arada olması tercih edilmiştir (WEB-7).
4		Marronnier Park	2013, Seul	Yapısal desen	Doğa ve binanın uyumunu sağlamak amacıyla çevredeki ağaçlara benzer bir tasarım yakalamak amaçlanmıştır (WEB-8).
5		Bristol Üniversitesi Fry Binası	2019, Bristol	İkinci cephe sistemi	Matematik okulu olması sebebiyle matematiksel bir denklem olan Voronoi diyagramı kullanılmıştır (WEB-9).
6		KTÜ Merkezi Araştırma Laboratuvarı	2018, Trabzon	İkinci cephe sistemi	Araştırma binası olması sebebi ile hesaplamalı tasarım yöntemi kullanmak amaçlanmıştır (WEB-10).
7		Water cube (Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi)	2008, Pekin	Yapısal desen	Yüzme ve dalış etkinliklerinin yapıldığı bir bina olması sebebi ile cephe tasarımı su kabarcığını sembolize etmektedir (WEB-11).
8		Dr. Manuel Gea Gonzalez Hastanesi	2013, Mexico City	İkinci cephe sistemi	Fotokatalitik özellikli bir kaplamaya sahip olması ve çevreyi temizleyen bir bina olduğunu vurgulamak amacıyla moleküler biyolojii sembolize etmek için kullanılmıştır (WEB-12).
9		The spine binası	2021, Liverpool	Cam yüzeyi işleme	Bina, bir sağlık tesisi olması sebebi ile cephenin deri organını, kılları, sınırları, ter bezlerini vb. biyolojik unsurları temsil etmesi amaçlanmıştır (WEB-13).

Çizelge 2.1. (devamı) Voronoi'nin cephede kullanım örnekleri

10		HOTA Gallery (sanat galerisi)	2021, Queensland	Yüzey Kaplama	Yakınlarındaki Ulusal Parktaki kaya oluşumlarına benzer bir biçim oluşturularak çevresi ile uyumu sağlamak; aynı zamanda Voronoi'nin doğada çevresel değişimlere tepki veren bir desen olduğu bu şekilde şehrin genç ve dinamik enerjisini yansıtmak amaçlanmıştır (WEB-14).
11		Cordoba Çağdaş Sanat Merkezi	2013, Córdoba	İkinci cephe sistemi	Kentteki eski Arap yerleşiminin matematiksel ve felsefi niteliklerini özellikle İslami süslemeleri yansıtmak amacıyla kullanılmıştır (WEB-15).
12		M24 Apartments (Konut yapısı)	2017, Leederville	İkinci cephe sistemi	Barlar ve kafelerden oluşan banliyö içerisinde yer alan konut binasının cephesi için gazlı içeceklerden ilham alınarak kabarcıklı bir görünüm yakalamak amaçlanmıştır (WEB-16)
13		Airspace Tokyo (Konut yapısı)	2007, Tokyo	İkinci cephe sistemi	Yenileme projesi kapsamında daha önce cephesi bitki ile sarılmış olan yapının yıkılması sonrası, bitkilerin cephede gösterdiği hem gölgeleme hem görsel performansına benzer bir tasarım yakalamak amaçlanmıştır (WEB-17).
14		Alibaba Genel Merkezi	2009, Hangzhou	İkinci cephe sistemi	Çin'in geleneksel buz kırığı benzeri desenlerden oluşan pencere kafeslerine atfetmek amacıyla tasarlanmıştır (WEB-18).

2.3. Voronoi Cephe yapılarına yönelik literatür taraması

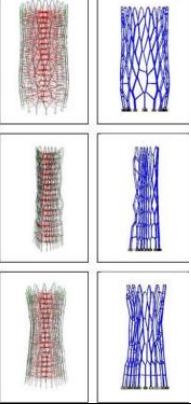
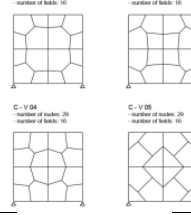
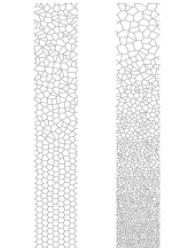
Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik alanında çeşitli problemlerin çözümünde kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntemin gelişimi, dijital bilgisayarların ortaya çıkmasıyla başlamış ve sonraları çeşitli alanlarda (yapı mekaniği, ısı transferi ve akışkanlar dinamiği gibi) geniş ölçüde kullanılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım sürecinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntem kullanılarak, sistemlerin tasarımı ve performansı optimize edilmektedir. Özellikle yapıların analizi, malzeme seçimi ve üretim sürecinde kullanılmaktadır (Bathe, 2006).

Günümüzde tasarımcılar için parametrik ortamda çalışan Karamba ve Milipede gibi yapısal analiz araçları geliştirilmiştir. Bu araçlar, herhangi bir yük altında herhangi bir geometrik

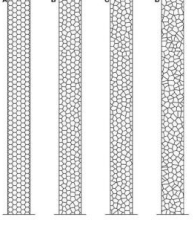
formun gerilme dağılımlarını ve deformasyonlarını gösteren etkileşimli, parametrik sonlu elemanlar analiz programlarıdır. Bu sayede mimarlar, tasarımlarının yapısal olarak güvenilir olmasını sağlamak ve performansını anında değerlendirebilmektedir (Schumacher, 2015).

Literatürde, inşaatta kullanılan belirli açılar kullanma, farklı yoğunluk-düzensizlik derecesini değiştirme ve genetik algoritma ile optimize etme yöntemleri ile birden çok alternatif Voronoi desenin üretildiği ve belirlenen kriterler bağlamında uygun olanların seçildiği çalışmalar incelenmiştir. Farklı performans türlerinin de araştırıldığı bu desenler için, hedeflenen tez çalışması kapsamında yapısal davranış analizlerinin gerçekleştirildiği çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Farklı yöntemlerle üretilen Voronoi formu cephelerin yapısal davranışının test edildiği çalışmalar

		Görseller	Voronoi Kullanım Amacı	Yöntem	Araştırma Sonucu
1	(Torghabehi ve von Buelow, 2014)		İkinci cephe sistemlerinde karmaşık hücre benzeri form bulma sürecinde genetik algoritmaların keşfedilmesini ve bu biyolojik modellerin hem performatif olabileceği hem görsel olarak da karmaşık formlar üretebileceğini göstermektedir.	Minimum ağırlık, maksimize edilmiş taban alanı gibi çoklu uygunluk kriterleri ile formlar oluşturulmuştur. Belirlenen birden çok performans hedefi için genetik algoritma kullanılmıştır. Estetik görünümü sağlamak amacıyla Voronoi deseninin karmaşık olması sağlanmıştır.	Çoklu performans hedefleri ve büyük geometrik değişkenliği olan karmaşık problemlerin keşfedilmesinde Voronoi ile genetik algoritmaların kullanıldığı bir yöntemin avantajlı olduğuna ulaşılmıştır.
2	(Gawell ve Nowak, 2015)		Düzlemsel Voronoi formunu oluşturan çubuk yapılarının nasıl optimize edileceğini test etmek.	Dik ve çapraz yönlü çubuklardan oluşan farklı Voronoi desenli ızgaralar üretilmiştir. Izzaralara sabit ve hareketli yükler uygulandıktan sonra yapısal ağırlıklar karşılaştırılmıştır.	Voronoi yapılarının malzeme tüketiminde hedeflenen verimliliği gösterdiği bulunmuştur. Voronoi'nin optimum şekillendirmede önemli bir araç haline geleceği savunulmuştur.
3	(Mele ve diğerleri, 2016)		Yüksek bina cepheleri için diagride alternatif, yapısal ızgara olarak geleneksel olmayan doğa esinli yapısal modellerin mekanik özelliklerini keşfetmek.	Sonlu eleman analizi yöntemi ile farklı düzenlilik seviyesi ve yoğunluğuna sahip Voronoi desenler test edilmiştir. Grasshooper ve SAP2000 yazılımları kullanılmıştır.	Bina yüksekliği boyunca dış iskeletin mukavemetini en iyi şekilde ayarlamak için, eleman boyutu optimizasyonu ile elde edilebileceği gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. (devamı) Farklı yöntemlerle üretilen Voronoi formlu cephelerin yapısal davranışının test edildiği çalışmalar

4	(Angelucci ve Mollaioli, 2018)		Yenilikçi ve düzensiz bir biyomimetik model olma sebebi ile Voronoi'nin yüksek binaların dış iskeletine uygulanabilirliğini analiz etmek.	Altıgen düzeninin kademeli olarak bozulduğu beş farklı Voronoi düzeni mekanik performans bağlamında karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, sabit ve optimize edilmiş en kesitler üzerinden yapıların performansı karşılaştırılmıştır. Sismik yer hareketi ve rüzgâr yüküne verilen tepkileri de dahil edilmiştir.	Voronoi ızgarasının yapılar için güvenli ve verimli bir seçenek olabileceği gösterilmiştir. Önemli bir ağırlık azalması sağlarken, mukavemet ve yer değiştirme gereksinimleri kabul edilebilir seviyelerdedir. Hem yüksek rüzgâr yükü hem de sismik bölgeler için geleneksel ızgaraya alternatif olarak kullanılabilceği gösterilmiştir.
---	--------------------------------	---	---	---	--

Voronoi formlarının üretken sistemler ve farklı parametreler ile birlikte çalışma uyumu, tasarımsal kolaylığı, malzeme performansı ve yapısal uygunluğuna yönelik iyi sonuçların alındığı çalışmalar Voronoi'nin bu yöndeki potansiyeline dikkat çekmektedir. Ancak üretken sistemlerle birlikte form üretimine yönelik çalışmaların az sayıda olması Voronoi'nin keşfi için yetersiz olmaktadır. Bununla birlikte hangi üretken sistemin tasarım için uygun olduğunu belirlemeye yardımcı olacak nitelikte çalışmaların yapılmadığı görülmektedir.

3. ÜRETKEN SİSTEMLER

Bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli imalat teknolojilerindeki gelişmelerin, bina tasarımı ve inşaat uygulamalarını son birkaç yılda etkilemeye başladığı görülmektedir. Özellikle dijital teknolojiler üretim ve inşa esnasında oluşan zorlukları ve maliyetleri azaltmakta, ayrıca çok karmaşık formların tasarlanması, üretilmesi ve bir araya getirilmesi için yeni fırsatlar yaratmaktadır (Kolarevic, 2001).

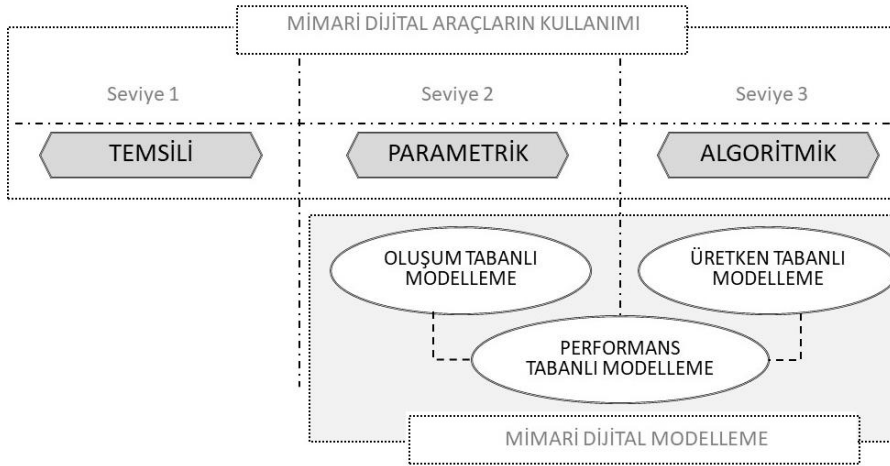
Çağdaş mimari tasarımda, görünümünden çok malzeme performansına ve temsilden çok süreçlere odaklanma eğilimi görülmektedir. Bu eğilim, tasarım yöntemlerinin biçim yapmak yerine biçim oluşturmaya odaklandığını göstermektedir. Bu değişim, nihai görünümün sadece mimarın hayal gücünün değil, üretici sistemlerin de bir ürünü olduğu ve mimarın üretici süreçlerin denetleyicisi olarak görev üstlendiği bir gelişim olarak tanımlanmaktadır (Leach, 2009).

Dijital ortamda Bilgisayar destekli tasarım yöntemleri, geleneksel tasarım yöntemlerine göre daha farklı bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntemler arasındaki temel fark, yukarıdan aşağıya mı yoksa aşağıdan yukarıya mı çalışılmasıdır. Geleneksel tasarım yönteminde, tasarımcılar genellikle yukarıdan aşağıya çalışmaktadırlar. Bunun anlamı, tasarımcı, taslak bir çizimle başlayıp adım adım bu çizimi geliştirerek nesnenin bütününe ifade eden sonuçlar elde etmektedir. Dijital ortamda hesaplamalı tasarım yöntemi kullanıldığında ise aşağıdan yukarıya bir çalışma yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemde sistemin detaylarından genel bakışa doğru çıkılarak, alt bileşenler öncelikle tasarlanmakta ve daha sonra bunların nasıl bir araya geleceği belirlenmektedir (Mitchell, Liggett ve Tan, 1990).

Oxman (2006), dijital mimari modellemeyi üç sınıfa ayırmaktadır. Bunlar oluşum (formation), üretken (generative) ve performans tabanlı modellerdir (Şekil 3.1). Oluşum tabanlı model geleneksel yöntemlerle form tasarlamaktan farklı olup, formu oluşturan dinamiklerle ilgili olmaktadır. Bu model animasyon yoluyla oluşumlar ve parametrik oluşumlar diye iki tür tekniğe ayrılmıştır. Üretken tabanlı model, formların şekil gramerleri ve benzeri üretken sistemler ile oluşturulmasını ifade etmektedir. Oluşum tabanlı modelin üretken tabanlı modelden farkı formlar, önceden formüle edilmiş üretken süreçlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Performans tabanlı model ise, analitik simülasyonlar kullanılarak rüzgâr ve yer çekimi kuvvetleri gibi fiziksel kuvvetler altındaki tasarımın direkt

olarak istenen performansı verecek şekilde yeniden biçimlenmesini ifade etmektedir. Bu modelde elemanlar, kendi kendine organize olarak performans kazanmaktadır. (Oxman, 2008).

Kotnik (2010) ise mimarlıkta dijital araçların kullanımı için üç farklı seviye tanımlamıştır. Bunlar temsili (representation), parametrik ve algoritmik seviyelerdir (Şekil 3.1). Temsili düzey, tasarım kararları verilmiş olan bir tasarımın dijital olarak tanımlanmasını ifade etmektedir. Parametrik düzey, geometriyi tanımlayan girdi ve çıktılar arasında birçok seçeneğin tanımlanması ve tasarımın farklı elemanları arasında hesaplamalı bir ilişkinin varlığını ifade etmektedir. Algoritmik düzey ise, veri manipülasyonu ve bu verilerin mimari özelliklere dönüştürülmesi için kullanılan analitik ve geometrik işlemlerin oluşturulmasını ifade etmektedir (Kotnik, 2010)



Şekil 3.1. Oxman (2006) ve Kotnik'ten (2010) uyarlanan mimaride dijital araçların kullanımı ve modellenmesine ait kategorileri gösteren şema

3.1. Algoritmik Tasarım

Algoritma, bir tasarım problemini belirli adımlarda çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, tüme varım, tünden gelim ve soyutlama gibi matematik ve mantık kurallarını kullanarak sorunun çözümüne yönelik bir plan oluşturmayı içermektedir. Algoritma, bilgi çıkarabilme ve insan zekâsının sınırlarını genişletebilme yeteneğine sahip olduğu için, bilimsel araştırmalarda ve bilgisayar uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Terzidis, 2006).

Algoritmik tasarım tekniği ile çalışırken, bir tasarım süreci genellikle çok basit bir seviyeden başlamakta ve ardından diğer katmanlar eklenmektedir; bu katmanlar, her biri kendi mantığı ve ayrıntılarıyla ilişkili farklı hiyerarşilerden oluşmaktadır. Bu seviyeler de birbirine bağlı olmakta, üyeleri birbirini etkilemekte ve bu anlamda bu yöntemle “ağrısıl (associative)” da denmektedir (Khabazi, 2012).

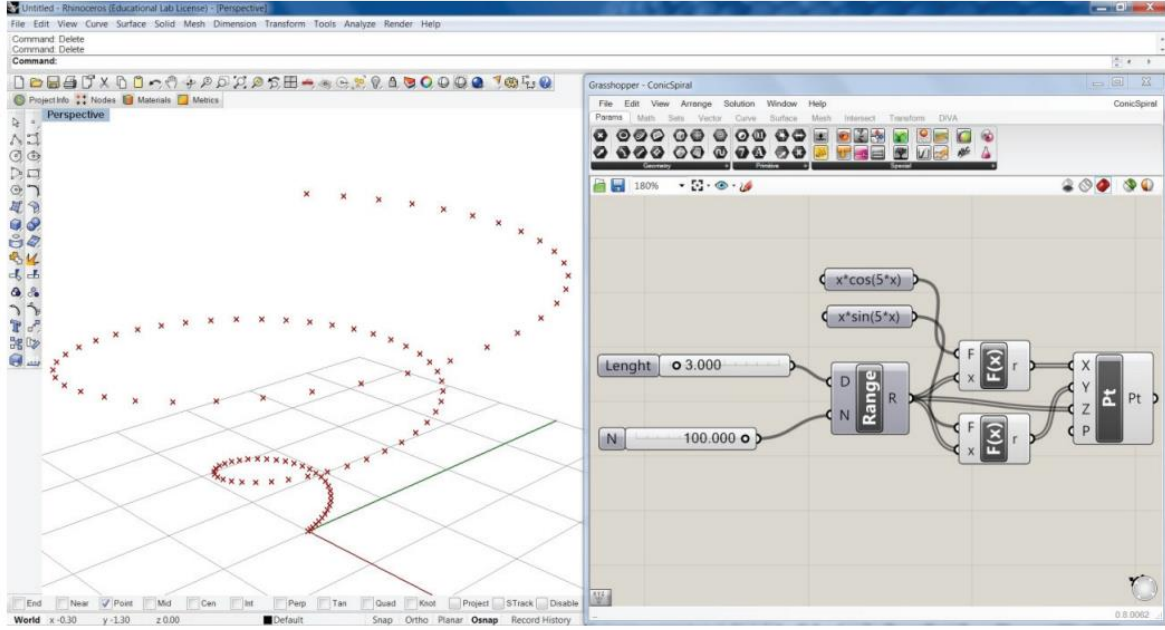
Algoritmaların kullanımı, karmaşık tasarım problemlerinin manipölasyonunu ve tasarım olasılıklarının keşfedilmesini mümkün kılmaktadır. Bu durum, geleneksel tasarım yöntemleriyle elde edilemeyecek yeni ve benzersiz formların oluşmasına olanak tanımaktadır (Terzidis, 2008).

Dolayısıyla tasarımcıya yeni görevler düşmektedir. Tasarımcıların öncelikle algoritmaları anlamaları, kendilerinin yaratmaları ve nasıl çalıştırmaları gerektiği konusunda bilgi sahibi olmaları gerekmektedir. Daha sonra tasarımcı “oklu temsil” diye adlandırılan tasarımı oluşturan her bileşeni tanımlayabilmesi, geçerli girdilerin ne olduğunu ve sonuçları nasıl yorumlayacağını bilmesi gerekmektedir (Aish, 2005).

Veri akışını yönetmek tasarımcının en önemli görevlerinden biri olmaktadır. Veri akışı, ilgili herhangi bir girdi başka bir olay tarafından değiştirildiğinde dallarını yeniden hesaplayan, birbirine bağlı olaylar tarafından sürekli olarak ateşlenen veri güdümlü bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu, doğal olarak optimize edilmiş bir iş akışı oluşturarak gerçek zamanlı çalışmayı sağlamaktadır (Yazar, 2015).

Bilgisayara bu görevleri yerine getirmesi talimatını veren bazı programlama dilleri geliştirilmiştir. Bu diller, basit veya karmaşık fikirleri organize etme yeteneği de dahil olmak üzere, insanın düşünme süreciyle eşleşebilmektedir. Bu ilkelere uyan diller genel olarak temel öğeler, birleştirme mekanizmaları ve soyutlama mekanizmaları içermektedir. Günümüzde çoğunlukla tasarımcılar görsel programlama dillerini kullanmayı tercih etmektedir. Bunun sebebi programlama için detaylı dil bilgisi gerektirmemesi ve kullanıcının sadece tasarım öğeleri ile ilgilenmesi için sadeleştirilmiş bir arayüz sağlıyor olmasıdır. Üretken Tasarım alanında, Grasshopper gibi Görsel Programlama Dilleri, Rhino gibi CAD uygulamaları, geleneksel Metinsel Programlama Diller ile karşılaştırıldığında giderek daha popüler hale gelmektedir (Leitão, Santos and Lopes, 2012).

Şekil 3.2’de bir spiralin görsel programlama dili olan Grasshopper ortamında oluşturulan veri akış diyagramını ve Rhino ara yüzündeki görsel ifadesi yer almaktadır (Leitão, Santos ve Lopes, 2012).



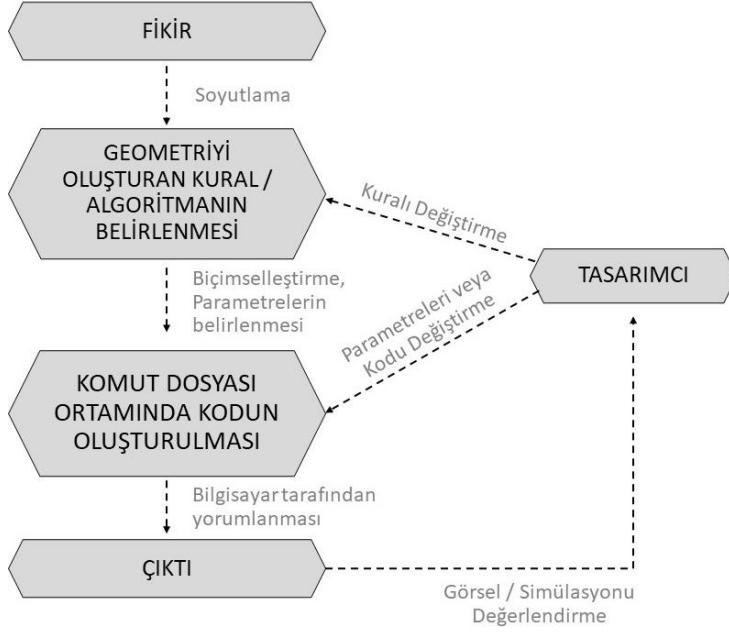
Şekil 3.2. Görsel programlama dili olan Grasshopper ile oluşturulan örnek veri akış diyagramı (sağda) ve Rhino ara yüzündeki görsel ifadesi (solda)

3.2. Üretken Sistemler (ÜS)’e Yönelik Literatür Taraması

Üretken sistemler genel olarak, metinsel veya görsel komut dosyası oluşturma platformları gibi hesaplama araçlarından türetilen, kurallara veya algoritmalara dayalı gelişen tasarım yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Afkathidis, 2015). Üretken sistemler ile tasarlamak, çeşitli geometrik formlar arasındaki ilişkileri kontrol eden kodlu parametrik kısıtlamalar kullanarak formları üreten tasarım yöntemlerini ifade etmektedir. Bu yöntem, mimari projenin geometrisinin temel öğelerini belirlemeyi, kontrol noktalarını tanımlamayı ve öğelerin birbiri üzerinde değişikliğe neden olduğu ilişkileri oluşturmayı sağlamaktadır (Grobman, Yezioro ve Capeluto, 2009).

Üretken Tasarım (Generative Gestaltung) (GROß, Bohnacker, Laub and Lazzeroni, 2018) kitabında, üretken tasarım bir döngüsel süreç olarak tanımlanmış olup, basit bir soyut fikirle başlamaktadır (Şekil 3.3). Bu fikir, bir kurala veya algoritmaya dayandırılarak bir bilgisayar aracılığıyla seri çıktılar üreten bir koda dönüştürülmektedir. Çıktılar, tasarımcının geri

bildirim döngüsü aracılığıyla kural veya algoritmanın ve komut dosyası ortamında oluşturulan kodun yeniden düzenlenmesini sağlamaktadır. Bu işlem, tasarımcı ve tasarım sistemi arasındaki geri bildirim alışverişine dayanan yinelemeli bir süreç özelliği kazandırmaktadır.



Şekil 3.3. Üretken sistem iş akışı

Peter Eisenman'ın tasarım yöntemi, ilk çağdaş üretken tasarım girişimlerinden biri olarak kabul edilmektedir. 1980'lerin sonunda, Eisenman, ölçekleme, fraktallar ve üst üste bindirme gibi farklı tasarım tekniklerini kullanmaya başlamıştır. Bu yöntemler, yazılım teknolojilerinin gelişmesiyle daha da ilerlemiştir. Örneğin Greg Lynn animasyon, spline'lar, NURBS ve izomorfik çoklu yüzeyler gibi yeni araçları kullanmaya başlamıştır. Bu üretken tasarım yöntemleri, mimarlık ve diğer tasarım alanlarında önemli bir etkiye sahiptir (Agkathidis, 2015).

Mimarlıkta, uzun bir zaman ilham alınan doğal desenler ve büyüme süreçleri tasarım teknolojilerindeki bu gelişme ile birlikte yeniden değerlendirilmiştir. Üretken sistemler temelde, doğadaki bu karmaşık formları veya sistemleri mimari tasarımda kullanmak ve karmaşık ilişkileri yönetebilmek için geliştirilmiştir (Herr ve Arch, 2002). Günümüzde üretken sistemler, daha geniş bir tasarım alanı keşfetmenin yanında verimlilik, maliyet azaltma, optimizasyon, doğruluk ve tutarlılık gibi amaçlar için de kullanılmaktadır. Bu üretken tasarım sistemleri, rastgele sonuçlar üreten basit kural tabanlı sistemlerden, tasarım

süreçlerinin özelliklerini yeniden üretmeye çalışan daha gelişmiş yapay zekâ tabanlı sistemlere kadar uzanmaktadır (Singh ve Gu, 2012).

Üretken sistemlerin genel özellikleri McCormack ve arkadaşları tarafından şu şekilde açıklanmıştır:

- Kendilerine tanımlanan sınırlı özelliklerin çok üstünde bir karmaşıklık üretebilirler.
- İçinde genellikle birçok geri bildirim döngüsünün bulunduğu karmaşık bir ilişkiler ağı oluştururlar. Bu sayede sadece çevresine uyum sağlamakla kalmaz aynı zamanda çevresini etkileyen sistemler olma özelliğindedirler.
- Kendi kendilerini onarabilirler. Bunun anlamı, değişen bir ortamda kararlı düzeni sürdürmek için kendilerini uyarlayabilirler.
- Yeni (özgün) yapılar, davranışlar, sonuçlar veya ilişkiler üretebilirler. Bu, taklit veya kopyalamadan uzak durmak isteyen tasarımcılar için istenen bir özellik olmaktadır (McCormack, Dorin ve Innocent, 2004).

Bununla birlikte üretken sistemler, tasarım süreçlerinde de ortak işlemler içermektedir. Bu süreçte, ilgili ve uygun hesaplama araçları ve teknikler kullanılarak tasarım ile ilgili potansiyeller ve kısıtlamalar formüle edilmektedir. Ayrıca, tüm olası biçimleri üretebilmek için sonlu bir kurallar dizisi uygulanmakta ve sonuç olarak ortaya çıkan tasarım alternatifleri yinelemeli olarak keşfedilmektedir (Meibodi, 2016). Yineleme, belirli bir sonuç elde edilene kadar aynı talimatların çalıştırılması olarak ifade edilmektedir. Mimarlıkta yineleme genellikle, tekrarlayan desenler oluşturmak için kullanılmakta ve bu desenler hareket, değişim veya ilerleme gibi görsel bir etki olarak kendini göstermektedir. Bütünü üreten kurallar ile parçaları üreten kuralların aynı olduğu durumları içeren süreçlerde ise bu durum, kendi kendine benzerlik ya da kendini kopyalayan bir oluşum olarak görülmektedir. Buna özyineleme de denilmektedir (Terzidis, 2006).

Mimarlıkta genel olarak beş üretken sistem kullanıldığı görülmektedir. Bunlar L-Sistemler, hücresel özdevinim, şekil gramerleri, sürü zekâsı ve genetik algoritmalarıdır. Aralarından

dört sistem LS, HÖ, ŞG ve SZ form odaklı üretim için uygun sistemler iken; GA, tasarım optimizasyonu için uygun bir sistemdir (Singh ve Gu, 2012). Bu sebeple tezin alan çalışmasında form üretimi için kullanılması uygun olan dört sistem bu bölümde detaylı incelenmiştir.

3.2.1. L-sistemler

L- sistemler, ilk olarak biyolog Prusinkiewicz ve Lindenmayer (2012) tarafından geliştirilen, başta bitkiler olmak üzere biyolojik sistemlerin büyüme ve gelişmesini anlamak için kullanılan matematiksel araçlardır. Bu sistemler, kuralların tekrar eden bir şekilde uygulanması yöntemi ile, çeşitli geometrik formları veya organizmaların büyüme ve gelişme düzenlerini modellemeye olanak tanımaktadır. Genel olarak yeniden yazma yöntemine dayalı olup, basit bir başlangıç nesnesi üzerinden gelişen, her adımda parçalarını art arda değiştirerek karmaşık nesnelere oluşturmaktadır. Aynı zamanda paralel olarak uygulanmakta ve bunun sonucunda kuralı tanımlayan F, G, +, - gibi karakterlerden oluşan diziler aynı anda değişmektedir

Bu konuda önemli katkılar sunan Smith, (1984). yaptığı çalışmalar ile L-Sistemlerin fraktaller ve parçacık sistemleri ile benzer özellikler taşımakta olduğunu, ancak bunlara kıyasla daha çok potansiyel taşıdığını öne sürmüştür. Fraktallere göre daha az kısıtlamalı ve daha fazla ayrıntı üretebilmektedir. Bu sayede kuralın daha fazla ayrıntı ile oluşturulmasıyla doğa benzeri rastgele gibi görünen bir karmaşıklık üretmenin mümkün olduğunu savunmuştur

Üretimin başlangıcını oluşturan öge aksiyom olarak adlandırılmaktadır ve belirli bir L-sistem için tüm büyüme süreci aynı aksiyomdan başlamaktadır. Eski formdan yeni formların nasıl gelişeceğine ilişkin açıklamalar üretim talimatları ile belirlenmektedir. L-sistemlerinden üretilen dizileri yorumlamak için kaplumbağa grafik dili kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre ortaya çıkan form, dizideki sembollerini ileri gitme veya dönme gibi belirli komutlar olarak algılayan bir kaplumbağa tarafından oluşturulmaktadır. Kaplumbağanın durumu, mevcut konumu (x, y koordinatları) ve kaplumbağanın baktığı açı ile temsil edilir. Kaplumbağanın takip etmeyi bildiği tüm komutlar sembol ve açıklamaları ile Çizelge 3.1' de listelenmiştir (Flake, 2001).

Çizelge 3.1. L-Sistem dizilerinin biçimlere dönüşümünü sağlayan kaplumbağa grafiklerine ait komut ve açıklamaları

Komut	Kaplumbağa hareketi
F	İleriye Çiz (Kaplumbağayı eski konumdan yeni konuma bir çizgi çizerek sabit bir uzunlukta ileri doğru hareket ettirmektedir)
G	Çizgi çizmeden İleriye Git
+	Belirlenen bir açıyla sağa dön
-	Belirlenen bir açıyla sola dön
[Dallanmayı başlat (Mevcut konumunu ve açığı daha sonra kullanmak üzere kaydet)
]	Dallanmayı bitir (Son kaydedilen konumunu ve açığı geri yükle)
	Belirli bir yüzdelikte ölçeklendirerek çiz

Buna göre en temel dallanma yapısı örneği Çizelge 3.2’de tüm özellikleri ile yer almaktadır.

Çizelge 3.2. En temel dallanma yapısına ait bilgiler

Aksiyom ve talimatlar	Özyineleme ile oluşan sembol dizileri
Aksiyom: B Talimatlar: 1. $B = F[-B] + B$ 2. $F = +FF$	1. B 2. $F[-B] + B$ 3. $FF[-F[-B]+B] + F[-B] + B$ 4. $FFFF[-FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B] + FF[-F[-B] + B] + F[-B] + B$
Kaplumbağa grafiklerinin şematik ifadesi	Dallanma yapısı

L-sistemler, mimari tasarımda form ve şekillerin oluşumunu ve dönüşümlerini kolayca görselleştirmek için bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler, organik büyüme ilkelerini uygulamak için kullanılabilir ve aynı zamanda tasarımcılar basit bir kural setiyle başlayarak, hızlı ve kolay bir şekilde farklı form ve varyasyonları denetleyebilmektedir (Serrato-Combe, 2005).

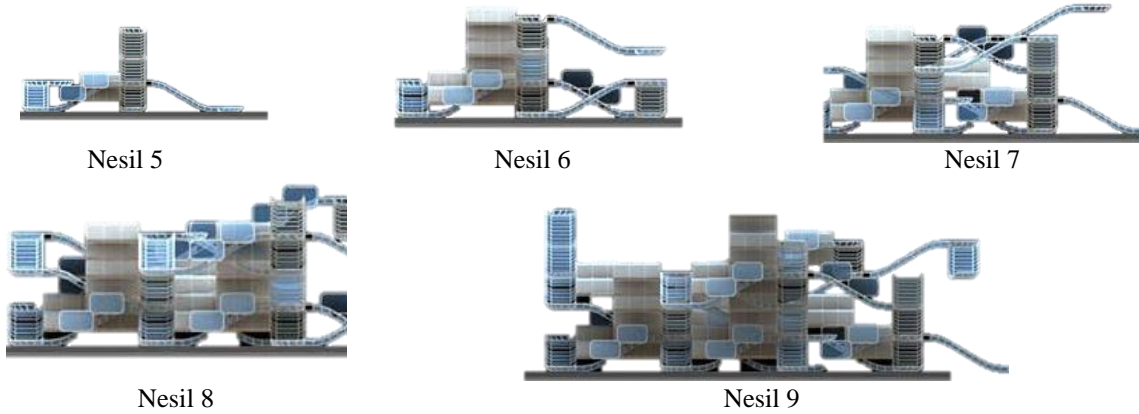
Literatürde mimaride kullanımını araştıran çok az çalışmanın olduğu görülmüştür. Bunlar arasında Henriques ve arkadaşları, L-sistemler kullanılarak üretilen fiziksel olarak

uygulanabileceği savunulan ağaç benzeri bir yapı önermiştir (Şekil 3.4) (Henriques, Bueno ve Lenz, 2020).



Şekil 3.4. Henriqueş ve arkadaşlarının L-sistem ile yaptığı çalışma

Hansmeyer, modülerlik çalışmalarıyla (Şekil 3.5), kaplumbağa grafiklerine farklı komutlar ekleyerek daha esnek bir yöntem sağlamış ve böylece amaca yönelik uyarlanabilir mimari formlar üretilebileceğini göstermiştir (WEB-19).



Şekil 3.5. Hansmeyer'in L-sistem kullanarak ürettiği modüler mimari yapının farklı nesillerdeki görünüşleri

3.2.2. Hücresel özdevinim

Hücresel özdevinim (otomat) ilk kez 1950'lerde John von Neumann tarafından tanıtılmıştır. Von Neumann hücresel otomatların tasarımını, kompleks sistemlerin modellenmesi ve problem çözme için bir araç olarak görmüştür. Bu otomatlar, hücrelerden oluşan bir matriste çalışmaktadır ve her hücre kombinasyonu için bir kural seti bulunmaktadır. Bu kural seti,

hücrenin durumunu ve çevresindeki hücrelerin durumunu göz önünde bulundurarak, hücrenin yeni durumunu belirlemektedir. Neumann'ın 1966 tarihli çalışmasında ilk hücresel özdevinim çalışmasını ortaya koymuş, hücresel otomatların matematiksel olarak tanımlanabileceği ve programlanabileceği temel fikrini açıklamıştır (von Neumann, 1966).

Ardından John Holland ve John Hedlund, hücresel otomatlar alanında önemli çalışmalar yapmış bilim adamlarıdır. Holland (1992), hücresel otomatların genetik algoritmalar ile nasıl kullanılabilirliğini gösteren çalışmalar yapmış ve hücresel otomatların evrimsel optimizasyon yöntemleri ile nasıl kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Hedlund (1969), hücresel otomatların matematik ve fizik gibi alanlarda kullanılmasına ilişkin çalışmalarının yanı sıra, hücresel otomatların tasarımı ve kullanımı ile ilgili çalışmalar yapmıştır.

Hücresel otomatların nasıl kullanılabilirliğini ve evrimlerini nasıl modelleyebileceğini gösteren Conway, "Game of Life" (Yaşam Oyunu) adlı çalışmasını geliştirmiş Gardner de bu konuda yayınladığı yazılarla Conway'in çalışmasının bilinirliğini arttırmıştır (Gardner, 1970). Yaşam Oyunu, iki boyutlu Hücresel Özdevinim'in en bilinen uygulamalarından birini oluşturmaktadır. Yaşam oyunu yanıl komşulukların yanında diyagonal komşulukları da kullanmaktadır (Şekil 3.6) (Dinçer, 2014). Komşuluk dokuz hücreden oluşmakta ve bu hücrelerden bir tanesini diğer sekiz hücre çevrelemektedir ve komşuluk ilişkilerini yöneten kurallar bulunmaktadır. Tek boyutlu HÖ' de her eleman 0 veya 1 rakamlarıyla ya da siyah veya beyaz renkli kutucuklarla olmak üzere iki olası durumla ifade edilmektedir.

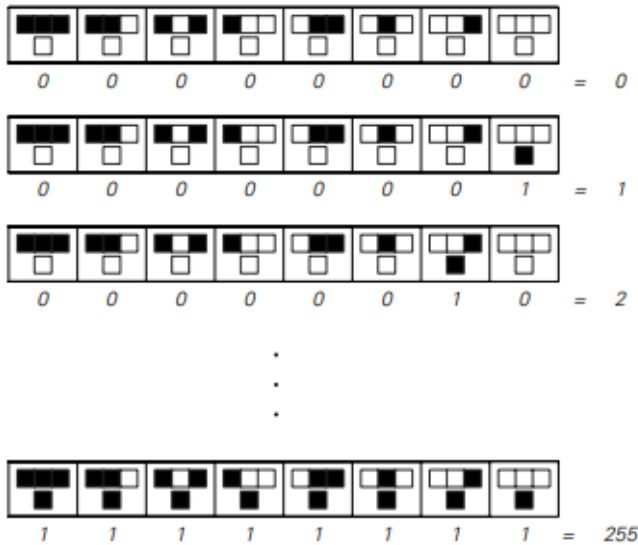


Şekil 3.6. Conway'in Yaşam Oyunu kuralları

Stephen Wolfram'ın "A New Kind of Science" adlı kitabı ise, hücresel otomatlar konusunda en kapsamlı eserlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bunun sebebi Wolfram, hücresel otomatlar için ayrıntılı bir sınıflandırma sistemi sunmakta ve hücresel otomatların davranışının çeşitliliğini gösteren kuralların çok sayıda örneğini sunmaktadır. Ayrıca sonuçların nasıl elde edildiğini anlatmakta, okuyucuların sonuçları tekrar etmelerine ve hücresel otomatların özelliklerini daha fazla incelemelerine olanak tanımaktadır (Wolfram, 2002).

Kitapta, hücresel otomatlar tek, 2 veya 3 boyutlu bir ızgara düzeninde, ortogonal ızgaralarda düzenlenmiş, sınırlı sayıda renk veya sayı durumundan oluşan basit bir çalışma prensibine sahip olan bir hücre topluluğu olarak tanımlanmıştır. Bu hücreler, hücreler arasındaki etkileşim kurallarına göre, belirli bir zaman aralığı içinde değişebilmektedir. Bu hücrelerin değişimleri, belirli bir kural kümesi tarafından yönetilmekte ve hücreler arasındaki etkileşimlerin evrimini modellemek için kullanılmaktadır.

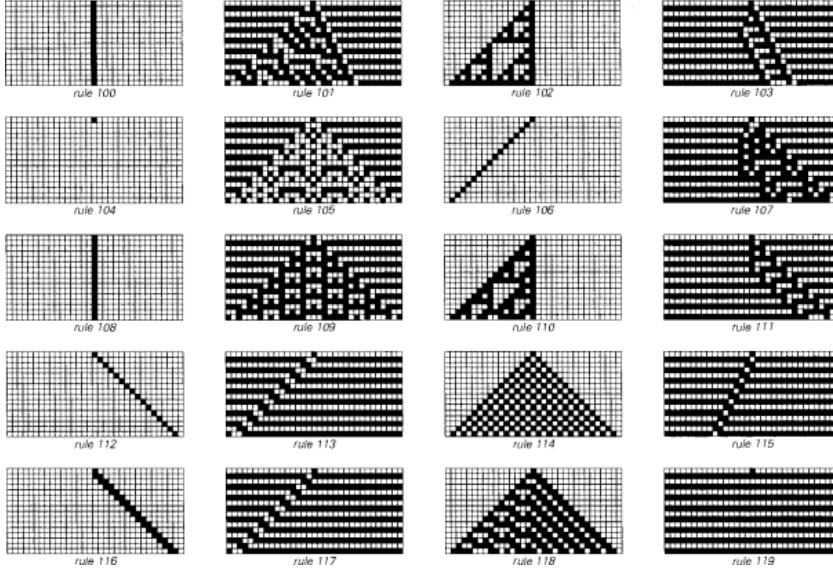
Kitaba göre bir kural, hücrenin durumunun komşu hücrelerin durumlarına göre nasıl değişeceğini belirleyen bir kurallar setidir. Kural, genellikle bir sayı olarak temsil edilmekte, bu sayıda her bit, komşu hücrelerin durumlarının bir kombinasyonunu ifade etmektedir. Bir kural 8 bit olarak temsil edilmekte, bu $2^8 = 256$ farklı durumunun olduğunu göstermektedir (Şekil 3.7). Örnek kural dizileri görsel ifadeleri ile Şekil 3.8'de yer almaktadır. Şekil 3.9'da Hücresel özdevinim kurallarının tekrar etmesi ile oluşan grafikler yer almaktadır.



Şekil 3.7. Sekiz bitlik hücre kombinasyonlarından oluşan 256 olası hücresel özdevinim kuralı dizisi

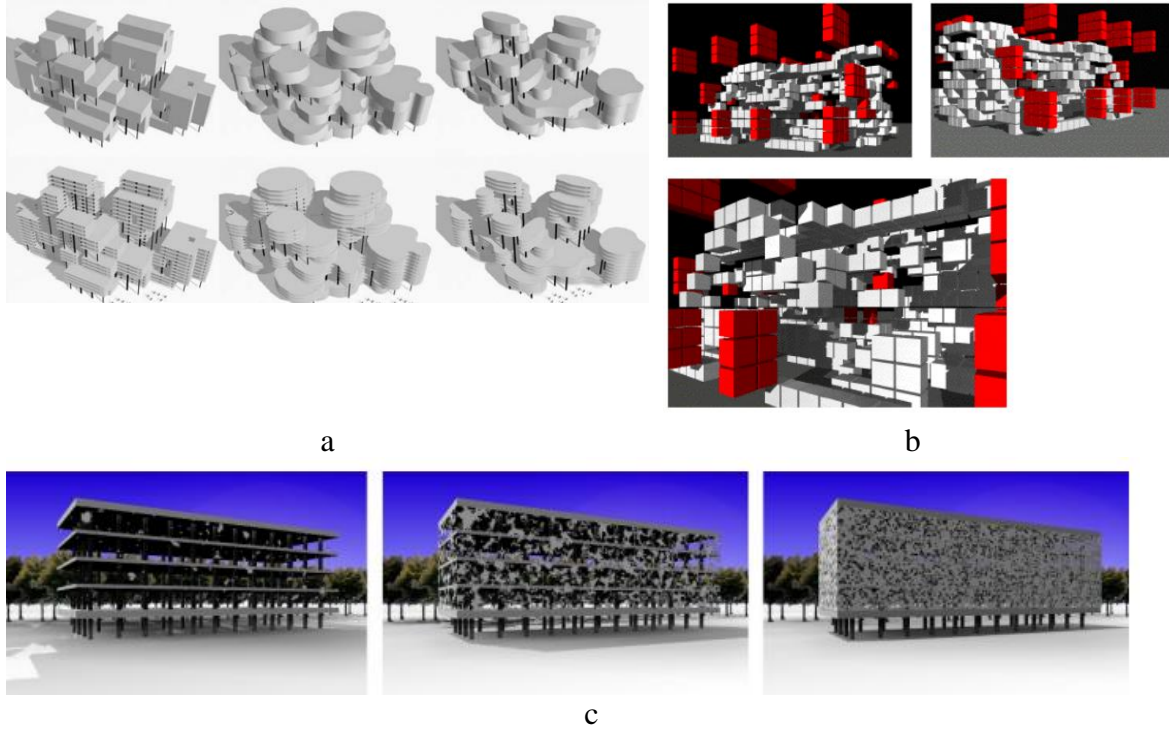


Şekil 3.8. Örnek kural dizileri (soldan sağa 250, 90, 30 ve 110 kuralları)



Şekil 3.9. Hüresel özdevinim kurallarının tekrar etmesi ile oluşan grafikler

Mimarlık alanında hüresel otomatların kullanımına dair çeşitli örnekler bulunmaktadır (Şekil 3.10). Krawczyk (2002), hüresel özdevinim yönetimini kullanarak ilginç ve benzersiz mimari formlar oluşturmayı hedeflemiştir. Bu bağlamda, ilk katın başlangıç hücre modelini oluşturduğu, hücrelerin yatay olarak bağlandığı, dikey destek eklendiği ve hücrelerin komşularına göre ölçeklendirilerek üst üste eklendiği 3 boyutlu bir yöntem sunmuştur. Benzer şekilde Coates, Healy, Lamb ve Voon (1996) de HÖ kullanarak üç boyutlu bir üretim yöntemi geliştirmiştir. Doğadaki üretime benzeten Coates, başlangıç hücre yapısının gelişimini sağlayan sayısal kuralları genetik bilgiye benzer amaçta olduğunu savunmuştur. Zawidzki (2009) ise iki boyutlu bir yöntem sunmuş, Wolfram'ın kurallarını kullanarak hüresel özdevinim yöntemi ile gün ışığı gereksinimlerine uygun cephe tasarım stratejileri geliştirmiştir.



Şekil 3.10. HÖ ile yapılan mimari form çalışma örnekleri; (a) Krawczyk'in, çalışmasında ürettiği formlar, (b) Coates'in 3 boyutlu mimari form bulma çalışması, (c) Zawidzki'nin cephe için form bulmada iki boyutlu tasarım çalışması

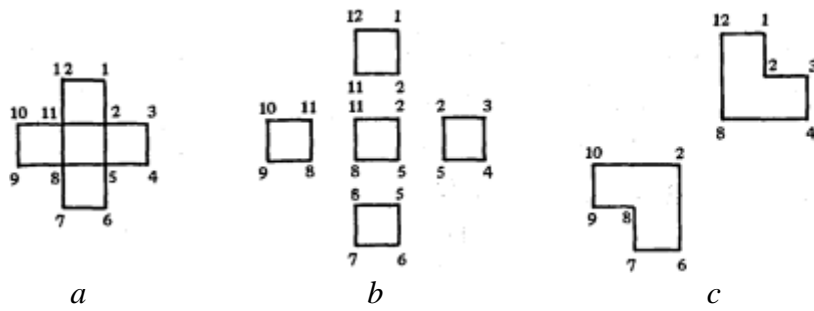
3.2.3. Şekil gramerleri

Gramer ilk olarak Stiny ve Gips'in 1971 tarihli makalesinde tanıtılmıştır. Gramerin çıkış noktası sözcükler ve sözcükleri bir araya getiren kurallardan oluşan dil bilgisi sistemini biçimsel kompozisyonlar oluşturmak için kullanmak olmuştur. Dil bilgisine benzer olarak sözcüklerin yerini iki veya üç boyutlu şekiller almakta ve şekilleri bir araya getiren veya onları dönüştüren kurallar özyinelemeli bir süreç sonunda tasarımı oluşturmaktadır. Hedef, bilgisayar destekli matematiksel bir estetiğin geliştirilmesi olmuştur. Bu bağlamda hem iki (resim) hem üç boyutlu (heykel) nesnelerin üretken bir yöntem kullanılarak yüksek karmaşıklığa sahip olması ile iyi birer sanat eseri olacağı düşüncesi benimsenmiştir (Stiny and Gips, 1971).

Stiny (1976), şekil gramerlerini biçim biliminin geliştirilmesi için temel bir araştırma aracı olarak görmüştür. Mimaride kullanımı bakımından kat planlarının düzenlenmesi için iki boyutlu; binayı oluşturan elemanların düzenlenmesi için üç boyutlu şekil gramerlerin kullanılmasını önermiştir.

Stiny, şekil gramerinin kullanımına yönelik pratikteki potansiyelini görmek amacıyla 1976 tarihli makalesinde analiz ve sentez olmak üzere iki yöntem sunmuştur.

İlk yöntem olan analiz yöntemi mevcut bir tasarımın alt şekillere ayrıştırılarak bütünü tekrar oluşturacak olan uzamsal kuralları keşfetmeyi ve tasarımın şekil dil bilgisini çözümlmeyi içerir. Bu durumda bir kompozisyonun birden çok ayrıştırma yöntemi olabilmektedir. Her ayrıştırma, biçimi tanımlayan farklı bir yol anlamına gelmektedir. (Stiny, 1976). Bu yöntemi ifade eden örnek çalışma Şekil 3.11’de yer almaktadır.



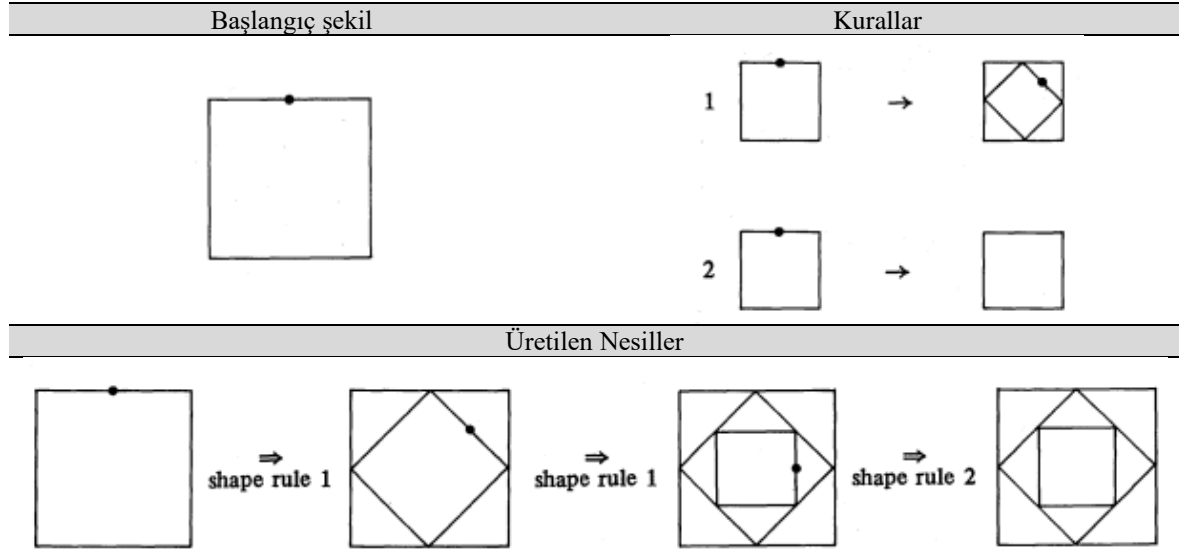
Şekil 3.11. (a) analiz edilerek (b) ve (c) olmak üzere iki farklı şekilde ayrıştırılmıştır

Bu yöntem, geçmiş ve çağdaş mimari tasarım üslupları ve akımlarının dillerini anlamak için kullanılabilir. Ancak dikkat edilmesi gereken husus, stilin açığa çıkarılan kurallar, sadece o stilin bir örneğini üretmek için değil; aynı zamanda mimari açıdan işlevsel olmasını da sağlamalıdır (Stiny ve Mitchell, 1980). Bu bağlamda analiz yöntemi, mimari tasarım dillerini anlamak için araştırma literatüründe önemli bir yer edinmiştir (Knight, 1994).

İkinci yöntem olan sentez ise sıfırdan tanımlanan bir başlangıç şeklinin yeni bir tasarım dili oluşturularak adım adım kuralların uygulanması ile şekillerin türetilmesi yöntemidir. Analiz yöntemi ile mimari akımları anlama ve benzer tasarımlar üretmek amaçlanırken; sentez yöntemi yeni ve özgün tasarım dilleri oluşturmak için kullanılmaktadır (T. W. Knight, 1994).

Şekil gramerinin basit bir tanımı ve örneği Stiny, (1980) tarafından verilmiştir. Bir gramer dört unsurdan meydana gelmektedir. Bunlar şekiller, semboller, şekil kuralları ve etiketli şekillerdir. Örnek olarak tüm kenarları eşit olan bir geometrik şekil başlangıç şekil olarak tanımlanmış, şeklin hangi yönde dönüşeceğinin kararını verebilmek için bir kenar üzerinde nokta (sembol) ile etiketleme yapılmıştır (Şekil 3.12). Şekillerin her biri kurallar uygulanarak ilk şekilden türetilmekte ve alt şekillerden oluşmaktadır. Kuralın sağ tarafındaki

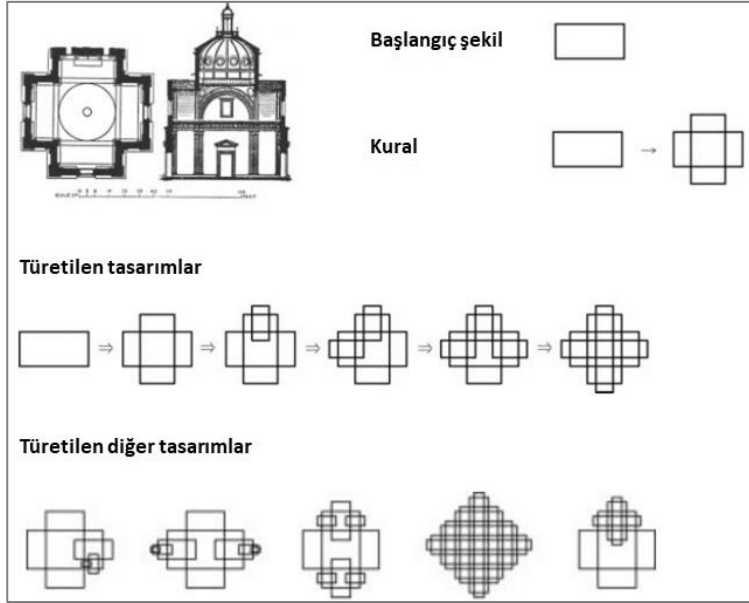
şeklin gramerde yer alabilmesi için sol tarafındaki etiketli şekille eşleşecek şekli bulması gerekir. İki kural tanımlanmıştır. İlk şekil kuralı, 1. adımda ilk şekle ve 2. adımda elde edilen etiketli şekle uygulanmıştır. Bir şekle kural uygulandığında şekil tamamen dönüşerek önceki silinir ve yeni bir nesil üretilir.



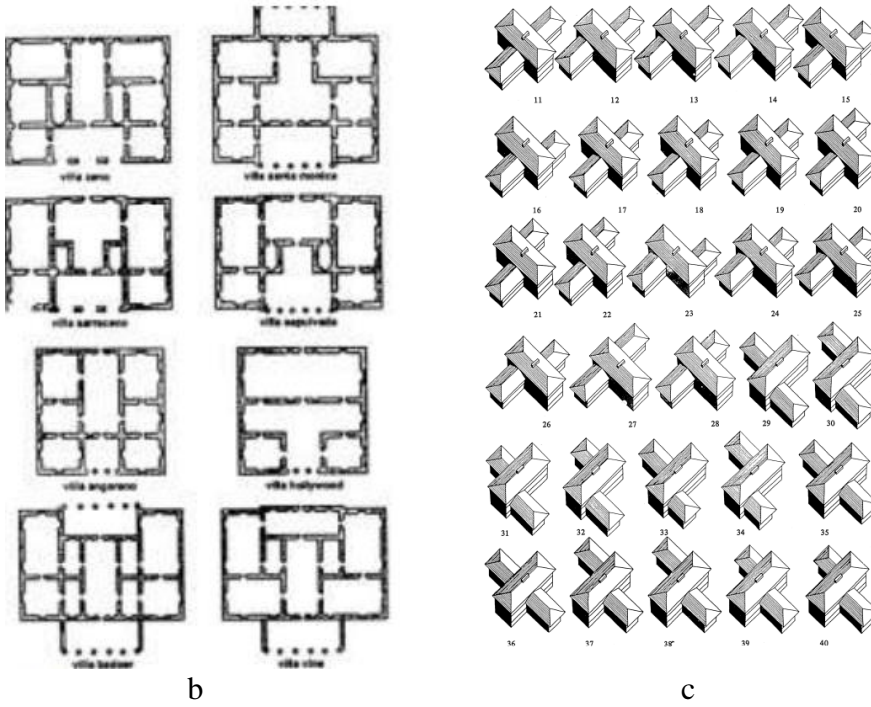
Şekil 3.12. Şekil gramerini kullanarak bir şeklin üretilmesi

Burada deterministik tekrarlayan görevler otomatikleştirilerek kullanıcı, sıradan teknik kuralları uygulamaktan kurtulabilir (Liew, 2002).

Mimari form bulmada şekil gramerlerinin kullanıldığı araştırmalara ulaşılmıştır (Şekil 3.13). İlk mimari şekil grameri, Palladian villa planları için yapılmıştır. Gramer ile üretilen tasarımlar orijinal Palladian tasarımları ve Palladio'nun tarzındaki yeni varsayımsal tasarımları içermektedir (Stiny ve Mitchell, 1980). Bir şekil gramerinin neye benzediğini ve nasıl çalıştığını gösteren başka bir çalışmada, kural, ayrıntılı bir Yunan haçı oluşturmak için yinelemeli olarak uygulanmıştır (T. Knight ve Stiny, 2001), Koning ve Eizenberg (1981), Wright'ın 11 tasarımını inceleyerek Prairie tarzı evler için parametrik şekil grameri geliştirmiştir. Bu gramer ile çok sayıda blok düzeninde alternatif yapı tasarlamaşlardır.



a



Şekil 3.13. Şekil gramerleri ile yapılan çalışmalar: (a) Knight'ın Yunan haçı tasarımları, (b) Palladian villa planları, (c) Wright'ın Prairie tarzı evleri.

3.2.4. Sürü zekâsı algoritması

Sürü zekâsı, kolektif davranışın oluşmasında kendi kendini organize eden etmenlerin merkezi olmayan yerel etkileşimini tanımlamaktadır. Bu davranış doğal dünyada balık, kuş veya böcek sürülerinde olduğu gibi belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir (Snooks, 2014).

Araştırmacıların bu yöndeki ilgisinin giderek artıyor olmasının sebebi, sürü içindeki etkileşimlerin sosyal hayvanların çeşitli hedeflerine ulaşmasına nasıl yardımcı olduğunu anlayarak *merkezi kontrolü olmayan yapay sistemler* geliştirmeyi hedeflemektir. Çünkü merkezi bir denetleyicinin kontrolünde olan bir sistemde merkezin alacağı bir hasar tüm sistemi etkileyen büyük zararlara sebep olabilmektedir (Bonabeau, Dorigo, Theraulaz and Theraulaz, 1999).

Bu sistemler genel olarak dört özelliğe sahip olmaktadır:

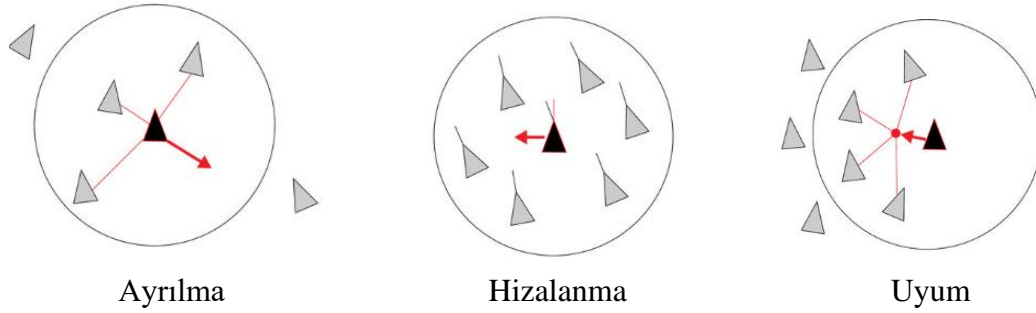
1. Etmenler otonomdur: Sistem merkezi otoritelerce yönetilmemekte kendi kendine koordine olmaktadır.
2. Etmenler birbirlerini etkilerler: her bir etmenin kararlarının sonucu diğer etmenlerin davranışlarını etkilemektedir.
3. Etmenler kurallara sahiptirler: her etmenin davranışı kurallar ile sınırlandırılmaktadır. Kurallar böylelikle etmenlerin davranışsal kararlarının belirleyicisidir.
4. Etmenler uyarlanabilir ve geriye dönüktür: etmenler en verimli eylemi bulmak için hesaplama yapmak yerine taklit ederek, kopyalayarak veya öğrenerek uyum sağlamaktadır (Macy ve Willer, 2002).

Hesaplamalı çok etmenli sistemler ilk olarak 1940'larda hücreli otomatlar biçiminde John von Neumann tarafından geliştirildi ve 1970'lerde John Conway'in Game of Life'ında daha da geliştirilmiştir (Snooks, 2014). Ardından Reynolds (1987), davranışsal simülasyon modelleri geliştirerek sürü sistemlerinin hesaplamalı anlayışına önemli bir katkı yapmıştır. Bu davranışı bilgisayar ortamında matematiksel olarak simüle etmek amacıyla algoritmik bir yaklaşım geliştirmiştir. Reynolds'ın modelindeki her etmen, üç temel davranış kuralına uymaktadır (Şekil 3.14). Bunlar:

Ayrılma: Etmenin, yakında bulunan diğer etmenlerle arasında belirli bir mesafeyi koruma yeteneği vermektedir. Bu, etmenlerin birbirine çok yakın hareket etmesini ve dolayısıyla kalabalıklaşmasını önlemektedir.

Hizalanma: Etmenin yakındaki diğer etmenlerle hizalama yeteneği verir. Hizalama için yönlendirme, yakınındaki tüm etmenler bulunarak ve “yön” vektörlerinin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

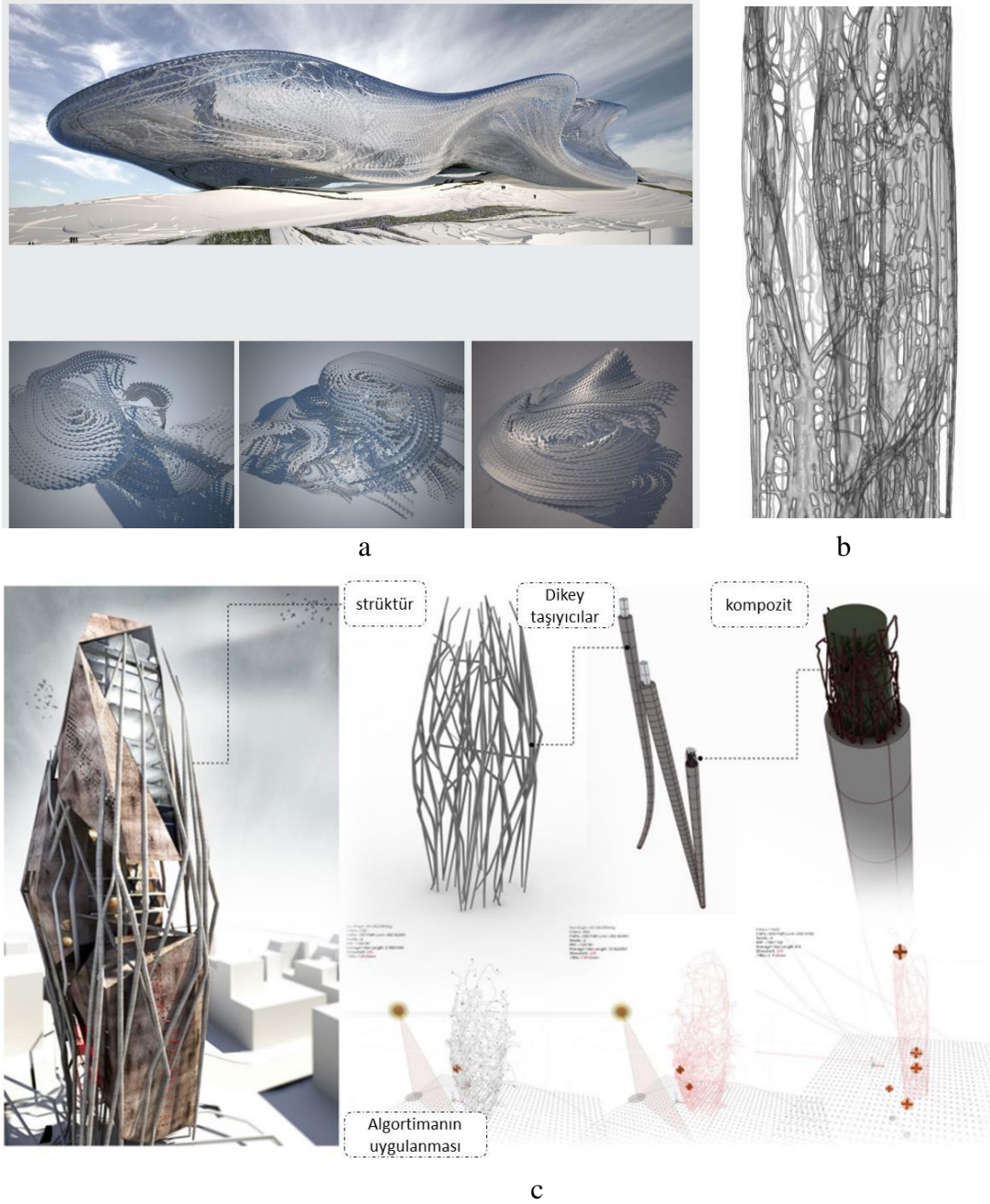
Uyum: Bir etmene, bir gruba yaklaşma ve bir grup oluşturma yeteneği sağlamaktadır. Uyum için yönlendirme, yakınındaki tüm etmenlerin konumunu bularak ve ortalama konumunu hesaplayarak sağlanmaktadır.



Şekil 3.14. Sürü zekâsının üç temel ilkesi: ayrılma, hizalanma ve uyum

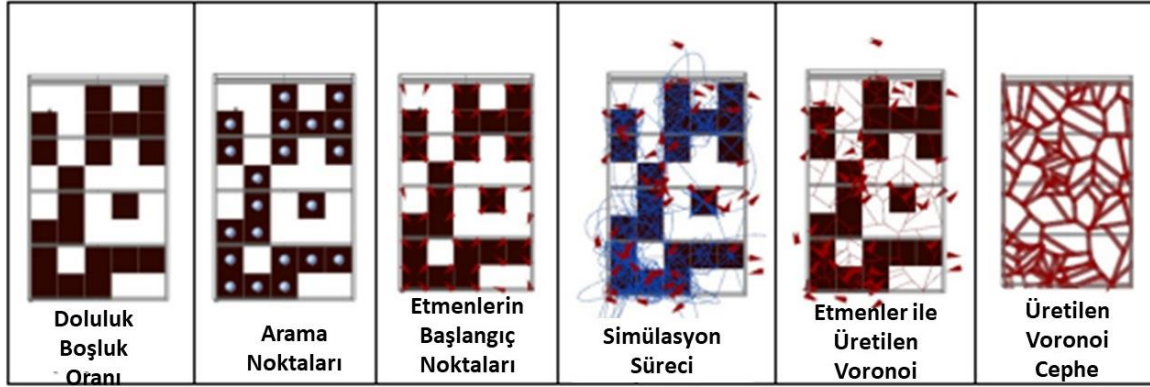
Mimaride form bulma amacıyla kullanılmasına yönelik çalışmalara ulaşılmıştır (Şekil 3.15). Bu algoritmayı kullanarak çok sayıda tasarımlar üreten Snooks (2014), bir yarışma projesi için tasarladığı Çin ulusal sanat müzesi çalışmasında, bulutların dağınık formunu yakalamak, akışkan dinamiklerini taklit etmek amacıyla sürü algoritmasını kullanmıştır. Başka bir çalışması olan Fibrous Tower 25 projesinde tasarladığı yapı, iplerden oluşmaktadır. Genel olarak yapı, yüzeyler, baskın kütleler ve daha zayıf yatay bağlantılar gibi hiyerarşik özellikler oluşturan iplerin etkileşimi ile oluşmaktadır. Bu şekilde, sürü algoritması yöntemi ile yapıyı oluşturan kabuk ve taşıyıcı elemanlar gibi mimari roller arasındaki ayrımın bulanıklığı sağlanmıştır.

Sürü algoritması ile form denemeleri yapan başka bir araştırmacı olan Tsiliakos, (2012) çalışmasında çok katlı bir binanın genel formunun bir bilgisayar sistemi tarafından analiz edilerek sağlanan yapısal elemanların aynı algoritma ile mikro ölçekte yeniden tasarlanmasını önermiştir.



Şekil 3.15. Sürü zekâsı ile üretilen mimari formlar (a) Snooks'a ait Çin ulusal sanat müzesi tasarımı, (b) Snooks'a ait Fibrous Tower tasarım projesi, (c) Tsiliakos'a ait yüksek yapı tasarımı.

Ağırbaş, (2019) ise sürü zekâsı ve Voronoi kullanarak cephe tasarımında karmaşık geometriler üretmiştir. Cephe üzerinde belirlenen doluluk ve boşluğa göre etmenlerin konumları belirlenmiştir. Simülasyon sırasında, etmenlerin hareketi ile farklı Voronoi diyagramları oluşturulur. Ardından oluşan desen, gün ışığı simülasyonunda test edilmiş, gün ışığı bağlamında en verimli desene ulaşılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Sürü zekâsı yöntemi ile Voronoi cephe üretimi

3.3. Üretken Sistemlerin Karşılaştırılması

Açıklanan dört sistem Singh and Gu (2012)'nin çalışması temel alınarak bazı faktörler üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu faktörler; bileşenler, kuralın çalışma prensibi, üretilen formun niteliği, avantajlı olduğu alanlar ve tasarımcı için dezavantajlar olup, Çizelge 3.3'de yer almaktadır.

Çizelge 3.3. Singh and Gu (2012)'nin çalışmasından uyarlanan üretken sistemler karşılaştırma tablosu

	L-sistemler	Hücresel özdevinim	Şekil gramerleri	Sürü zekâsı
Bileşenler	İlk semboller, kurallar	Izgara, Hücreler, Kurallar	Başlangıç şekli, şekil kuralları, son şekiller, operatörler	Etmenler, kurallar, ortam
Kuralın çalışma prensibi	Aynı anda birçok kural uygulanır	Eşzamanlı (paralel) hesaplama süreci	Genellikle, her adımda bir kural çalışır	Genellikle, bir kural çalışır
Üretilen formun niteliği	Tekrarlayan, organik.	Geometrik, öngörülemeyen, normatif, bağlama uygun, genellikle bağlama uyum	Tekrarlayan, geometrik.	Öngörülemeyen, normatif
Avantajlı olduğu alanlar	Yollar, araziler, dokular ve doğal olarak gelişen, organik olma eğiliminde olan formlar.	Kentsel blok tasarımı, planlama/imar ve kentsel tasarım.	Mimari stiller, nesnelere ve desenler.	Trafik akışı, yürüyüş yolları, kamusal alan, bazı geometrik tasarımlar
Tasarımcı için dezavantajlar	Öngörülemezdir. Geri izleme gerektirir.	Hücrelerin nihai şekil üzerindeki durumunu belirlemek her adımda zorlaşır.	Öngörülemezdir. Ortaya çıkan şekil için geri izleme, yeniden ölçeklendirme ve kuralı yeniden tanımlama gerektirir.	Her adımda giderek karmaşıklaşır.

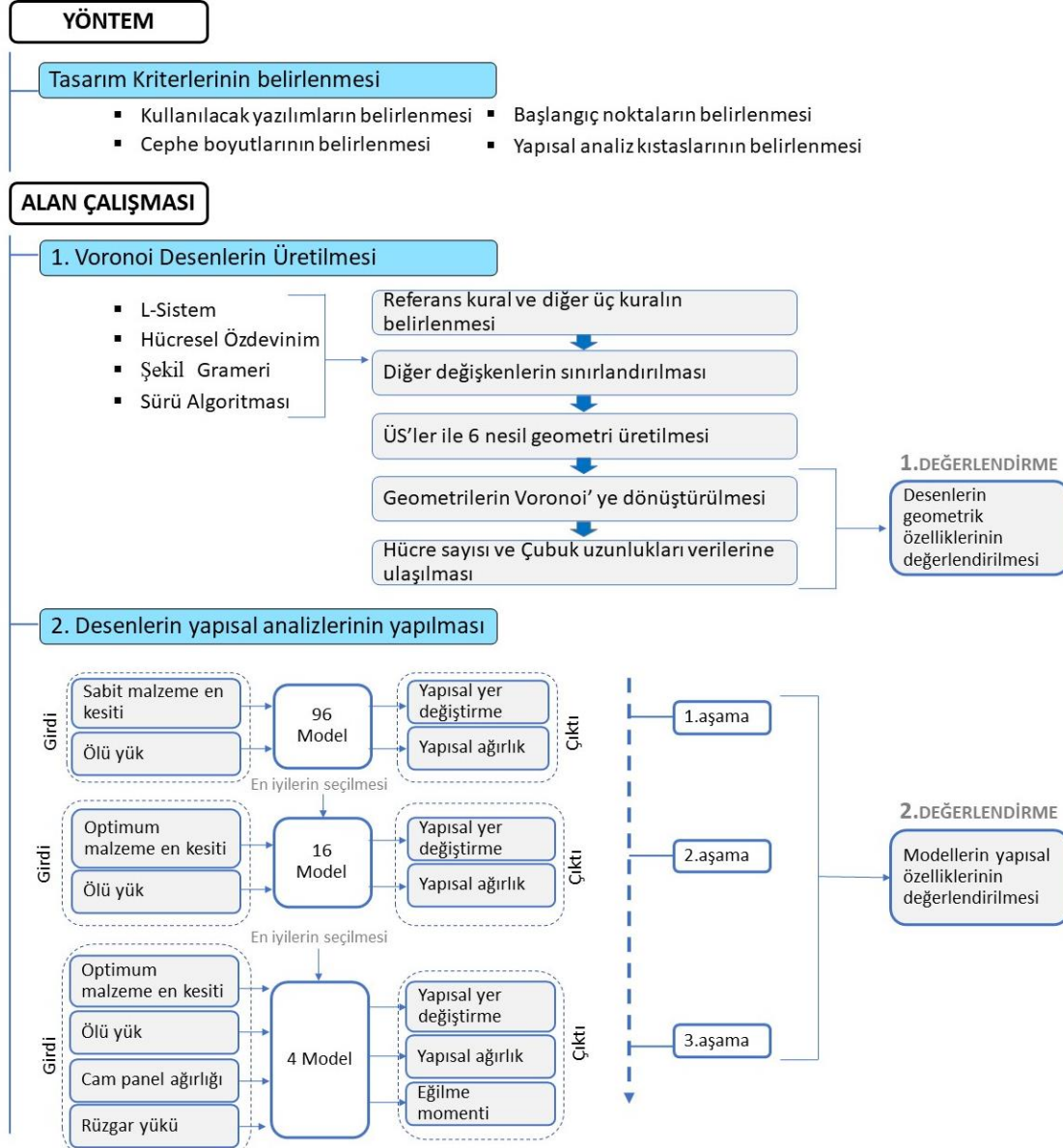
- Tüm sistemler için kısıtlamaların sayısı ne kadar fazlaysa, keşfetme ve öngörülemeyen şekillerin ortaya çıkma durumu o kadar az olmaktadır. Bu durum HÖ için diğer sistemlere kıyasla daha az olmaktadır.
- Uygulama bakımından değerlendirildiğinde ŞG ile yapılan çalışmalar çoğunlukla manuel olup, kurallarının geliştirilmesi zaman alıcı ve yineleyici bir süreç olmaktadır. LS de benzer şekilde yineleyici özelliktedir. ŞG ve LS forma dayalı tasarım üretirken kademeli olarak oluşturulma yönünden birbirine benzerdir. HÖ, yüksek derecede komşuluk durumu olmadığına, hücre durumlarını tanımlama ve uygulama konusunda kullanımı kolay olmaktadır. SZ için farklı seviyelerde etmen otomasyonu ile farklı sonuçlar alınabilmektedir. Bu sebeple öngörülemezlik diğer sistemlere kıyasla SZ’de daha fazla olmaktadır.
- Farklı avantajlara sahip bu yöntemler, farklı tasarım amaçları için istenen sonuçları vermektedir. ŞG ve LS, tekrarlardan ve işlemlerden ortaya çıkan şekiller ve desenler geliştirmek için daha uygun olmaktadır. Daha özel değerlendirildiğinde LS, yollar, araziler, dokular ve doğal olarak gelişen, organik olma eğiliminde olan formlar için; HÖ, kentsel blok tasarımı, planlama/imar ve kentsel tasarım için; ŞG, mimari stiller, nesnelere ve desenler için; SZ, trafik akışı, yürüyüş yolları, kamusal alan, bazı geometrik tasarımlar için kullanımı avantajlı olmaktadır.
- Dezavantajları için değerlendirildiğinde, ŞG ve LS genellikle istenen üretim kurallarını belirlemek için yinelemeli denemeler ve geri izleme (backtracking) gerektirmektedir. Geri izleme, uygun sonuca ulaşmak için geriye doğru giderek farklı seçenekleri değerlendirme yöntemidir. HÖ sisteminde hücrelerin nihai şekil üzerindeki durumunu belirlemek her adımda zorlaşmaktadır. SZ sisteminde ise her adımda nihai form giderek karmaşıklaşmaktadır.

4. ÇALIŞMA YÖNTEMİ

Mimari tasarım, bu algoritmik yapının sağladığı çoklu hiyerarşiler ve yüksek düzeyde karmaşıklığa sahip geometrilerin potansiyellerinden etkilenmektedir. Bu çalışmada üretilmiş olan karmaşık desenlere sahip yapı elemanlarını tasarlamak ve modellemek, geleneksel yöntemlerle yapılması kolay bir iş olmamaktadır. Bir tasarımcısının bu karmaşık geometrileri düşünmesi için bile, bu geometrileri simüle edebilen ve özelliklerini kontrol edebilen uygun araçlara, özellikle yazılımlara ihtiyacı olmaktadır.

ÜS'ler ile yüzlerce proje varyasyonu oluşturmak mümkün olmaktadır. Mimarlar bundan faydalanarak mevcut formların dışına çıkabilmek ve yeni formlar keşfetmek için farklı üretken sistemler kullanmaktadır. Detaylı açıklamaları bölüm 3.2'de açıklanmıştır. Alan çalışmasında üretken sistemlerden L-Sistemler, Hücresel Özdevinim, Sekil Gramerleri ve Sürü Zekâsı olmak üzere dört temel algoritma kullanılmıştır. Bu sistemler ile üretilen Voronoi desenleri karşılaştırabilmek adına yapılan alan çalışmasının sürecine dair iş akışı şekil 4.1'de ifade edilmiştir. İlk olarak hazırlık aşamasında kullanılacak yazılımlar, cephe boyutları, ÜS'lere ait noktaların cephe üzerinde çoğalacağı başlangıç noktalar ve yapısal analiz kıstasları olan mesnet, yük ve malzeme özellikler belirlenmiş olup bunlar tüm sistemler için ortaktır. Ardından birinci aşamada ilk olarak ÜS'lere ait kurallar belirlenmiştir. Üretilen desenlerin benzer hücre sayıları ve çubuk uzunluklarına sahip olması için ÜS'leri oluşturan diğer değişkenler sınırlandırılmıştır. Belirlenen ölçütler ile özyineleme sayısı artırılarak desenler üretilmiştir. Bu desenlerin geometrik düzenlerine ait görsellere, hücre sayıları ve toplam çubuk uzunlukları verilerine ulaşılmıştır.

İkinci aşamada, üretilen Voronoi desenleri yapısal elemanlara dönüştürülmüştür. Bunun için malzeme, mesnet ve yük bilgilerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu bilgilerle zenginleşen algoritma, yapısal analiz için hazır duruma gelmektedir. Yapısal değerlendirme süreci kendi içinde üç aşamadan oluşmaktadır. Her aşamada elde edilen verilere göre en iyi modeller bir sonraki analizde farklı girdilerle performansları incelenmiştir. Analiz çıktıları olan yapısal yer değiştirme, yapı ağırlığı ve eğilme momentleri değerleri ÜS'leri karşılaştırmak için kullanılmıştır.

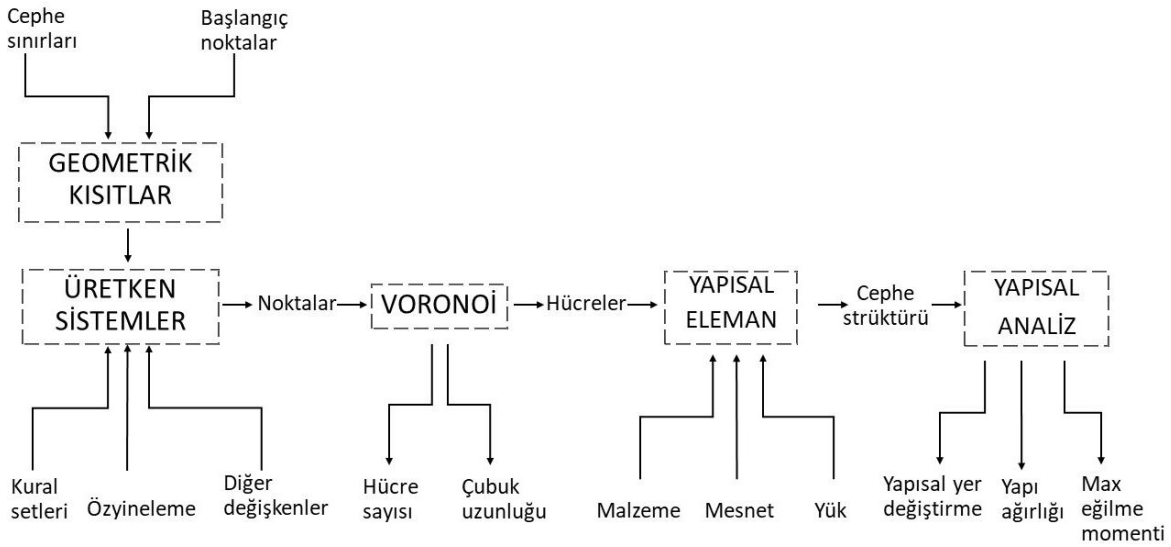


Şekil 4.1. Alan çalışmasına ait akış şeması

Cephe strüktürünü meydana getirmek amacıyla verilen geometri kararlarının ardından, bu bilgileri bilgisayar ortamında birbiriyle ilişkilendirmek ve bir ilişkiler ağını senaryo etmek gerekmektedir. Bu süreç, bir algoritmik tasarım yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Geometrinin algoritmik tanımlanması ve parametreler ile kısıtlanması biçimsel üretim sistemini meydana getirmiştir.

Algoritmanın oluşturulması

Çalışmada kullanılan tasarım yönteminde Şekil 4.2'de ifade edildiği gibi; geometrik formların üretilmesi, bunların yapısal elemanlara dönüşümü ve yapısal davranışlarının simüle edilmesi işlemlerini sağlayan algoritma yalnızca bir dijital platform kullanılarak oluşturulmuştur.



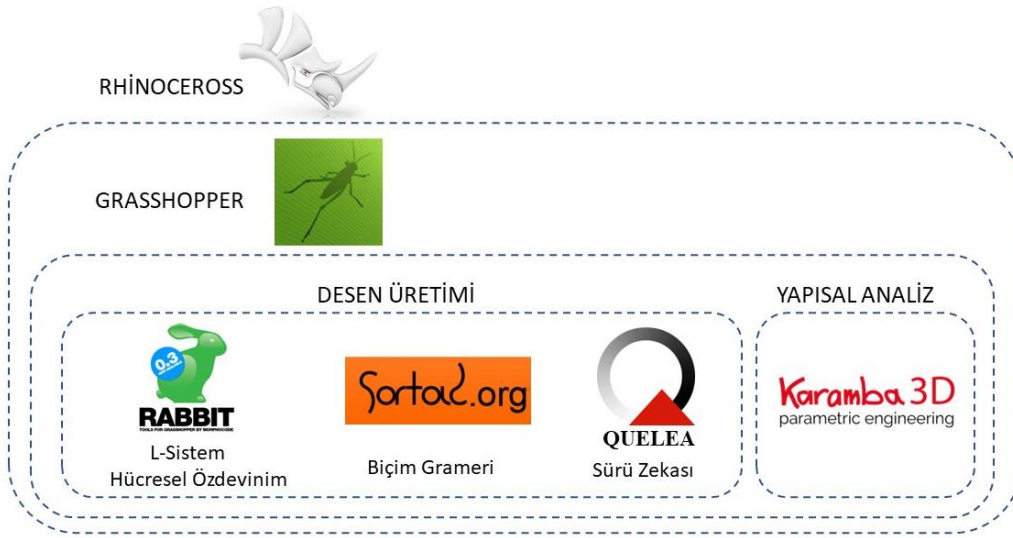
Şekil 4.2. Algoritmanın girdi ve çıktılarını ifade eden şema

Çalışmada kullanılan modelleme platformu, tasarımcılar, mimarlar ve öğrenciler arasında giderek daha fazla tercih edilen bir 3B modelleme aracı olan Rhino'dur. Komut dosyası oluşturma işlemi, Rhino içerisine entegre edilmiş ücretsiz algoritma düzenleme aracı olan Grasshopper ile gerçekleştirilmiştir. Popüler ve gelişmiş algoritmik modelleme aracı olan Grasshopper, Robert McNeel & Associates'te David Rutten tarafından geliştirilen bir Rhinoceros eklentisidir.

Üretken algoritmalar kullanarak yeni şekiller keşfeden tasarımcılar için Grasshopper, Rhino'nun 3 boyutlu modelleme araçlarıyla bağlantılı çalışan grafik algoritma düzenleyicisidir. Grasshopper, görsel bir programlama dili kullandığından, temel programlama veya kodlama bilgisi gerektirmemektedir; bu da kullanımını oldukça sezgisel hale getirmektedir (WEB-20).

Grasshopper, Rhino programı içerisinde çalışmakla birlikte, bu programa ait geometriyi kullanmaktadır; ancak kendi arayüz penceresine sahiptir. İçerisinde barınan ve birtakım görevleri yerine getiren bileşenler Grasshopper kanvasına sürüklenerek bırakılmakta ve birbirlerine bağlanmaktadır. Kullanımı kolay olsa da tasarımcı istediği sonucu elde etmek için bir tasarım senaryosu geliştirmesi gerekmektedir.

Grasshopper ayrıca, üretken sistemleri tasarımda yer vermeyi kolaylaştıran hazır kodlar barındıran çeşitli açık kaynaklı eklentiler sunmaktadır. Bu eklentiler, Grasshopper yazılımının kendi teknolojisinin gelişimini hızlandırmayı sağlayan üçüncü taraf uygulamalardır. Çalışmada farklı eklentiler kullanılmıştır. Bunlar; L sistem ve hücresel özdevinim için Rabbit, şekil gramerleri için SortalGI, sürü zekâsı için Quelea ve son olarak yapısal analizler için Karamba eklentileridir. Kullanılan yazılımların hiyerarşik sistemi Şekil 4.3'de ifade edildiği üzere Grasshopper Rhino içerisinde çalışan bir eklenti olup, Rabbit, SortalGI, Quelea ve Karamba yazılımları Grasshopper içerisine yüklenen eklentilerdir.



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan programlar ve hiyerarşik yapısını ifade eden şema

Rabbit, hücresel özdevinim ve L sistemlerini doğrudan Rhino ve Grasshopper 3D içinde modellemeyi sağlayan 13 bileşenden oluşan bir setle birlikte gelmektedir. Desen oluşumu, kendi kendini organize etme gibi doğal olayları keşfetmenin yolunu sunmayı hedeflemektedir (WEB-21).

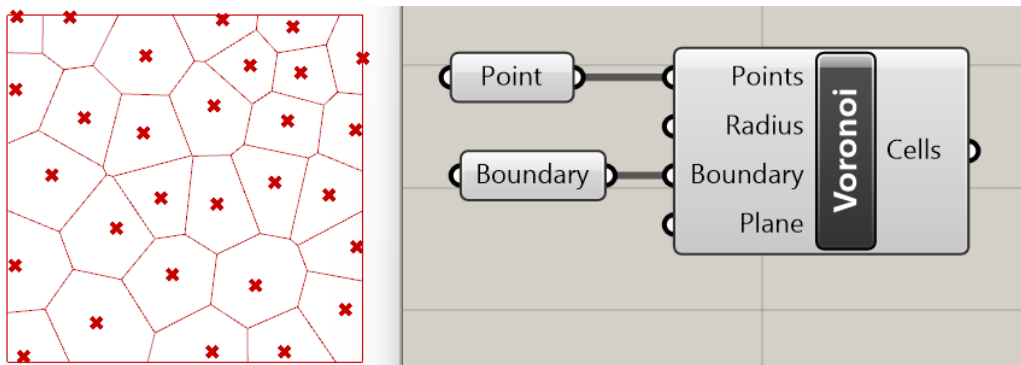
Bu eklentinin çalışmada L-sistem algoritması için kullanılma sebebi, kodu kaplumbağa grafiğine çeviren bir yorumlayıcıya sahip olmasıdır. Yorumlayıcının girdi olarak sadece harf

sembollerini kabul ettiği ve deterministik olduğu görülmüştür. Eklenti aynı zamanda hücresel özdevinim algoritması için de kullanılmıştır. Hücresel özdevinimin çalışma şekli, hücrelerin komşuluk durumlarına göre kuralların belirlenmesidir. Bu eklenti ile bu kurallar, geliştiriciler tarafından önceden belirlenmiştir, bu sayede kullanıcının 256 kural arasından seçim yapmak için kurala ait 0 veya 1 değerlerini girmesi yeterli olmaktadır.

Şekil Gramerleri için bir başlangıç şekle kurallar tanımlamayı destekleyen eklentisi kullanılmıştır. SortalGI, şekilleri temsil etmek için kullanılan temsili öğeyi ve incelenmekte olan bir şekle kural veya birden fazla kuralı eşleştirmeyi sağlayan mekanizmayı barındırmaktadır SortalGI (WEB-22).

Sürü zekâsı simülasyonunu yapmak için yazılım mühendisi Alex Fischer tarafından oluşturulan Quelea adlı bir eklenti kullanılmıştır. Bu araç, kullanıcının karmaşık simülasyonlar oluşturmasına, yapıyı analiz etmesine ve formlar oluşturmasına olanak tanımaktadır. Quelea, parçacık sistemleri ve etmenlerle deney yapmak için sezgisel bir arayüz sağlamaktadır (WEB-23).

ÜS'ler bu eklentiler aracılığıyla üretildikten sonra her sistemin son ürünü Voronoi'ye dönüştürülmek üzere Grasshopper içerisinde hazır bir bileşen olan "Voronoi" den faydalanılmıştır. Bileşeni kullanarak Voronoi oluşturmak için noktaları ve sınırı belirlemek yeterli olmaktadır (Şekil 4.4).



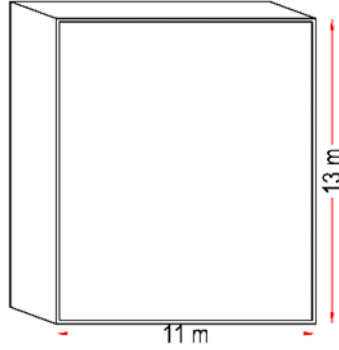
Şekil 4.4. Noktalardan Voronoi oluşturma

Cephe sınırları

Yapının geometrisini tanımlamak adına cephe ölçülerini belirlemek çalışmanın ilk adımı olmaktadır. Cephe ölçüleri için hayata geçirilmiş bir Voronoi cephe örneği olan Bristol Üniversitesi Fry Binası referans alınmış bu yapının cephesi ile benzer ölçüler kullanılmıştır. Cephe referans binada olduğu gibi ikincil yüzey özelliğindedir. Cephe yüksekliği 13 m, genişliği 11 m olarak ölçülandırılmıştır (Şekil 4.5) (WEB-24).



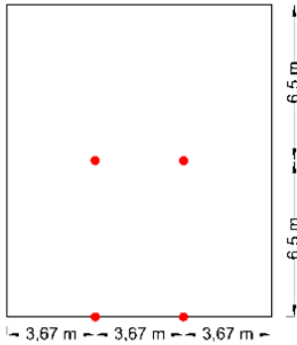
(a)



(b)

Şekil 4.5. (a) Referans cephe olan Fry binası; (b) Cephe boyutları

Boyutları belirlenmiş olan cephenin üzerinde desen yerleştirme işleminde üretken sistemler araç olarak kullanılmıştır. Üretken sistemler ile geometri üretme sürecinde cephe sınırları içerisinde belirlenen noktalardan başlatılması hedeflenmiştir. Cephe üzerinde statik olarak dengeli dağılım sağlayabilmek amacıyla birbirine eşit mesafede dört nokta konumlandırılmıştır (Şekil 4.6). Bu noktalar “başlangıç noktaları” olarak adlandırılmıştır. Başlangıç noktaları desenlerin üretilmeye başlandığı konumlardır ve her üretken sistem için ortak öğelerdir.



Şekil 4.6. Cephe sınırları içerisinde başlangıç noktalarının konumları

Bilgisayar ortamında oluşturulan algoritma bir noktadan birden çok nokta üretimini sağlamaktadır. Bu bağlamda cephe üzerinde belirlenen dört nokta algoritmaya tanıtılmaktadır. Üretken sistem parametrelerini içerecek olan bu algoritma noktaların belli kurallara göre çoğalmasını sağlamaktadır. Noktaları çoğaltma süreci üretken sistemin kuralına bağlı olarak kademeli arttırılmaktadır. Buradaki kademeli artırım özyinelemeyi ifade etmekte olup nesil olarak adlandırılmaktadır. Üretken sistemler ile desen üretimi her kural için 6 nesil ile sınırlandırılmıştır. Bunun temel sebebi sürü zekâsı dışındaki ÜS'lerin her nesilde genişliyor olmasıdır. Belirlenen başlangıç noktalarından itibaren başlayan geometri üretimi 6. nesilde cephe sınırları içinde kalmakta olup bu nesilden sonra cephenin dışına çıkmaktadır.

Yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

Voronoi ile desen üretme aşamasının ardından desenlerin yapısal davranışlarını analiz etmek amacıyla yapısal özellik kazandırılmıştır. Çalışmada yapısal analizleri gerçekleştirmek için kullanılan Karamba, Clemens Preisinger tarafından Bollinger + Grohmann Engineers iş birliğiyle geliştirilen sonlu elemanlar analiz aracıdır. Yapıların dış yükler altındaki davranışını analiz etmek için geliştirilmiştir. Yalnızca mühendisler için değil mimarlar tarafından kullanılması için de amaçlanmış olan bu sistem, geometrik modeller ve yapısal modeller arasında doğrudan bir veri akışı sağlamaktadır (Preisinger, 2013). Literatürde Karamba ile yapılan analizlerin çıktılarının doğruluğunu test etmek amacıyla yapının aynı şekilde sap2000 ile modellenerek değerlerin karşılaştırıldığı çalışmalar mevcuttur (Wallin ve Wasberg, 2016); (Khoraskani, Kazemi and Tahsildoost, 2018). Bu çalışmalara göre sap2000 ile benzer değerlere ulaşılmış buna göre Karamba'nın yapısal değerlendirme yeteneklerinin yeterince iyi olduğu tespit edilmiştir.

Voronoi hücreleri Karamba'da belirli bileşenler üzerinden ("line to beam" ve "mesh to shell") yapısal elemana dönüştürüldükten sonra gerekli tüm bilgiler parametre grupları halinde oluşturulmuştur. Bu parametre grupları ayrı başlıklar altında incelenecek olup üç adettir. Bunlar: Mesnet, yük ve malzemedir.

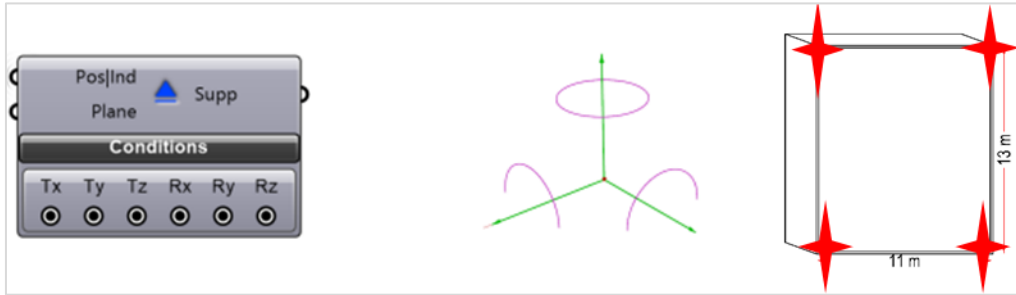
Ardından her grubun çıktısı montaj bileşeni (Assemble Model) ile birleştirilmiş, analizleri gerçekleştiren bileşene (Analyze) bağlanmıştır. Bu sayede toplam ağırlık, yer değiştirme gibi modellerle ilgili sayısal verilere ve aynı zamanda ek bileşenler (Model View, Beam View) ile

model üzerinde deformasyonun ne derecede olduğunu anlamayı sağlayan renkli grafikler üzerinden görsel verilere ulaşılmıştır.

Mesnetler

Gerçek dünyada bir nokta X, Y ve Z'de öteleme, X, Y, Z'de dönme olmak üzere 6 farklı yönde hareket edebilmekte, bunlar Karamba'nın support bileşeninde Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, Rz olarak gösterilmektedir (Şekil 4.7). Bu altı serbestlik derecesi, yapının yüklenmesi nedeniyle bu noktaların olası hareketini temsil etmektedir. Çalışmada tasarlanan cephe hareketli olmayan özellikte olduğundan ve malzemedeki deformasyonu tespit edebilmek için mesnetler 3 dönme ve 3 öteleme yönünde sabitlenmiştir.

Üretilen cephe modellerinin binanın cephesinin tamamını kaplaması hedeflendiğinden cephenin kenar köşeleri mesnet noktaları olarak belirlenmiştir. Bunun için Karamba'da cephenin dört köşesini ifade eden konumlar "support" bileşeni ile birer destek noktası olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.7. Cephe üzerinde mesnetlerin konumları ve Grasshopper yazılımında mesnetleri tanımlayan bileşen

Yükler

Çalışmada iki farklı yük türü belirlenmiştir. Bunlardan ölü yük, en temel yük olup yerçekimi yükü yani yapının öz ağırlığı sabit yük olarak uygulanmıştır. Bunun için Karamba3D ile yapısal analiz için oluşturulan geometriyi meydana getiren çubuk elemanlarının birbirine yük aktarması sağlanmıştır. Voronoi'nin ağ yapısı gereği yükler her hücrenin köşelerinde depolanmakta ve komşu hücrenin köşelerine aktarılmaktadır. Köşelerde biriken yükler

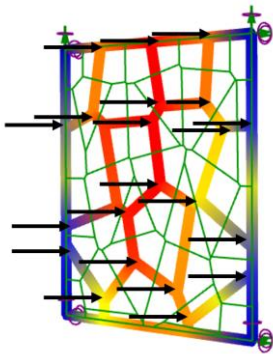
çubuklar üzerinde gerilme enerjisi oluşturmaktadır. Yer çekimi yükü Karamba yazılımı içerisinde herhangi bir parametre gerektirmeyen en basit yük türüdür.

Uygulanan diğer yük rüzgâr yüküdür. Rüzgâr yükleri, binaların yapısal tasarımında, özellikle bina cephelerinin tasarımında önemli husus olmaktadır. Cepheler bir binanın dış duvarlarıdır ve genellikle üzerlerine doğru esen rüzgâr nedeniyle rüzgâr yüklerine maruz kalmaktadırlar. Bir bina cephesindeki rüzgâr yüklerini, binanın yüksekliği, binanın konumu (örneğin, kıyı veya iç kesimler), rüzgâr hızı ve yönü gibi çeşitli faktörler etkilemektedir. Genel olarak, daha yüksek binalar, daha yüksek rakımlarda artan rüzgâr hızları nedeniyle daha yüksek rüzgâr yüklerine maruz kalmaktadır. Rüzgâr basıncı yüzeye dik olarak etki etmektedir. Çalışmada ülkemizde halen yürürlükte olan TS 498 standardındaki rüzgâr hesabı kullanılmıştır.

Yapı üst yüzeyine tesir eden rüzgâr basıncı;

$$w = C_p \cdot q \text{ kN/m}^2$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada q, rüzgâr basıncı; C_p , Emme katsayısını ifade etmektedir. Rüzgâr basıncı 0,5 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Rüzgâr yükünün Voronoi hücrelerinin birleşim noktalarına etki etmesi sağlanmıştır (Şekil 4.8). Her noktanın etki edeceği alan rüzgâr basınç değeri ile çarpılarak noktalara rüzgâr yükleri uygulanması sağlanmıştır.



Şekil 4.8. Hücrelerin kesişim noktalarına uygulanan rüzgâr yükü yönleri

Malzeme özellikleri ve enkesiti

Voronoi gibi ızgara yapıları için en yaygın kullanılan malzeme ahşaptır, çünkü düşük yoğunluk ve yüksek gerinim aralığına sahiptir. Ancak ahşabın gerilme limitleri düşüktür (Baverel, Caron, Tayeb ve Du Peloux, 2012). Izgara kabukların popüleritesi arttıkça, çelik, ahşaba kıyasla daha yüksek elastik modülü ve mukavemette sahip olduğu için ızgara yapılarında ahşabın yerini almıştır (Iuorio ve Sanctis, 2017).

Çelik sınıfı olarak yumuşak yapısı sayesinde kolay bir şekilde kesim işlemi yapılmasına imkân sağlaması, bu sayede işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliklerine sahip olması sebebi ile çokça tercih edilen s235 kullanılmıştır (Çizelge 4.1). S235 sınıfı çelik aynı zamanda Karamba 3D varsayılan ayarı olarak da uygulamaktadır. Kullanıcı tarafından herhangi bir malzeme tanımlanmamışsa, çelik sınıfı olarak S235 çeliği (EN 1993'e göre) ve 168,5mm dış çap ve kesit olarak dairesel, kalınlığı 5mm ve içi boş profil atanmaktadır (Çizelge 4.2). Varsayılan birim olarak ise metre (m) kullanmaktadır.

Karamba 3D'de, malzemelerin tanımlanabileceği başlıca iki yol vardır. İlk yol, önceden tanımlanmış malzemeler listesinden bir malzeme seçmek ve ikincisi, malzemenin özelliklerini manuel olarak ayarlamaktır. Malzeme özellikleri Karamba kütüphanesinden alınmıştır.

Çizelge 4.1. Çelik malzemenin en kesit özellikleri

Malzeme Özellikleri	Türü	Sınıfı	Enkesiti	Çapı	Kalınlığı
	Yapısal çelik	S235	O profil	168,5 mm	5 mm

Çizelge 4.2. S235 alaşımsız yapısal çelik malzemenin özellikleri

Yoğunluğu:	7,850 kg / m ³
Elastisite modülü	210 GPa (210000 MPa)
Kayma modülü	8100 kN/cm ²
Çeliğin minimum akma dayanımı	235 N/mm ²
Poisson oranı	0.286 - 0.315 (0.30 alınacaktır.)
Çekme mukavemeti	360 - 510 MPa

Malzeme en kesiti için iki aşamalı yapısal analiz sürecinde her aşama için farklı adımlar izlenmiştir. Birinci aşamada tüm modeller için aynı malzeme en kesiti tanımlanırken, modellerin verimliliklerinin karşılaştırıldığı ikinci aşamada en kesitler optimize edilmek amacıyla farklılaşmıştır. Dış çap ve et kalınlığı çeşitliliği bakımından zengin bir listeye sahip ve ülkemizde de kullanımı yaygın olan Stahlbau çelik profiller çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4.9).

D	T	A	M	I	W	I	D	T	A	M	I	W	I
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
Kreislörmige Hohlprofile Auswahl aus: { DIN EN 10210-2 (warmgefertigt, nahtlos oder geschweißt) } Ausgabe { DIN EN 10219-2 (kaltgefertigt, geschweißt) } November 1987													
33,7	2,6	2,54	1,99	3,09	1,04	1,10	355,6	12,5	136	106	19 062	1 117	12,1
	3,2	3,07	2,41	3,60	1,24	1,08		16	171	154	24 063	1 367	12,0
	4	3,73	2,93	4,19	1,49	1,06		20	211	166	29 792	1 676	11,9
								25	260	204	36 677	2 007	11,7
42,4	2,6	3,25	2,55	6,46	3,05	1,41		10	125	97,8	24 478	1 205	14,0
	3,2	3,94	3,09	7,62	3,59	1,39	408,4	12,5	155	121	30 031	1 478	13,9
	4	4,83	3,79	8,99	4,24	1,36		16	196	154	37 448	1 843	13,8
48,3	2,6	3,73	2,93	9,78	4,05	1,82		20	243	191	46 432	2 236	13,7
	3,2	4,53	3,56	11,6	4,80	1,80		25	300	235	54 702	2 682	13,6
	4	5,57	4,37	13,8	5,70	1,87		30	365	278	63 224	3 111	13,3
60,3	3,2	5,74	4,51	23,5	7,78	2,02		40	480	361	78 188	3 848	13,0
	4	7,07	5,55	28,2	9,34	2,00		10	140	110	35 091	1 636	15,8
							457	12,5	175	137	43 145	1 888	15,7
76,1	4	9,06	7,11	59,1	15,5	2,55		16	222	174	53 999	2 391	15,6
	5	11,2	8,77	70,9	18,6	2,52		20	275	216	66 061	2 874	15,5
								25	339	266	79 415	3 475	15,3
88,9	3,2	6,62	6,78	79,2	17,9	3,03		30	402	316	92 173	4 034	15,1
	4	10,7	8,38	96,3	21,7	3,00		40	524	411	114 949	5 031	14,8
	5	13,2	10,3	118	26,2	2,97		50	639	502	134 375	5 681	14,5
	6	15,8	12,3	136	30,4	2,94		10	158	123	46 520	1 910	17,8
	6,3	16,3	12,8	140	31,5	2,93	506	12,5	195	153	59 755	2 363	17,5
101,6	4	12,3	9,63	146	28,6	3,45		16	247	194	74 909	2 940	17,4
	5	15,2	11,9	177	34,9	3,42		20	307	241	91 428	3 600	17,3
	6,3	18,9	14,8	215	42,3	3,38		25	379	298	110 918	4 367	17,1
114,3	4	13,9	10,9	211	36,9	3,90		30	451	354	129 173	5 086	16,9
	5	17,2	13,5	257	45,0	3,87		40	568	462	162 188	6 365	16,6
	6,3	21,4	16,8	313	54,7	3,82		50	719	565	190 065	7 515	16,3
	8	26,7	21,0	379	66,4	3,77		10	168	148	84 847	2 782	21,2
139,7	4	17,1	13,4	393	56,2	4,90		12,5	235	184	104 755	3 436	21,1
	5	21,2	16,6	481	68,6	4,77		16	298	234	131 781	4 321	21,0
	6,3	26,4	20,7	589	84,3	4,72		20	371	291	161 490	5 296	20,9
	8	33,1	26,0	720	109	4,66		25	459	361	196 906	6 469	20,7
	12,5	50,0	39,2	1 020	146	4,62		30	547	429	230 478	7 567	20,5
168,3	5	25,7	20,1	856	102	5,78		40	716	562	292 333	9 585	20,2
	6,3	32,1	25,2	1 053	125	5,73		50	890	691	347 570	11 366	19,9
	8	40,3	31,6	1 297	154	5,67		10	220	173	136 301	3 606	24,8
	10	49,7	39,0	1 584	188	5,61		12,5	284	224	179 292	4 527	24,4
	12,5	61,2	48,0	1 988	222	5,53		16	359	281	229 167	5 622	24,1
177,8	6,3	33,9	26,6	1 290	141	6,07		20	434	341	269 351	7 295	24,4
	8	42,7	33,5	1 541	173	6,01		25	539	423	317 357	8 927	24,3
	10	52,7	41,4	1 862	209	5,94		30	642	504	372 700	10 488	24,1
	12,5	64,9	51,0	2 230	251	5,86		40	843	662	476 242	13 398	23,8
193,7	6,3	37,1	29,1	1 830	168	6,63		50	1038	815	570 312	16 043	23,4
	8	46,7	36,6	2 018	208	6,57		60	1227	963	656 563	18 441	23,1
	10	57,7	45,3	2 442	252	6,50		10	236	185	167 028	4 386	26,6
	16	89,0	70,1	3 664	367	6,31		16	375	294	260 973	6 850	26,4
219,1	6,3	42,1	33,1	2 396	218	7,53		20	486	366	321 063	8 427	26,2
	8	53,1	41,6	2 960	270	7,47		25	579	454	383 461	10 327	26,1
	10	65,7	51,6	3 698	328	7,40		30	690	542	462 853	12 148	25,9
	16	102	80,1	5 297	483	7,20		40	907	712	569 011	15 545	25,6
	20	127	98,2	6 281	572	7,07		50	1118	878	712 207	18 693	25,2
244,5	6,3	47,1	37,0	3 346	274	8,42		10	252	198	209 364	5 003	28,4
	8	59,4	46,7	4 160	340	8,37		16	401	314	318 222	7 828	28,2
	10	73,7	57,8	5 073	415	8,30		20	498	391	391 909	9 641	28,0
	12,5	91,1	71,5	6 947	503	8,21		25	619	486	480 858	11 820	27,9
	16	115	90,2	7 539	616	8,10		30	738	579	586 374	13 933	27,7
	20	141	111	8 957	733	7,97		10	284	223	290 147	6 349	32,0
	25	172	135	10 517	890	7,81		16	451	354	455 142	9 959	31,8
273	6,3	52,6	41,4	4 686	344	9,43		25	686	548	690 317	15 105	31,4
	8	66,6	52,3	5 852	429	9,37		30	833	656	814 775	17 829	31,3
	10	82,6	64,9	7 154	524	9,31		10	318	248	399 850	7 871	35,8
	12,5	102	80,3	8 697	637	9,22		16	503	395	628 479	12 372	35,4
	16	129	101	10 707	784	9,10		25	778	611	956 086	18 621	35,0
	20	159	125	12 798	938	8,97		30	929	729	1 130 352	22 251	34,9
	25	195	153	15 427	1 128	8,81		10	332	261	483 792	8 693	37,4
323,9	8	79,4	62,3	9 910	812	11,2		16	528	415	729 800	13 678	37,0
	10	98,6	77,4	12 158	751	11,1		25	818	642	1 111 365	20 831	36,9
	12,5	122	96,0	14 847	917	11,0	1168	30	977	767	1 314 864	24 648	36,7
								10	364	286	609 843	10 443	40,9

Şekil 4.9. Stahlbau o kesitli çelik malzeme listesi ve çalışmada kullanılan çelik malzeme en kesitlerinin aralığı

Zati yüklenme altında olan sistemlerde düşey yer değiştirme (sehim) kontrollerinin yapılabilmesi için yapısal olmayan bileşenlerin hasar görmemesi, işlevlerinin olumsuz etkilenmemesi, ikinci merteye etkilerinin yüksek değerler almaması ve yapı güvenliliğinin bozulmaması için düşeydeki *yer değiştirmelerin sınırlandırılması* gereklidir. Sınırlandırma yapılırken Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik baz alınmıştır ve düşey yer değiştirme miktarının limit değerleri bulunmuştur. 13 m olarak belirlenmiş olan cephe yüksekliği $L/240$ formülü ile hesaplandığında sınır değer 0.054 olarak bulunmuştur. Bu oranı geçen Voronoi modelleri rijit olmayan kararsız sistemler sınıfına gireceği ve yapısal analiz sonucunda uygulama açısından tercih edilmeyeceği için iyileştirmeler yapılmıştır.

Çelik malzeme ile çubuklar belirlendikten sonra ortaya çıkan örüntülerdeki boşluklar ise cam malzeme ile doldurularak kaplama yapılmıştır. Cam malzeme çeşidi olarak aynı kalınlığa sahip diğer cam türlerine göre daha dayanıklı olması sebebi ile temperli cam kullanılmıştır. Kalınlığı 2,5 cm olarak alınmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Cam malzemenin özellikleri

Yoğunluğu:	2,500 kg / m ³
Elastisite modülü	7,2 GPa (7200 MPa)
Kayma modülü	29268 kN/cm ²
Max basınç dayanımı	300 MPa
Poisson oranı	0,22
Max Çekme mukavemeti	165MPa

5. ALAN ÇALIŞMASI

Alan çalışması kapsamında belirlenmiş olan Üretken sistemler ile cephe tasarımı için Voronoi biçimli desenler üretilip geometrik özellikleri ve yapısal özellikleri değerlendirilmiştir. Sırasıyla L sistemler, Hücresel özdevinim, şekil gramerleri ve sürü zekâsı algoritmaları için 4 kural belirlenmiş ardından her kural için 6 nesil desen üretilmiştir.

İki bölümden oluşan alan çalışmasının birinci bölümünde desenlere ait hücre sayıları ve toplam çubuk uzunlukları verilerine ulaşılmış olup bu desenler geometrik özellikleri bakımından üç kriter altında değerlendirilmiştir. Bunlar; kuralların değişmesi ile geometrik karakterlerindeki farklılaşma, nesil sayısının artması ile desenlerde meydana gelen değişimler ve desen üretme bağlamında kullanıcıya düşen görevlerdir.

Alan çalışmasının ikinci bölümünde ise üretilen desenlerin cephe uygulamasında kullanılacağı düşünülerek yapısal özellik kazandırılıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretken sistemlerin nesil sayısı arttıkça farklılaşan geometrik düzenleri göz önüne alınarak yapısal davranışlarındaki değişim değerlendirilmiştir. Bu sayede en iyi performansı gösteren desen üzerinden Voronoi cephe tasarımında en uygun üretken sistemin tespiti sağlanmıştır.

5.1. Üretken Sistemler ile Voronoi Desen Tasarım Süreci

ÜS'leri karşılaştırabilmek amacıyla üretilen desenlerin sahip oldukları hücre sayılarının benzer olmasını sağlamak esas olmaktadır. Bu bağlamda algoritmayı oluşturan parametrelerin sınırlandırılması gerekmektedir. Sürecin ilk aşaması tüm ÜS'ler için ortak olacak olan cephe sınırlarına ait değerlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bunu, cephenin üzerinde desen üretimi için aktif olarak etkili olacak ÜS'lerin başlangıç noktalarının belirlenmesi takip etmektedir.

Ardından üretken sistem algoritmalarını oluşturan kurallar ve diğer parametreler belirlenir. Kural dışındaki diğer parametreler ÜS'lerin üreteceği desenlerin hücre sayılarının benzer olmasını sağlamak amacıyla kısıtlanmasına karar verilen parametrelerdir. Kuralların sistem içinde tekrar etmesi ile yeni nesiller elde edilmiştir. Bu tekrar durumu öz yineleme olarak da ifade edilmektedir.

Belirlenen kural, özyineleme değeri ve diğer değişkenlerin ürettiği verilerin Voronoi'ye dönüştürülmesi bir sonraki aşamayı oluşturmaktadır. Bu aşamada ÜS'lerin ürettiği verilerin noktaya dönüştürülme yöntemini belirlemek gerekmektedir. Sonucunda oluşan Voronoi'nin kaç hücreden meydana geldiği ve hücreleri oluşturan çubukların toplam uzunluğu gibi desen geometrisine ait bilgilere ulaşılmıştır.

5.1.1. L-sistemler ile desen üretimi

Grafiksel olarak yorumlandığında bitkilerin büyüme biçimini temsil eden harfler ve sembollerden oluşan gramerlerdir. L-sistemleri kullanan tasarımcı, girdi olarak tanımladığı az sayıda veri ile karakter dizisini kurgularken geometrik olarak karmaşık bir çıktı oluşturabilmektedir. Çalışmada geometrinin oluşturulması için tasarımcının kolaylıkla çalışmasında kullanabileceği temel L-sistem tekniklerinden olan deterministik ve bağlamdan bağımsız sistem (DOL) kullanılmıştır.

Sistemin ilk durumunu belirten bir aksiyomun (başlatıcı veya tohum) ve aksiyomun yeniden yazma yolu ile dönüştürülmesini sağlayan kurallar belirlenmiştir. Aksiyom, L-sistemin ilk kuralını ve dolayısıyla ilk neslini ifade etmektedir. Dört farklı kural ile oluşturulan desenler arasında karşılaştırma yapabilmek amacıyla her l-sistemin bir öncekinden sadece bir özelliği ile farklılaşması sağlanmıştır. 1.kural en temel dallanma yapısını ifade etmektedir. Çalışmada, 1990 yılında Lindenmayer ve Prusinkiewicz'in bitkilerin biçimsel oluşumlarını alfabe kullanarak bilgisayar ortamında üretmeye yönelik araştırmalarının yayınlandığı "*Algorithmic Beauty of Plants*" (Bitkilerin Algoritmik Güzelliği) kitabında yer alan kurallar referans alınarak benzer şekilde oluşturulmuştur. (Prusinkiewicz ve Lindenmayer, 2012). İkinci kuralda 1.talimat, üçüncü kuralda 1. ve 2. talimatlar ve dördüncü kuralda aksiyom farklılaştırılmıştır (Çizelge 5.1). Nesillere ait L-sistem dizileri Ek-1'de yer almaktadır. Belirlenen tüm adımlar Grasshopper yazılımı içerisinde çalışan, L-sistemin üretilmesi ve yorumlanmasını sorunsuz bir şekilde sağlayan Rabbit (Morphcode) eklentisi ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1. L-sistem kurallarına ait aksiyom ve talimatlar

	Kural 1	Kural 2	Kural 3	Kural 4
Aksiyom	A	A	A	+A
Talimatlar	A=F [-A] + [+A] F=F	A=F [-A] + [+A] F=F	A=F [+B] + [+B] B=FA	A=F [+B] + F [+B] B=FA

Kural dışındaki L-sistemi oluşturan diğer parametreler değişken olmayıp belirli değerler ile sabitlenmiştir. Bu parametreler çizgilerin açısı ve uzunluğudur. Çizgi uzunluğu 1 m açı 45 derece olarak belirlenmiştir. Oluşan çizgisel geometrinin Voronoi diyagramına dönüştürülmesi için her çizginin başlangıç ve bitiş noktaları algoritmaya Voronoi hücrelerinin merkezi olarak tanıtılmıştır. Çizelge 5.2’de her nesil için L-sistem dallanma yapısına ait görüntüsü ve Voronoi görüntüsü yan yana verilmiştir.

Çizelge 5.2. Nesillere ait l-sistem dallanma yapısı ve Voronoi görüntüsü

Kural 1					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 2					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 3					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 4					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	

Elde edilen hücrel desenlerin geometrik özellikleri Çizelge 5.3’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3. L-sistemler ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri

Nesiller		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu (m)	Desenler		Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 1	n:1		8	94	Kural 2	n:1	8	94
	n:2		16	120		n:2	16	120
	n:3		32	164		n:3	32	152
	n:4		60	205		n:4	60	179
	n:5		108	262		n:5	104	217
	n:6		188	312		n:6	164	265
Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu	Desenler		Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 3	n:1		12	105	Kural 4	n:1	12	107
	n:2		20	134		n:2	20	137
	n:3		36	165		n:3	36	166
	n:4		52	197		n:4	52	188
	n:5		84	230		n:5	84	227
	n:6		116	256		n:6	116	260

L-sistem kurallarının değişmesi ile desenlerin geometrik karakterlerindeki farklılaşma incelendiğinde;

- Farklı kurallar farklı dallanma biçimleri meydana getirmiştir. Farklı yönlerde dallanmanın geliştiği 1., 2 ve 4. kurallarda asimetric bir yönde dallanmanın gelişim gösterdiği; 2.kuralda radyal bir düzen meydana geldiği görülmüştür. Bunun sonucunda oluşan Voronoi desenleri incelendiğinde, hücrelerin alan içerisindeki dağılımı her kural için farklılık göstermiştir. Örneğin 2. kuralda çok sayıda hücrenin tüm alan içerisinde daha ufak bir alanda toplandığı veya geniş bir alan içerisinde hiçbir hücrenin bulunmadığı durumlar oluşmuştur. Ancak diğer kurallarda hücreler daha dengeli dağılım göstermiştir.

Nesil sayısının artması ile meydana gelen desenler incelendiğinde;

- Nesil sayısı arttıkça tüm kurallar için hücre sayısı ve toplam çubuk uzunluğu artmıştır. Bununla birlikte bir ölçüde karmaşıklık seviyesi de artmıştır. Ancak her kural için hücrelerin hangi yönde gelişim gösterdiği ve hücrelerin her nesilde ne kadar aritmetik artırım gösterdiği farklılık göstermiştir. Bu durum nesil sayısı arttıkça her kural için

hücrelerin karmaşıklık durumlarını farklılaştırmış olup Voronoi desenine daha yakın görseller elde edilmiştir.

L-sistem ile Voronoi desen üretme bağlamında kullanıcıya düşen görev değerlendirildiğinde;

- Bir tasarımcı belli bir yönde gelişen tasarım oluşturmak istediğinde veya tam tersi karmaşık bir tasarım oluşturmak istediğinde bunu semboller kullanarak yapabilmektedir. Bu nedenle, L-sistemlerini kullanan tasarımcının, sembolleri iyi tanması önem kazanmaktadır. Buna karşılık çok sayıda kural kullanan veya bir kural içerisinde çok sayıda sembol kullanan tasarımcının bu işlemi yönetmesi ve sonuç ürünü önceden tahmin etmesi oldukça zor olabilmektedir.

5.1.2. Hücresel özdevinim ile desen üretimi

Hücresel otomatlar, tasarımı oluşturmak için 0 ve 1 elemanlarını kullanan bir yöntemdir. Bu hücreler, birbirlerine göre belirli kurallar ile bir düzen oluşturmaktadır. Bu kurallar, her hücrenin çevresindeki hücrelerin durumuna göre, hücrenin nasıl değiştirileceğini belirlemektedir. Sistem bir nesilden diğerine satır satır gelişmektedir.

Çalışmada bir boyutlu temel hücresel özdevinim yapısı kullanılmıştır. Kurallar, Zawidzki 'nin cephe tasarımında hücresel özdevinimin kullanımını araştırdığı makalesinden referans alınmıştır (Zawidzki, 2009). Bunlar 142, 154, 162 ve 166 kurallarıdır. Kurallara ait özellikler Çizelge 5.4'de yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Hücresel özdevinime ait kurallar ve özellikleri

Kural	Kural sayısı	Grafiksel gösterimi	Sayısal gösterimi
1	142		10001110
2	154		10011010
3	162		10100010
4	166		10100110

Hücresel özdevinimi oluşturan kural haricindeki diğer parametreler değişken olmayıp belirli değerler ile sabitlenmiştir. Bu parametreler hücre satırları arasındaki mesafe olup bu değer 0,5 cm olarak belirlenmiştir.

Oluşan hücresel geometrinin Voronoi diyagramına dönüştürülmesi için her hücrenin merkez noktaları algoritmaya Voronoi hücrelerinin merkezi olarak tanıtılmıştır. Çizelge 5.5’de her nesil için hücresel özdevinime ait görüntüsü ve Voronoi görüntüsü yan yana verilmiştir.

Çizelge 5.5. Kural ve nesillere göre hücresel özdevinim hücre yapısı ve Voronoi görüntüsü

Kural 1					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Kural 2					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Kural 3					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Kural 4					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	

Elde edilen hücresel desenlerin geometrik özellikleri Çizelge 5.6'da yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Hüresel özdevinim ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri

Nesiller		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu (m)	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 1	n:1		36	180	Kural 2	n:1		44	200
	n:2		52	204		n:2		70	232
	n:3		68	234		n:3		96	271
	n:4		84	264		n:4		116	292
	n:5		100	288		n:5		142	323
	n:6		112	298		n:6		165	341
Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 3	n:1		20	158	Kural 4	n:1		28	154
	n:2		28	175		n:2		40	183
	n:3		36	201		n:3		52	210
	n:4		44	232		n:4		64	239
	n:5		52	252		n:5		76	258
	n:6		58	261		n:6		86	270

Hüresel özdevinim kurallarının değişmesi ile desenlerin geometrik karakterlerindeki farklılaşma incelendiğinde;

- Her kural kendine özgü bir simetri ve ritim içermektedir. Örneğin, bazı kurallar tek yönde gelişen bir hücre düzeni oluştururken, bazı kurallar iki veya daha fazla yönde dikey veya yatay simetrik desenler üretebilmektedir. Bunun sonucunda hücrelerin sınırlı alanlarda yoğunlaşmadığı hücre dağılımının dengeli olduğu desenler oluşmuştur. Genel olarak seçilen kurallar, benzer boyutlarda ve şekillerde hücrelerden oluşan desenler üretmiştir.

Nesil sayısının artması ile meydana gelen desenler incelendiğinde;

- Nesil sayısı arttıkça tüm kurallar için hücre sayısı ve toplam çubuk uzunluğu artmıştır. Bununla birlikte hücreler arası boyut farkı azalmış, benzer alana sahip hücre sayısı artmıştır. Nesiller arasında hücre sayısının aritmetik arttığı görülmüştür. Bu durum nesil sayısı artsa da hücreleri daha az karmaşık yapmaktadır.

Hüresel özdevinim ile Voronoi desen üretme bağlamında kullanıcıya düşen görev değerlendirildiğinde;

- Bir tasarımcı düzenli veya karmaşık bir tasarım oluşturmak istediğinde bunu kural setlerini kullanarak yapabilmektedir. Bu nedenle, Hücresel özdevinimi kullanan tasarımcının, kuralları inceleyerek, kuralın nasıl çalıştığını anlayarak, üretilecek desenin ne şekilde organize olacağını tahmin edebilmektedir.

5.1.3. Şekil gramerleri ile desen üretimi

Şekil grameri, form oluşturmak için şekillerden oluşan kural setlerinin belirlenmesi ve özyinelemeli bir şekilde uygulanması yöntemidir. Şekil gramerleri şekil alfabeleri üzerinden tanımlanır ve şekil dilleri üretir.

Referans kural (aynı zamanda çalışmadaki kural 1) olarak şekil gramerleri üzerine çalışmaları olan Stiny 'in 1980 tarihli makalesinde yer alan kural referans alınmıştır (Stiny, 1980). Talimatların adım adım ürettiği şekiller Çizelge 5.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 5.7. Şekil gramerleri kurallarına ait talimatlar ve özyineleme ile üretilen şekiller

	Talimatlar	Nesiller
Kural 1		
Kural 2		
Kural 3		
Kural 4		

Kural dışındaki şekil gramerlerini oluşturan diğer parametreler değişken olmayıp belirli değerler ile sabitlenmiştir. Bu parametreler talimatları oluşturan şekillerin kenar çizgilerinin uzunluğudur. Çizgi uzunluğu 0,6 m olarak belirlenmiştir.

Oluşan çizgisel geometrinin Voronoi diyagramına dönüştürülmesi için her şeklin köşe noktaları algoritmaya Voronoi hücrelerinin merkezi olarak tanıtılmıştır. Çizelge 5.8’de her nesil için şekil gramer yapısına ait görüntüsü ve Voronoi görüntüsü yan yana verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kural ve nesillere göre şekil gramer yapısı ve Voronoi görüntüsü

Kural 1					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 2					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 3					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 4					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	

Elde edilen hücresel desenlerin geometrik özellikleri Çizelge 5.9'daki gibidir.

Çizelge 5.9. Şekil gramerleri ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri

Nesiller		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu (m)	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 1	n:1		16	118	Kural 2	n:1		20	139
	n:2		32	154		n:2		40	151
	n:3		48	171		n:3		60	170
	n:4		64	176		n:4		80	194
	n:5		80	194		n:5		100	212
	n:6		96	221		n:6		120	232
Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 3	n:1		24	136	Kural 4	n:1		28	156
	n:2		48	154		n:2		56	164
	n:3		72	172		n:3		84	185
	n:4		96	201		n:4		112	215
	n:5		120	236		n:5		140	258
	n:6		144	262		n:6		168	279

Şekil gramerleri kurallarının değişmesi ile desenlerin geometrik karakterlerindeki farklılaşma incelendiğinde;

- Farklı kurallar ile üretilen desenlerin geometrik karakterleri, kuralı belirleyen şekillere bağlı olarak değişmiştir. Benzer boyutlarda kullanılan ama farklı kenar sayısına sahip çokgenler içeren kurallar farklı desenler üretmiştir. Genel olarak üretilen desenlerde hücrelerin başlangıç noktasının bulunduğu konumun çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum hücre boyutları arasındaki farkın artmasına, hücre dağılımındaki dengesizliğin artmasına ve dolayısıyla karmaşıklığın artmasına sebep olmuştur.

Nesil sayısının artması ile meydana gelen desenler incelendiğinde;

- Nesil sayısı arttıkça tüm kurallar için hücre sayısı ve toplam çubuk uzunluğu artmıştır. Bununla birlikte hücreler arası boyut farkı daima fazla olmaktadır. Nesiller arasında hücre sayısının aritmetik arttığı görülmüştür. Bu sayede hücre düzeni yönetilebilir olsa da hücrelerin belirli alanlarda yoğunlaşması karmaşıklığı arttıran faktör olmaktadır.

Hüresel özdevinim ile Voronoi desen üretme bağlamında kullanıcıya düşen görev değerlendirildiğinde;

- Voronoi desenlerinin geometrisini, kurallara ait şekiller tanımlamakta olup, kuralları tasarımcı kendisi oluşturabilmektedir. Bu sebeple tasarımcı, kural setlerini belirlerken, tasarımı oluşturan şekillerin özelliklerini (örneğin şekillerin boyutları, şekillerin konumları ve şekillerin kombinasyonları) iyi tanımlaması gerekmektedir. Böylelikle tasarımcı, kuralları şekilsel olarak kurgulayabildiğinden dolayı, meydana gelecek desenlerin karmaşıklığını tahmin edilebilmekte ve kontrol edilebilmektedir.
- Ancak, aynı zamanda kural ve öğelerin sayısı arttıkça, tasarım süreci de daha karmaşık hale gelebilmektedir. Bu nedenle, tasarımcılar, karmaşıklığı kontrol altına almak için kurallar ve öğelerin sayısını dengeli bir şekilde seçmesi gerekmektedir.

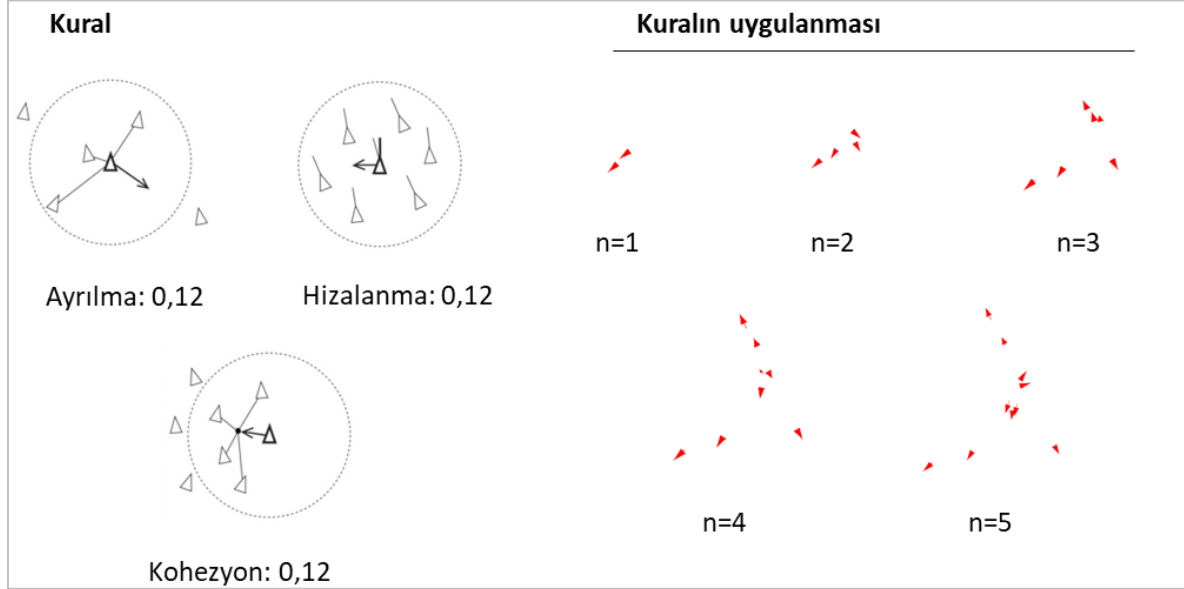
5.1.4. Sürü zekâsı algoritması ile desen üretimi

Sürü zekâsı algoritmaları, doğadaki kendi kendini organize eden koloni davranışlarının görünüşte karmaşık yapısının çözümlenip basit kurallara indirildiği etmen tabanlı algoritmalarıdır. Bu algoritmalar aracılığıyla mimari desen üretiminde, birkaç basit kural belirlenir ve bu kurallar etmenler tarafından uygulanmaktadır. Bu kurallar arasında, etmenlerin birbirlerine çarpışmasını önleyen (ayrılma), etmenlerin aynı sürüdeki diğer bireylerin ortalama konumuna yaklaşır (kohezyon) ve her bireyin sürünün ortalama hareket yönünü takip etmesini sağlayan (hizalanma) kuralları yer almaktadır.

Çalışmada referans kural olarak sürü zekâsı algoritmasının temel bileşenleri olan ayrılma hizalanma ve uyum değerleri Ağırbaş'ın sürü algoritması ile Voronoi cephe üretimine yönelik araştırmasını içeren 2019 tarihli makalesinden alınmıştır (Ağırbaş, 2019). Referans kurala ait değerler ve etmenlerin konumları Şekil 5.1'de ifade edilmiştir. İlk kuralda ayrılma, kohezyon ve hizalanma 0.12 değeri olarak girilmiştir. Diğer kurallar 0,36, 0,60 ve 0,86 olarak belirlenmiştir.

Simülasyon başlatıldığında, her saniyede pozisyonları değişen etmenlerin, sistem tarafından, beş saniye aralıklarla kaydedilmiş konumları incelenmiştir. Bu süreçte, zaman içinde pozisyonları değişen etmenlerin sayısı da artmaktadır. Sistem içinde üretilen etmen sayısı, diğer üretken sistemlerden elde edilen desenlerin maksimum hücre sayısı ile orantılı olarak sınırlandırılmıştır. Ayrıca, etmenlerin ilk hareket yönleri, başlangıç noktalarından yukarı

doğru olarak belirlenmiştir. Etmenlerin belirli zamanlarda almış oldukları konumlar, bir Voronoi hüccresini temsil etmektedir.



şekil 5.1. Sürü zekâsına ait referans kural ve etmen konumları

Çizelge 5.10'da her nesil için şekil gramer yapısına ait görüntüsü ve Voronoi görüntüsü yan yana verilmiştir.

Çizelge 5.10. Kural ve nesillere göre sürü zekâsı etmen konumları ve Voronoi görüntüsü

Kural 1					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 2					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 3					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	
Kural 4					
Nesil 1		Nesil 2		Nesil 3	
Nesil 4		Nesil 5		Nesil 6	

Elde edilen hücresel desenlerin geometrik özellikleri Çizelge 5.11’deki gibidir.

Çizelge 5.11. Sürü zekâsı ile üretilen desenlerin geometrik özellikleri

Nesiller		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu (m)	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 1	n:1		16	121	Kural 2	n:1		16	117
	n:2		48	183		n:2		48	182
	n:3		78	220		n:3		68	212
	n:4		117	264		n:4		123	272
	n:5		141	284		n:5		154	292
	n:6		151	294		n:6		167	295
Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu	Desenler		Modellerin Özellikleri	Hücre sayısı	Toplam çizgi uzunluğu
Kural 3	n:1		16	117	Kural 4	n:1		16	116
	n:2		48	174		n:2		48	177
	n:3		80	207		n:3		80	220
	n:4		124	240		n:4		122	255
	n:5		156	247		n:5		154	268
	n:6		173	286		n:6		174	301

Sürü zekâsı kurallarının değişmesi ile desenlerin geometrik karakterlerindeki farklılaşma incelendiğinde;

- Ayrılma, hizalanma ve kohezyon değerlerinin her kuralda artırılması sonucunda üretilen desenlerde hücrelerin bir alanda yoğunlaşma durumlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu, hizalanma ve kohezyon değerlerinin arttıkça etmenlerin sürü içinde daha fazla bir araya toplanma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, ayrılma değerinin artırılması, ilk nesillerde etmenler arasındaki uzaklaşma eğilimini arttırmakta ancak nesil sayısı arttıkça, sınırlı hareket alanları nedeniyle hizalanma ve kohezyon değerlerinin etkisiyle etmenlerin tekrar bir araya gelmelerine neden olmaktadır. Bu durum, genel olarak hücre yoğunluğunun dengesiz bir dağılım gösterdiği ve karmaşık bir desen yapısı oluşmasına sebep olmuştur.

Nesil sayısının artması ile meydana gelen desenler incelendiğinde;

- Nesil sayısı arttıkça uygulanan tüm kurallar için hücre sayısı ve toplam çubuk uzunluğu artmıştır. Ancak, bu artırma sürecinde hücreler arasında boyut farkları oluşmuştur.

Nesiller arasında hücre sayısı aritmetik bir şekilde artmamış, düzensiz bir artış meydana gelmiştir.

Sürü zekâsı algoritması ile Voronoi desen üretme bağlamında kullanıcıya düşen görev değerlendirildiğinde;

- Sürü zekâsı algoritmasının kullanımı ile elde edilen desenler, genel olarak tasarımcının kontrolü dışında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, elde edilen desenler önceden tahmin edilmemiş veya beklenmedik şekillerde olabilmektedir. Ancak, tasarımcı kullanılan algoritmanın kural değerlerini ayarlayarak, desenlerin hücre sayılarını ve hücre yoğunluk dengesini kontrol edebilmektedir. Bu sayede, tamamen düzenli desenler elde etmek mümkün olmasa bile, daha dengeli dağılıma sahip bir yapıya ulaşabilmektedir.

5.1.5. Voronoi desen üretme bağlamında üretken sistemlerin değerlendirilmesi

Üretken sistemler ile Voronoi desenlerin üretilme aşamasında elde edilen bilgiler bu başlık altında değerlendirilmiştir. Her sistemin değişken parametreleri, kuralı oluşturan ana bileşenleri, Voronoi'ye dönüşümü sağlayan noktalar, nesil sayısı arttıkça oluşan desenin karakteri ve tasarımcı için avantajlı/dezavantajlı yönleri Çizelge 5.12'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.12. Voronoi ile desen üretme bağlamında üretken sistemlerin ÜS özelliği, Voronoi desen özelliği ve tasarımcı için kullanım özelliği açılarından değerlendirilmesi

ÜS	ÜRETKEN SİSTEM ÖZELLİĞİ		VORONOI DESEN ÖZELLİĞİ		TASARIMCI İÇİN KULLANIM ÖZELLİĞİ	
	Değişken parametreler	Kuralı oluşturan ana bileşenler	Voronoi'ye dönüşümü sağlayan noktaların seçimi	Nesil sayısı arttıkça oluşan desenin karakteri	Tasarımcı için avantajı	Tasarımcı için dezavantajı
LS	Aksiyom, kurallar, özyineleme sayısı, çizgilerin yatay ile yaptığı açı ve çizgi uzunluğu.	“F”, “+” ve “-” gibi semboller ile oluşturulan dize.	Dallanma uç noktaları.	Simetri veya asimetriye dayalı düzen.	Birkaç sembol ekleyip çıkararak Voronoi hücrelerinin büyüklüğünün, şeklinin ve yapısının kolayca değiştirilebilmesi	Kurala hâkimiyet için tasarımcının sembolleri iyi tanınması gerekmektedir.

Çizelge 5.12. (devamı) Voronoi ile desen üretme bağlamında üretken sistemlerin ÜS özelliği, Voronoi desen özelliği ve tasarımcı için kullanım özelliği açılarından değerlendirilmesi

HÖ	Kural, özyineleme sayısı, hücre büyüklüğü.	0 ve 1 ile oluşturulan 8. bitlik dize	Hücreleri meydana getiren noktalar.	Ritim veya tekrara dayalı düzen.	Sadece 0 ve 1'lerden oluşan kuralların farklı kombinasyonları ile çeşitli geometrik desenler üretme kolaylığı	Üretilen desenler üzerinde değişiklik yapmak adına tasarımcının özgür olmaması
ŞG	Kural, özyineleme sayısı.	2 boyutlu şekiller.	Şekillerinin köşe noktaları.	Belirlenen kural ile aynı orana sahip düzen.	Kuralın tasarımcı tarafından belirlenmesinden dolayı desenin yapısına karar vermede tamamen özgür olması	Kurala ait şekilleri her nesilde test etmesi gereken tasarımcının şekilleri kendisi tayin ettiği için oldukça vakit alan bir süreç olması
SZ	Kural, etmen sayısı, etmenlerin başlangıç hareket yönü, özyineleme süresi.	Kohezyon, ayrılma ve hizalanma.	Etmenlerin zaman içindeki konumları.	Tanımlanamayan, karmaşık yapıda geometriye sahip düzen.	Kuralların doğru belirlenmesi ile, karmaşıklık düzeyinin doğal desenlere benzer bir seviyede biçimlendiği ve hücrelerin dengeli bir şekilde dağıldığı desenlerin üretiminin kolaylığı.	Tasarımcının kontrolü dışında ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple öngörülemezdir.

Voronoi yöntemi ile desen üretiminde, hücrelerin alan içerisindeki dağılımının dengeli olup olmadığı ve hücre büyüklüklerinin benzerliği, desen karmaşıklığını belirleyen faktörlerdir.

Buna göre dört sistem, Voronoi hücrelerinin geometrik karakteri bağlamında karşılaştırıldığında;

- L-sistemler, şekil gramerleri ve sürü zekâsı ile üretilen desenlerde farklı kurallarda hücrelerin dengeli veya dengesiz dağılımının olduğu desenler üretilmiştir. Buna karşın hücresel özdevinim ile üretilen desenler tüm kurallar için dengeli hücre dağılımlarının olduğu sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, hücresel özdevinim yöntemi ile desen karmaşıklığını arttırmak, belirlenen sınırlılıklar içinde mümkün olmamıştır.

Tasarımcının kural ile ilişkisi bağlamında karşılaştırıldığında;

- Sistemler arasında kurala hâkimiyeti sağlamak için en yoğun bilgi ihtiyacının L-sistemler tarafından sağlandığı tespit edilmiştir. Kurala bağlı olarak üretilen sonuçların en tahmin edilebilir olduğu sistem ise hücresel özdevinim yöntemi olmuştur. Tasarımcının kuralı belirleme konusunda en özgür olduğu sistem şekil gramerleri olmuştur. En öngörülemez sistemin ise sürü algoritmaları olduğu gözlenmiştir.

5.2. Voronoi Cephelerin Yapısal Modelleme Süreci

Alan çalışmasının birinci bölümünde üretilen desenlere ait geometrik veriler bu bölümde yapısal analizleri gerçekleştirmek üzere kullanılmıştır. Yapısal modelleme süreci üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada her üretken sistem için 24 model olmak üzere toplam 96 model değerlendirilmiştir. Değerlendirme kriterleri olarak ölü yük altında malzeme en kesitleri sabit tutularak yapısal davranış verilerine ulaşılmıştır. Her kurala ait en iyi sonucu veren modeller seçilerek ikinci aşamada optimum malzeme kesitleri uygulanmıştır. Ulaşılan yapısal davranış verileri incelenerek her sistemin en iyi performans gösteren birer modeli tespit edilmiştir. Üçüncü aşamada seçilen dört model farklı yükler altında yapısal davranışları incelenmiş ardından en iyi performansı gösteren model tespit edilmiştir.

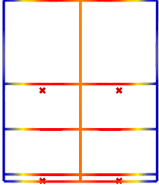
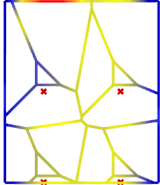
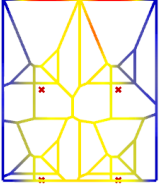
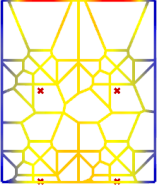
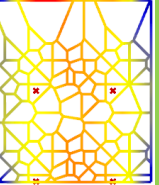
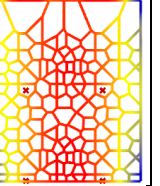
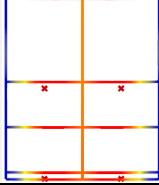
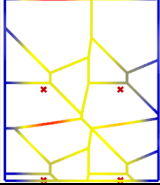
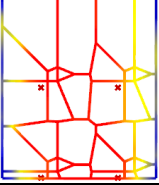
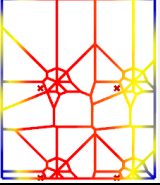
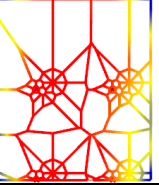
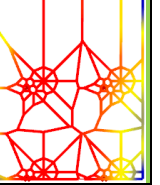
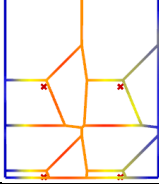
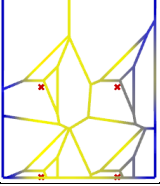
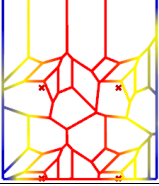
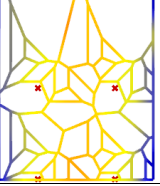
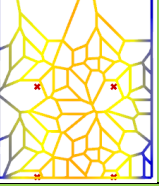
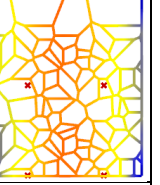
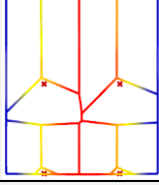
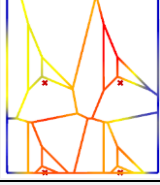
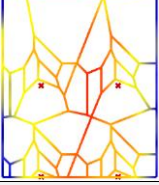
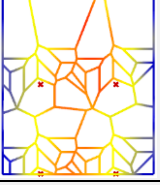
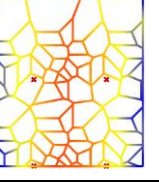
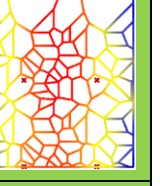
5.2.1. Birinci aşama: malzeme kesitleri sabit tutulan modellerin karşılaştırılması

İlk aşamada her bir ÜS nesilleri içerisinde *malzeme kesitleri sabit tutularak* sistemlerin davranışları karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç, aynı malzemeler ve yüklemeler altında değişken olan kurallara ait geometrik konfigürasyonların analiz bulgularına göre performansını sorgulamak ve her kuralın en uygun modelini seçmektir. Modellerin yer değiştirme sınır değerlerine yakın kalmasını sağlamak amacıyla farklı en kesitler denenmiş, tüm modellerde güvenli tarafta kalmayı sağlayan 16,8 mm x 5 mm en kesit kullanılmıştır.

Her sistem için 4 farklı kural ve her kural için altı farklı nesil olmak üzere toplam 96 adet yapısal model üretilmiştir. yapısal ağırlığı ve maksimum yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır. Her kural için, en düşük yapısal yer değiştirme değerine sahip nesile ait model tablo içinde işaretlenmiştir. Aşağıda yer alan tablolarda sırasıyla LS, HÖ, ŞG VE SZ üretken sistem ile üretilen tüm Voronoi modellerin analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

L-sistem ile üretilen desenlerin hücre sayıları, toplam yapı ağırlıkları ve yer değiştirme değerleri görselleri ile birlikte Çizelge 5.13’de yer almaktadır.

Çizelge 5.13. L-sistem ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları, ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri

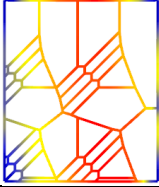
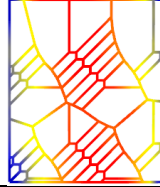
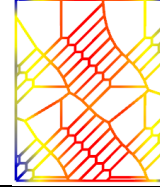
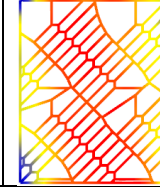
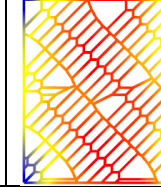
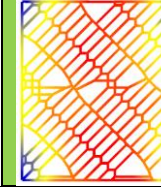

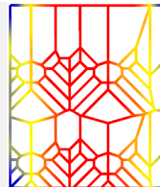

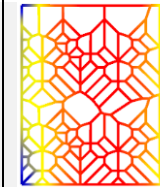
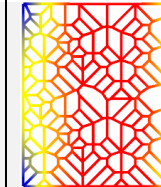
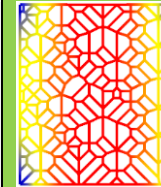
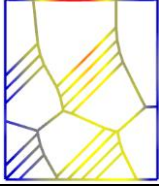
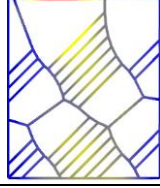
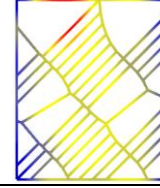
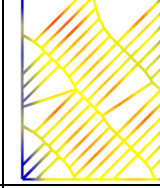
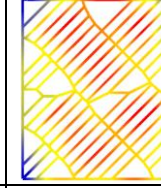
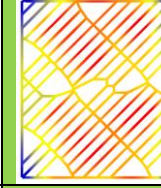
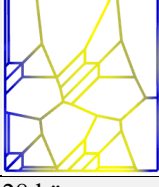
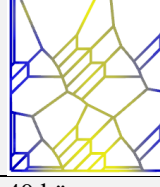
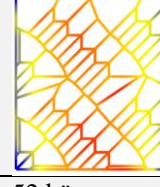
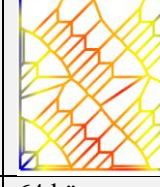
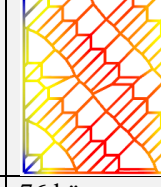
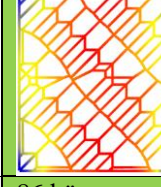
LSİSTEM						
	n:1	n:2	n:3	n:4	n:5	n:6
Kural 1						
	8 hücre 18,92 ton; 0,697 m	16 hücre 24,36 ton; 0,183 m	32 hücre 33,17 ton; 0,056 m	60 hücre 41,38 ton; 0,055 m	108 hücre 52,79 ton; 0,0336 m	188 hücre 62,93 ton; 0,0337 m
Kural 2						
	8 hücre 18,92 ton; 0,697 m	16 hücre 24,28 ton; 0,165 m	32 hücre 30,63 ton; 0,115 m	60 hücre 36,10 ton; 0,108 m	104 hücre 43,80 ton; 0,107 m	164 hücre 53,37 ton; 0,058 m
Kural 3						
	12 hücre 21,25 ton; 0,327 m	20 hücre 27,02 ton; 0,095 m	36 hücre 33,29 ton; 0,095 m	52 hücre 39,68 ton; 0,063 m	84 hücre 46,37 ton; 0,049 m	116 hücre 51,61 ton; 0,077 m
Kural 4						
	12 hücre 21,65 ton; 0,428	20 hücre 27,67 ton; 0,138 m	36 hücre 33,54 ton; 0,109 m	52 hücre 37,95 ton; 0,092 m	84 hücre 45,83 ton; 0,059 m	116 hücre 52,45 ton; 0,041 m

L-sistem ile üretilen modeller değerlendirildiğinde;

- Nesiller arttıkça yoğunluğun ve yapı ağırlığının arttığı görülmüştür. Genel olarak yapısal yer değiştirme bununla ters orantılı bir şekilde azalmıştır. Dolayısıyla en kararlı modeller 5 veya 6. nesiller olmuştur.

Hüresel özdevinim ile üretilen desenlerin hücre sayıları, toplam yapı ağırlıkları ve yer değiştirme değerleri görselleri ile birlikte Çizelge 5.14'te yer almaktadır.

Çizelge 5.14. Hüresel özdevinim ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları, ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri

HÜCRESEL ÖZDEVİNİM						
	n:1	n:2	n:3	n:4	n:5	n:6
Kural 1						
	36 hücre 36,30 ton; 0,119 m	52 hücre 41,12 ton; 0,046 m	68 hücre 47,16 ton; 0,034 m	84 hücre 53,12 ton; 0,024 m	100 hücre 58,15 ton; 0,021 m	112 hücre 60,18 ton; 0,019 m
Kural 2						
	44 hücre 40,33 ton; 0,074 m	70 hücre 46,88 ton; 0,050 m	96 hücre 54,61 ton; 0,039 m	116 hücre 58,95 ton; 0,026 m	142 hücre 65,06 ton; 0,024 m	165 hücre 68,75 ton; 0,022 m
Kural 3						
	20 hücre 31,91 ton; 0,20 m	28 hücre 35,38 ton; 0,082 m	36 hücre 40,49 ton; 0,09 m	44 hücre 46,82 ton; 0,035 m	52 hücre 50,87 ton; 0,033 m	58 hücre 52,69 ton; 0,029 m
Kural 4						
	28 hücre 31,03 ton; 0,112 m	40 hücre 37,00 ton; 0,071 m	52 hücre 42,39 ton; 0,068 m	64 hücre 48,13 ton; 0,032 m	76 hücre 52,09 ton; 0,027 m	86 hücre 54,47 ton; 0,023 m

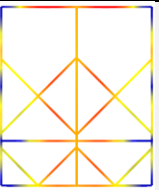
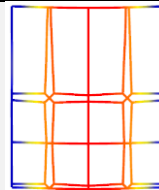
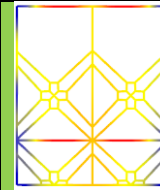
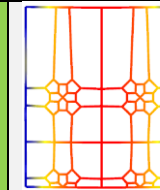
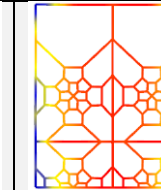
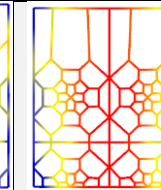
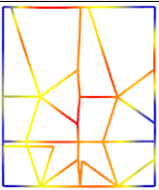
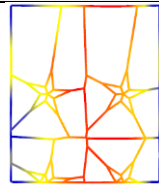
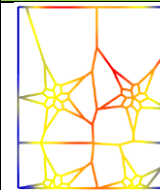
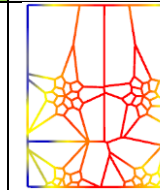
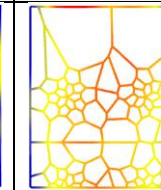
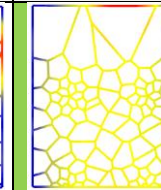
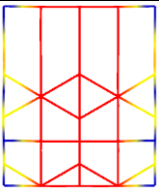
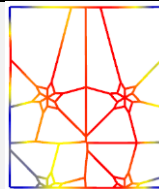
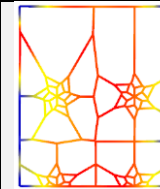

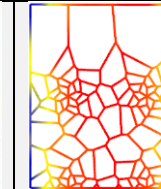
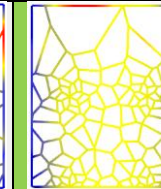
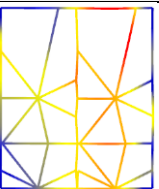
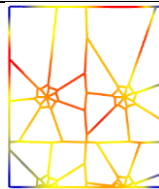
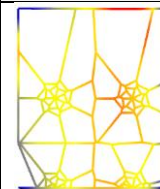
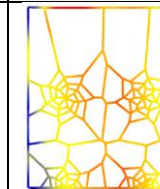
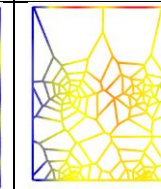
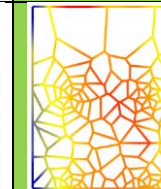
Hüresel özdevinim ile üretilen modeller değerlendirildiğinde;

- Nesiller arttıkça yapı ağırlığının arttığı görülmüştür. Genel olarak yapısal yer değiştirme bununla ters orantılı bir şekilde azalmıştır. Dolayısıyla en kararlı modeller 6. nesiller

olmuştur. Tüm kurallar için altıncı nesillerin en kararlı modeller olmasında, nesil sayısı arttıkça hücre boyutları arasındaki farkın giderek azalmasının etkili olduğu görülmüştür.

Şekil gramerleri ile üretilen desenlerin hücre sayıları, toplam yapı ağırlıkları ve yer değiştirme değerleri görselleri ile birlikte Çizelge 5.15’de yer almaktadır.

Çizelge 5.15. Şekil gramerleri ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri

ŞEKİL GRAMERLERİ						
	n:1	n:2	n:3	n:4	n:5	n:6
Kural 1						
	16 hücre 23,89 ton; 0,040 m	32 hücre 31,16 ton; 0,33 m	48 hücre 34,52 ton; 0,039 m	64 hücre 35,51 ton; 0,156 m	80 hücre 39,06 ton; 0,060 m	96 hücre 44,65 ton; 0,044 m
Kural 2						
	20 hücre 28,09 ton 0,15 m	40 hücre 30,60 ton; 0,13 m	60 hücre 34,31 ton; 0,109 m	80 hücre 39,22 ton; 0,071 m	100 hücre 42,71 ton; 0,062 m	120 hücre 46,86 ton; 0,057 m
Kural 3						
	24 hücre 27,40 ton 0,136 m	48 hücre 31,17 ton; 0,070 m	72 hücre 34,55 ton; 0,097 m	96 hücre 40,48 ton; 0,072 m	120 hücre 47,63 ton; 0,046 m	144 hücre 52,75 ton; 0,037 m
Kural 4						
	28 hücre 31,46 ton; 0,146 m	56 hücre 33,21 ton; 0,113 m	84 hücre 37,30 ton; 0,103	112 hücre 43,47 ton; 0,078 m	140 hücre 51,95 ton; 0,041 m	168 hücre 56,21 ton; 0,038 m

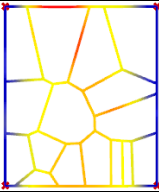
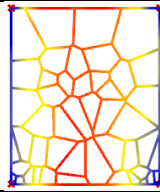
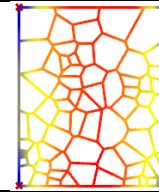
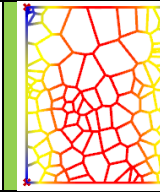
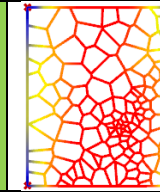
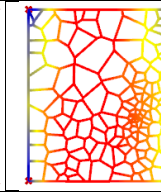
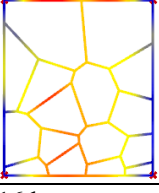
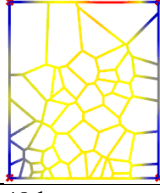
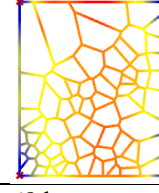
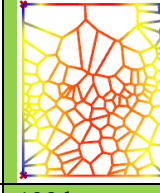
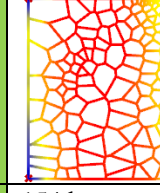
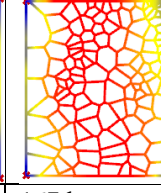
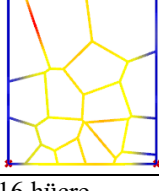
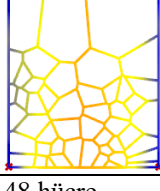
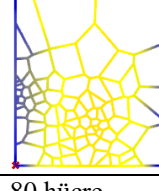
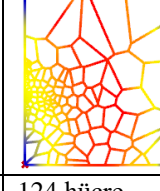
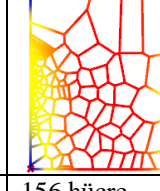
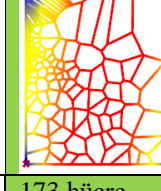
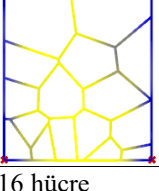
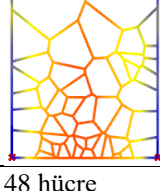
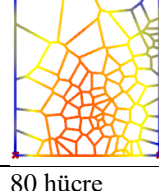
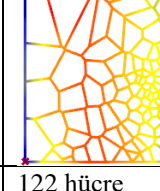
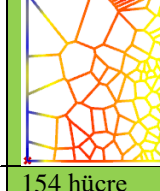
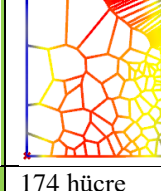
Şekil gramerleri ile üretilen modeller değerlendirildiğinde;

- Nesiller arttıkça yapı ağırlığının arttığı görülmüştür. Genel olarak yapısal yer değiştirme bununla ters orantılı bir şekilde azalmıştır. Dolayısıyla en kararlı modeller Kural 1

dışında 6. nesiller olmuştur. Kural 1 nesil 3 modelinin son nesile kıyasla daha iyi sonuç vermesinin sebebinin birbirine yakın mesafede ikişer çapraz profillerin varlığından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Böylelikle diğer en kararlı modeller arasında en düşük ağırlıktaki model olma özelliği taşımaktadır.

Sürü zekâsı ile üretilen desenlerin hücre sayıları, toplam yapı ağırlıkları ve yer değiştirme değerleri görselleri ile birlikte Çizelge 5.16'da yer almaktadır.

Çizelge 5.16. Sürü zekâsı ile üretilen Voronoi modellerin hücre sayıları ile ölü yük altındaki yapısal ağırlıkları (ton) ve maksimum yer değiştirme (m) değerleri

SÜRÜ ZEKÂSI						
	n:1	n:2	n:3	n:4	n:5	n:6
Kural 1						
	16 hücre 24,39 ton; 0,209 m	48 hücre 36,85 ton; 0,058	78 hücre 44,48 ton; 0,043 m	117 hücre 53,35 ton; 0,027 m	141 hücre 57,20 ton; 0,033 m	151 hücre 59,39 ton; 0,036 m
Kural 2						
	16 hücre 23,65 ton; 0,175 m	48 hücre 36,73 ton; 0,090 m	68 hücre 42,69 ton; 0,065 m	123 hücre 54,87 ton; 0,029 m	154 hücre 58,92 ton; 0,048 m	167 hücre 59,55 ton; 0,042 m
Kural 3						
	16 hücre 23,62 ton; 0,206 m	48 hücre 35,17 ton; 0,055 m	80 hücre 41,84 ton; 0,074 m	124 hücre 48,52 ton; 0,055 m	156 hücre 49,87 ton; 0,072 m	173 hücre 57,68 ton; 0,046 m
Kural 4						
	16 hücre 23,47 ton; 0,137 m	48 hücre 35,70 ton; 0,081 m	80 hücre 44,38 ton; 0,072 m	122 hücre 51,40 ton; 0,044 m	154 hücre 54,03 ton; 0,041 m	174 hücre 60,66 ton; 0,042 m

Sürü algoritması ile üretilen modeller değerlendirildiğinde;

- Nesiller arttıkça yapı ağırlığının arttığı görülmüştür. Genel olarak yapısal yer değiştirme bununla ters orantılı bir şekilde azalmıştır. En kararlı modeller 4, 5 veya 6. nesiller olmuştur. Bir ve ikinci kurala ait modellerde nesil arttıkça hücre yoğunluğunun mesnetlerden uzakta artmış olmasının kararlılığı olumsuz yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Bu sebeple son nesillere kıyasla dördüncü nesiller daha kararlı yapıda olmuştur.

Dört sisteme ait modeller değerlendirildiğinde;

- Genel olarak nesiller arttıkça yapı ağırlığı artmıştır. Yapısal yer değiştirmeler son nesillere doğru daha kararlı sonuçlar vermiştir. 1 ve 2. Nesiller en çok yapısal yer değişiminin olduğu modeller olmuştur. Yapının kararlılığını etkileyen unsurlar hücrelerin yoğunluğunun ve hücrelerin dengeli dağılımının etkili olduğu görülmüştür.

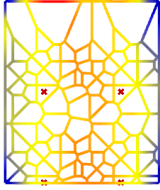
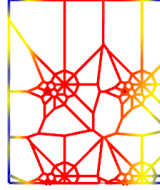
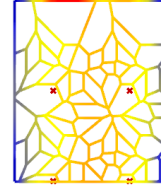
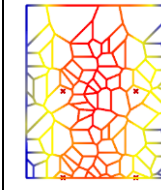
5.2.2. İkinci aşama: seçilen modellerin optimum malzeme özellikleri ile karşılaştırılması

Birinci aşamada her kural için en iyi yapısal yer değiştirme performansı gösteren modeller ikinci aşamada yapısal verimliliği değerlendirmek adına karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak en ideal davranışı sergileyen tasarımın uygulama alanında efektif çözümlenmesi ve tasarımcılar için *strüktür dizaynı bağlamında optimum sistem seviyesine ulaşabilmesi için yapı malzemelerinde farklı kesitler kullanılarak optimizasyon* yapılmıştır. Buradaki amaç optimal davranışlar altında sınır limitlere ulaşan modellerin malzeme kesitlerine bağlı olarak değişen yapı zati ağırlıklarına bakılarak çıkarımlarda bulunmaktır.

Modellerin değerlendirilmesi ve karşılaştırılması bağlamında yapısal ağırlık ve yapısal yer değiştirmelerin ele alındığı bir puanlama yapılmıştır. Yer değiştirme puanlaması ve yapı ağırlığının puanlaması desenler arasında en az değere 1; en yüksek değere (max) 4 puanı verilerek yapılmıştır.

Buna göre en fazla puanı alan kurala ait model, tablo içinde işaretlenmiştir. Aşağıda yer alan tablolarda sırasıyla LS (Çizelge 5.17), HÖ (Çizelge 5.18), ŞG (Çizelge 5.19) VE SZ (Çizelge 5.20) üretken sistem ile üretilen tüm Voronoi modellerin analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

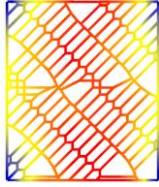
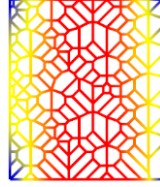
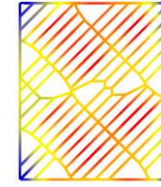
Çizelge 5.17. L- sistemler ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ve ölü yük altındaki yapısal performansları

Modele ait yapısal özellikler	Desen	Kural 1 nesil 5	Kural 2 nesil 6	Kural 3 nesil 5	Kural 4 nesil 6
					
Hücre sayısı / Çubuk uzunluğu(m)		108 / 262 m	164 / 265 m	84 / 230 m	116 / 260 m
Malzeme en kesiti		139.7*4	177.8*6.3	168.3*5	139.7*4
Yapı ağırlığı (ton)		35,09	70,62	46,37	34,87
Max yer değiştirme (m)		0,041	0,053	0,049	0,053
Yapı ağırlığına göre puanı		3	1	2	4
Yer değiştirmeye göre puanı		4	1	3	1
<i>Toplam puan</i>		7	2	5	5

L-sistemler ile üretilen optimum modeller değerlendirildiğinde;

- Kural 2'nin 6.nesine ait model sistem ağırlığı bakımından en yüksek seviyeye ulaşan yapı olmuştur. Ağırlık ve maliyetin doğru orantılı olması sebebi ile bu modelin ekonomik çözüm için iyi bir seçenek olmadığı söylenebilmektedir. Sistem ağırlığının en düşük seviyede olduğu modelin kural 4'in 6. nesline ait olduğu görülmüştür. Buradan hareketle en düşük maliyetli ve ekonomik çözümler sunan yapı sistemi bu model olmuştur.
- Hücre dağılım şekillerinin, benzer çubuk uzunluklarına sahip bu modeller arasında yapısal farklılıklar yaratmada kritik bir etken olduğu görülmüştür. Hücrelerin mesnetlerden cephenin merkezine kadar yoğunlaştığı modellerin yapısal stabilitesi daha düşük olmuştur. Diğer modellerle karşılaştırıldığında, toplam puanı en fazla olan kural 1 ile üretilen 5. nesil model daha dengeli bir hücre dağılımına sahip olması nedeniyle en iyi yapısal performansı göstermiştir.

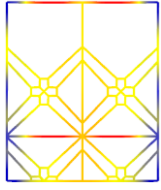
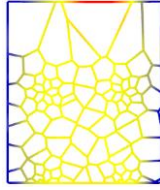
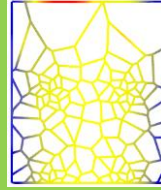
Çizelge 5.18. Hücresel özdevinim ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ve ölü yük altındaki yapısal performansları

Desen	Kural 1 nesil 6	Kural 2 nesil 6	Kural 3 nesil 6	Kural 4 nesil 6
	Modele ait yapısal özellikler			
Hücre sayısı / Çubuk uzunluğu(m)	112 / 298 m	165 / 341 m	58 / 261 m	86 / 270 m
Malzeme en kesiti	76.1*4	88.9*4	114.3*4	101.6*4
Yapı ağırlığı (ton)	21,25	28,59	28,47	26,04
Max yer değiştirme (m)	0,051	0,048	0,051	0,044
Yapı ağırlığına göre puanı	4	1	2	3
Yer değiştirmeye göre puanı	1	3	1	4
<i>Toplam puan</i>	5	4	3	7

Hücresel özdevinim ile üretilen optimum modeller değerlendirildiğinde;

- Kural 2'nin 6.nesline ait model sistem ağırlığı olarak en yüksek seviyeye ulaşan yapı olmuştur. Dolayısıyla bu model en fazla maliyete sahip olmaktadır. Sistem ağırlığının en düşük seviyede olduğu modelin kural 1'in 6. nesline ait olduğu görülmüştür. Buradan hareketle en düşük maliyetli ve ekonomik çözümler sunan yapı sistemi bu model olmaktadır.
- Tüm modeller için hücrelerin dengeli dağılımı söz konusu olduğu için, hücre sayısı ve çubukların toplam uzunluğu, modeller arasında yapısal farklılıklar yaratan belirleyici faktörler olmuştur. Toplam puanı en fazla olan kural 4'e ait 6. nesil model, diğer modellere kıyasla ortalama bir hücre ve çubuk uzunluğuna sahip olması nedeniyle en iyi yapısal performansı göstermiştir.


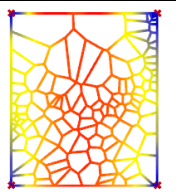
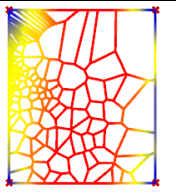
Çizelge 5.19. Şekil gramerleri ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ve ölü yük altındaki yapısal performansları

Desen	Kural 1 nesil 3	Kural 2 nesil 6	Kural 3 nesil 6	Kural 4 nesil 6
	Modele ait yapısal özellikler			
Hücre sayısı / Çubuk uzunluğu(m)	48 / 171 m	120 / 232 m	144 / 262 m	168 / 279 m
Malzeme en kesiti	139.7*4	177.8*6,3	139.7*4	139.7*4
Yapı ağırlığı (ton)	22,94	62,01	35,07	37,37
Max yer değiştirme (m)	0,052	0,052	0,045	0,046
Yapı ağırlığına göre puanı	4	1	3	2
Yer değiştirmeye göre puanı	1	1	4	3
<i>Toplam puan</i>	5	2	7	5

Şekil Grameri ile üretilen optimum modeller değerlendirildiğinde;

- Sistem ağırlığı olarak en yüksek seviyeye ulaşan, kural 2'nin 6.nesine ait model olmuştur. Bu sebeple en fazla maliyete sahip olan model olduğu söylenebilmektedir. Sistem ağırlığının en düşük seviyede olduğu modelin kural 1'in 3. nesline ait olduğu görülmüştür. Buradan hareketle en düşük maliyetli ve ekonomik çözümler sunan yapı sistemi bu model olmuştur.
- Hücrelerin mesnetlerden uzakta yoğunlaştığı bu modeller için hücrelerin dengeli dağılımı en iyi performansı göstermek için avantaj olmuştur. Bu sebeple toplam puanı en fazla olan kural 3'ten türetilen 6. nesil model dengeli düzende olmasının yanı sıra hücre boyutlarının benzer olması sebepleri ile en iyi yapısal performansı göstermiştir.

Çizelge 5.20. Sürü zekâsı ile üretilen en kararlı modellerin optimum malzeme özellikleri ve ölü yük altındaki yapısal performansları

Desen	Kural 1 nesil 4	Kural 2 nesil 4	Kural 3 nesil 6	Kural 4 nesil 5
	Modele ait yapısal özellikler			
Hücre sayısı / Çubuk uzunluğu(m)	117 / 264 m	123 / 272 m	173 / 286 m	154 / 268 m
Malzeme en kesiti	114.3*4	114.3*4	168.3*5	139.7*4
Yapı ağırlığı (ton)	28,82	29,65	57,68	35,92
Max yer değiştirme (m)	0,047	0,054	0,046	0,052
Yapı ağırlığına göre puanı	4	3	1	2
Yer değiştirmeye göre puanı	3	1	4	2
<i>Toplam puan</i>	7	4	5	4

Sürü Zekâsı ile üretilen optimum modeller değerlendirildiğinde;

- Kural 3'ün 6.nesline ait model sistem ağırlığı olarak en yüksek seviyeye ulaşan yapı olmuştur. Dolayısıyla en fazla maliyete sahip model olma özelliğindedir. Sistem ağırlığının en düşük seviyede olduğu model ise kural 1'in 4. nesline ait yapı olmuştur. Bu sebeple en düşük maliyetli yapı sisteminin bu model olduğu söylenebilmektedir.
- Benzer çubuk uzunluklarına sahip bu modeller arasında hücre dağılım şekillerinin, yapısal farklılıklar yaratmada kritik bir etken olduğu görülmüştür. Hücrelerin belli alanlarda sayısının yoğunlaştığı modeller daha kararsız yapısal performans göstermiştir. Diğer modellerle karşılaştırıldığında, kural 1 ile üretilen 4. nesil model daha düzenli bir hücre dağılımı nedeniyle en iyi yapısal performansı göstermiştir.

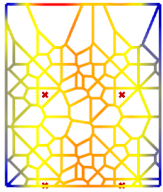
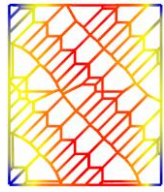
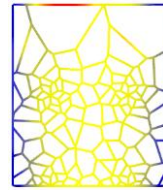
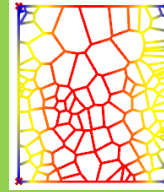
5.2.3. Üçüncü aşama: her sistemin en iyi modelinin farklı yüklerin etkisi altında yapısal davranışlarının karşılaştırılması

Önceki aşamada işaretlenen dört modele, üçüncü aşamada cam cephe kaplama ve rüzgâr yükleri de eklenerek uygulanabilirliğe yönelik gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Modelleri değerlendirmek adına yapısal yer değiştirme ve maksimum eğilme momentlerine bakılmıştır. Bu faktörler yapının bütünlüğünü ve kararlılığını etkilemektedir. Eğilme

momenti, yapısal bir elemana uygulanan ve bükülmesine neden olan bir kuvveti ifade etmektedir. Eğilme momentlerinin çok fazla olması yapısal elemanların arızalanmasına ve yapının çökmesine neden olabilmektedir. Bu değer, elemanın malzeme özelliklerine, kesit şekline ve boyutuna doğrudan bağlantılı olmaktadır.

Bu sebeple her üretken sistemin maksimum yapısal yer değiştirme ve maksimum eğilme momentlerinin ele alındığı bir puanlama sistemi yapılmıştır. Bu dört modele ait yapısal özellikler Çizelge 5.21’de yer almaktadır.

Çizelge 5.21. Her sistemin optimum modelinin farklı yükler altındaki yapısal performansları

Desen	L-SİSTEM	HÜCRESEL ÖZDEVİNİM	ŞEKİL GRAMERİ	SÜRÜ ZEKÂSI
	Kural 1 nesil 5	Kural 4 nesil 6	Kural 3 nesil 6	Kural 1 nesil 4
Modele ait yapısal özellikler				
Hücre sayısı / Çubuk uzunluğu(m)	108 / 262 m	86 / 270 m	144 / 262 m	117 / 264 m
Malzeme en kesiti	273*20	273*16	273*25	273*20
Yapı ağırlığı (ton)	327	275	327	331
Max yer değiştirme (m)	0,045	0,052	0,051	0,048
Max Eğilme Momenti	22,13	20,03	20,70	19,44
Yer değiştirmeye göre puanı	4	1	2	3
Max Eğilme Momentine göre puanı	1	3	2	4
<i>Toplam puan</i>	5	4	4	7

Her sistemin en verimli ve en iyi performansı gösteren modelinin yer aldığı tablodaki veriler değerlendirildiğinde;

- Toplam çubuk uzunlukları ve malzeme en kesitleri benzer olan bu modellerin geometrik düzenleri performanslarını belirleyen önemli bir unsur olmaktadır.
- SZ ile oluşturulan model maksimum yer değiştirme ve maksimum eğilme momenti değerleri düşük olması sebebi ile en yüksek puanı almaktadır. Model geometrisi incelendiğinde hücrelerin mesnetlere yakın bölgelerde yoğunlaştığı ve cephe alanı

içerisinde hücre büyüklüklerinin benzer olduğu görülmektedir. Bu durum modelin daha stabil ve dengeli olmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte modelin düzensiz hücre dağılımı, literatürde incelenen Voronoi cephe örneklerine benzerlik göstermektedir.

- Malzeme en kesitleri bakımından optimum olan bu modellerin uygulama maliyetine etkileri incelendiğinde SZ ile oluşturulan model en fazla ağırlığa dolayısıyla en fazla maliyete sahip olmaktadır. HÖ ile üretilen model ise en düşük maliyetli model olmaktadır. Yapı ağırlıkları aynı olan LS ve ŞG modelleri incelendiğinde ŞG ile üretilen modelde hücrelerin mesnetlerden uzakta yoğunlaşması, LS ile üretilen modelin ise cephe alanı içerisinde daha dengeli dağılması LS'nin yapısal kararlılığını olumlu etkilemektedir.
- Eğilme momenti değerleri bakımından en yüksek değere ŞG ile üretilen modelin ulaştığı görülmektedir. Hücrelerin mesnetlerde yoğunlaşması ve diğer modellere kıyasla hücre boyutları arasındaki farkın bu modelde daha fazla olması, eğilme momenti değerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu durum bu modelin kullanılması açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bina cepheleri, binaların iç ve dış mekanları arasında aracı olarak işlev görmektedirler. Bu bağlamda, cephenin görsel ve termal kontrolünü sağlamak, enerji tüketimini azaltmak gibi önemli görevleri bulunmaktadır. Ayrıca, cephe binanın kimliğini ve kentsel bağlamda yerini belirlemektedir. Geleneksel mimarlık literatürüne bakıldığında, süsleme bir yapının vazgeçilmez bir bileşeni olarak kabul edilmiştir. Bunun en önemli sebebi süsleme, bir yapının karakterini ve sosyal statüsünü belirleyen unsur olarak görülmüştür. Modernist akımda ise, süsleme fonksiyonsuz bir bileşen olarak algılanmıştır. Ancak son yıllarda, bilgisayar destekli tasarım ve üretim teknolojilerinin yaygınlaşması nedeniyle, süslemenin kullanımı yeniden popülerlik kazanmaya başlamıştır.

Mimari tasarım sürecinde organizma benzeri hücresel biçimlerin kullanılması, insan yapımı dünyanın doğa ile yakınsamasını sağlamakta ve cazip hale getirmektedir. Bu, sürdürülebilirlik açısından doğanın tehdit altındaki durumunun endişelerini azaltmaktadır. İçinde bulunduğumuz dijital dönemde, hedeflenen desenler matematik, hesaplama ve sanatın bir uyumu olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek teknolojinin sunduğu imkanlar sayesinde, karmaşık desenler oluşturmak kolaylaşmakta ve tasarımcıları doğadaki oluşumların süreçlerini anlamaya yöneltmektedir. İlham alınan doğal biçimler arasında, deriler, kristaller, protein kıvrımları, virüsler, mikroorganizmalar, damlalar, Voronoi hücreleri, Lindenmayer sistemleri, ağlar, sürüler gibi unsurlar bulunmaktadır.

Mimarların, Voronoi gibi hesaplamalı algoritmalara yönelmelerinin sebebi bu algoritmaların onlara daha esnek ve özgün tasarımlar oluşturma olanağı sağlamasıdır. Voronoi algoritması, belirli bir alan içerisindeki noktaların komşu noktalara olan mesafelerini hesaplayarak alanı alt alanlara bölmekte ve sonucunda birçok farklı desen ve formlar oluşturmaya olanak tanımaktadır. Bu, mimarların organizma benzeri biçimleri doğadakine benzer şekilde taklit etmelerine veya yaratmalarına yardımcı olmaktadır. Bu algoritmalar ayrıca, algoritmik tasarım yöntemleri ile uyumlu çalışarak, tasarımların değişkenliklerini değiştirmek veya optimize etmek için kolayca kullanılabilir. Bu algoritmalar ayrıca, algoritmik tasarım yöntemleri ile uyumlu çalışarak, tasarımların değişkenliklerini değiştirmek veya optimize etmek için kolayca kullanılabilir.

Bu bağlamda literatür kısmında, Voronoi ile üretilen cepheler, bu algoritmanın kullanımındaki sebepleri ve cephede uygulanma tipleri ile birlikte incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre spor merkezi, konut yapısı, hastane, sanat merkezi, müze ve eğitim yapıları

gibi pek çok farklı işleve sahip yapıda kullanılmaya başlanması ile günümüzde popülerliğinin giderek arttığı anlaşılmıştır. Ayrıca mimarlar tarafından genellikle binaların kullanım amacına uygun olarak veya modern bir estetik sunma amacı olarak kullanıldığı saptanmıştır. Aynı zamanda Voronoi cephe diyagramlarının, sadece rastgele üretilmediği, farklı algoritmalar ile de oluşturulabildiğine ulaşılmıştır. Bu bağlamda Voronoi cephelerin farklı yöntemlerle üretilmesine yönelik yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir. Sonuç olarak Voronoi'nin üretken sistemler ve farklı parametreler ile birlikte çalışma uyumu, tasarımsal kolaylığı, malzeme performansı ve yapısal uygunluğuna yönelik iyi sonuçların alındığı çalışmalar Voronoi'nin bu yöndeki potansiyelini pekiştirmektedir.

Voronoi diyagramlarının bina cephelerinde kullanımını konusunda yapılan literatür araştırması sonucunda, üretken sistemlerle birlikte ele alındığı çalışmaların yetersiz olduğu saptanmıştır. Bu amaç doğrultusunda üretken sistemler ile üretilen Voronoi diyagramlarının geometrik yapıları ve uygulama yöntemleri bakımından birbirleri ile arasındaki farklılıkların ortaya çıkarılması ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda mimaride en çok kullanılan üretken sistemler tespit edilmiştir. Çalışmada 1-sistemler, hücresel özdevinim, şekil gramerleri ve sürü zekâsı olmak üzere dört üretken sistem ele alınmıştır.

Alan çalışması kapsamında her üretken sistemin ayrı ayrı Voronoi desen ürettiği algoritmalar bilgisayar ortamında oluşturulmuş ve ardından modellerin yapısal davranışları simüle edilmiştir. Modelleme ve simülasyonlar Rhino programına entegre bir eklenti olan Grasshopper yazılımı ile yapılmıştır. Üretken sistemler sınırsız seçenek ile çeşitlendirilebilir özellikte olduğu için bir karşılaştırma sağlayabilmek adına daha önce ele alınmış olan kurallar referans alınarak sistem kararları alınmıştır. İki aşamalı gerçekleştirilen alan çalışmasının ilk aşaması desenleri üretmeyi ve bunların geometrik özelliklerini değerlendirmeyi içermektedir. Her sistem için 4 kural, her kural için 6 nesil desen üretilmiştir. Böylece değerlendirilmek üzere çok sayıda desen üretilmiştir. Üretken sistemlere ait kural ve nesiller değiştikçe desenlerin hücre büyüklük ve dağılım dengeleri ve hücre yoğunlukları gibi geometrik düzenlerine yönelik farklılaşmalar tespit edilmiştir.

Bununla birlikte bu sistemleri kullanan tasarımcıya düşen görevler karşılaştırılmıştır. Tasarımcının temelde algoritma okuma ve oluşturma bilgisine sahip olması gerektiği belirlenmiştir. Tasarımcının üretken sistemlere ait kuralların çalışma prensiplerine hâkim

olma durumu, desenlerin geometrik düzenlerini yönetmek açısından önemli bir unsur olduğu tespit edilmiştir.

İkinci aşamada üretilen tüm desenlere yapısal özellik kazandırılmış, elde edilen yapısal modeller üç aşamalı bir analiz sürecinden geçirilmiştir. Birinci aşamada modeller aynı malzeme en kesitine sahip olup ölü yük altındaki davranışları incelenmiştir. En iyi performansı gösteren modeller seçilerek ikinci aşamada farklı malzeme en kesitleri uygulanmıştır. En verimli dolayısıyla en ekonomik desenler seçilerek üçüncü aşamada uygulamaya yönelik gerçekçi sonuçlar almak adına farklı yükler altındaki yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan bu yöntem sayesinde yapısal olarak en iyi sonucu veren sistemi belirlemenin yanı sıra, en yüksek maliyete sahip modeli üreten ve yapısal olarak en kararsız modeli üreten sistemlerin tespitleri yapılmıştır.

Sonuç olarak kural dışında tüm değişkenler sınırlandırılmak suretiyle, kuralların da referans kaynaklar aracılığıyla seçilmesi koşulu ile üretken sistemlerin Voronoi desen üretmek bağlamında karşılaştırılabildiği görülmüştür. Kuralların ve nesillerin değişmesi ile oluşan desenlerin birbirinden farklı ve üretken sistemin özellikleri ile tutarlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Elde edilen yapısal analiz sonuçlarına göre desenlerin yapısal kararlılıkları ve maliyet konusunda verimlilikleri ile ilgili tespitler yapılmıştır.

Voronoi algoritmasının kullanımı ve üretken sistemlerin entegrasyonu ile cephe tasarımının ele alındığı bu çalışmada, üretken sistemlerin potansiyeli değerlendirilerek ve uygulanabilir cephe deseni üretmek, maliyeti optimize etmek gibi kriterler dikkate alınarak cephe tasarımı gerçekleştirilmiştir. Voronoi ile cephe üretimi konusunda gelecekteki çalışmalar için farkındalık oluşturmak istenmektedir. Gelecek çalışmalarda Voronoi cepheler üretmek amacıyla farklı üretken sistemler denenerek bu yöndeki potansiyeli daha fazla keşfedilebilir. Üretilecek desenlere ait geometrik düzenler denge, ritim, vurgu, kontrast gibi tasarım prensipleri bakımından daha fazla irdelenerek değerlendirilebilir. Genetik algoritmalar gibi farklı optimizasyon algoritmaları ile daha fazla desen varyasyonunun oluşturulduğu ve optimum çözümlerin arandığı çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Agirbas, A. (2019). Façade form-finding with swarm intelligence. *Automation in Construction*, 99, 140-151.
- Agkathidis, A. (2015). *Generative design: Form-finding techniques in architecture*. London: Laurence King Publishing, 14-18.
- Aish, R. (2005). *From Intuition to Precision, Education of Computer-aided Architectural Design in Europe*, eCAADe 23 Conference, Lisbon, Portugal, 10-14.
- Angelucci, G., and Mollaioli, F. (2018). Voronoi-like grid systems for tall buildings. *Frontiers in Built Environment*, 4, 78.
- Balik, D. and Allmer, A. (2016). A critical review of ornament in contemporary architectural theory and practice. *A/Z ITU Journal of the Faculty of Architecture*, 13(1), 157-169.
- Bathe, K. J. (2006). *Finite element procedures*. NJ:Prentice-Hall, 1-4.
- Baverel, O., Caron, J.-F., Tayeb, F. and Du Peloux, L. (2012). Gridshells in composite materials: construction of a 300 m² forum for the solidays' festival in Paris. *Structural Engineering International*, 22(3), 408-414.
- Bessa, M. (2009). Algorithmic design. *Architectural Design*, 79(1), 120-123.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. and Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*. NY:Oxford University Press, 1-14.
- Brzezicki, M. (2018). Classification of oblique grids in curtain walls: A case-study of design strategies in modular edge-panels. *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(1), 101-115.
- Burry, J. ve Burry, M. (2010). *The new mathematics of architecture*. London: Thames & Hudson, 77-81.
- Chan, H. L. (2009). *Patterning tectonics: the making of the forum on the Bund, Shanghai*, Doctoral thesis, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts.
- Coates, P., Derix, C., Krakhofer, I. S. P. and Karanouh, A. (2005). *Generating architectural spatial configurations. Two approaches using Voronoi tessellations and particle systems*. Proceedings of the VIII Generative Art International Conference (GA2005), Milan, 1-18.
- Coates, P., Healy, N., Lamb, C. and Voon, W. L. (1996). *The use of Cellular Automata to explore bottom up architectonic rules*. Eurographics Chapter 14th Annual Conference, UK, 26-28.
- Dimcic, M. (2011). *Structural optimization of grid shells based on genetic algorithms*. Doctoral thesis, University of Stuttgart, Stuttgart.

- Dinçer, A. E. (2014). *Hücresel Özdevinim Yaklaşımı ile Kitleli Konut Tasarımında Sayısal Bir Model*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- El-Khalidi, M. M. S. (2007). *Mapping boundaries of generative systems for design synthesis*. Doctoral thesis, Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts.
- Flake, G. W. (2001). The Computational Beauty of Nature. *Artificial Intelligence*, 128(1-2), 243-244.
- Fortune, S. (1995). *Handbook of Discrete and Computational Geometry: Voronoi diagrams and Delaunay triangulations*. (3rd Edition). FL: CRC Press, 705-721.
- Garcia, M. (2006). Prologue for a history and theory of architextiles. *Architectural Design*, 76(6), 12-20.
- Gardner, M. (1970). Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". *Scientific American*, 223, 120-123.
- Gawell, E. and Nowak, A. (2015). Voronoi tessellation in shaping the architectural form from flat rod structure. *PhD Interdisciplinary Journal*, 1, 47-55.
- Grobman, Y. J., Yezioro, A. and Capeluto, I. G. (2009). Computer-based form generation in architectural design—A critical review. *International Journal of Architectural Computing*, 7(4), 535-553.
- GROß, B., Bohnacker, H., Laub, J. and Lazzeroni, C. (2018). *Generative design: Visualize, program, and create with JavaScript in p5.js*. New York: Princeton Architectural Press, 244-247.
- Hedlund, G. A. (1969). Endomorphisms and automorphisms of the shift dynamical system. *Mathematical Systems Theory*, 3(4), 320-375.
- Henriques, G. C., Bueno, E. and Lenz, D. (2020). *Generative Systems: Intertwining Physical, Digital and Biological Processes, a Case Study*. Ecaade 37 / Sigradi 23 Conference, 1, 25-34.
- Herr, C. M. and Arch, D. (2002). *Generative Architectural Design and Complexity Theory*. 5th International Conference of Generative Art, Milan, Italy, 16, 1-13.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MA: MIT press, 161-170.
- İnternet: Expo 2005 İspanya pavyonu, WEB-1: <https://www.ceramicarchitectures.com/obras/spanish-pavilion-expo-2005>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.
- İnternet: Şanghai Expo 2010 Polonya Pavyonu, WEB-2: <https://www.de-zeen.com/2010/06/03/polish-pavilion-for-shanghai-expo-2010-by-wwaa-architects>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Dubai'de 0-14 binası, WEB-3: <https://www.archdaily.com/273404/o-14-reiser-umemoto>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Londra'da Ravensbourne Tasarım ve İletişim Koleji, WEB-4: <https://architizer.com/projects/ravensbourne-college-of-design-and-communication>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Voronoi ile düzenlenen peyzaj tasarımı, WEB-5: <http://architect-1.blogspot.com/2014/09/national-kaohsiung-performing-arts.html>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Melbourne Resital Merkezi, WEB-6: <https://armarchitecture.com.au/projects/melbourne-recital-centre>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Brüksel Frankofon Parlamentosu, WEB-7: <https://www.archdaily.com/524725/parlement-francophone-bruxellois-skope>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Marronnier Park, WEB-8: <https://www.archdaily.com/573853/marronnier-park-metaa>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Bristol Üniversitesi Fry Binası, WEB-9: <https://uckfieldnews.com/tag/giant-screen>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: KTÜ Araştırma Laboratuvarları, WEB-10: <https://solmazmetal.com.tr/projeler/ktu-arastirma-laboratuvari>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Water cube (Pekin Ulusal Su Sporları Merkezi), WEB-11: <https://www.dezeen.com/2008/02/06/watercube-by-chris-bosse>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Dr. Manuel Gea Gonzalez Hastanesi, WEB-12: <https://www.archilovers.com/projects/108136/facade-on-the-torre-de-especialidades.html#info>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: The spine binası, WEB-13: <https://workinmind.org/2020/04/06/project-profile-biophilic-design-principles-at-the-spine-building>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: HOTA Gallery (sanat galerisi), WEB-14: <https://www.australiandesignreview.com/architecture/arm-architecture-covers-new-hota-gallery-in-coloured-cellular-looking-web>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Cordoba Çağdaş Sanat Merkezi, WEB-15: <https://www.designboom.com/architecture/nieto-sobejano-arquitectos-contemporary-art-center-cordob>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: M24 Apartments (Konut yapısı), WEB-16: <https://armarchitecture.com.au/projects/m24-apartments>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Airspace Tokyo (Konut yapısı), WEB-17: <https://faulders-studio.com/AIRSPACE-TOKYO>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Alibaba genel merkezi, WEB-18: <https://www.archdaily.com/118277/alibaba-headquarters-hassell>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Hansmeyer'in L-sistem çalışmaları, WEB-19: <https://www.michael-hansmeyer.com/l-systems>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Grasshopper eklentisi, WEB-20: <https://www.grasshopper3d.com>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Rabbit eklentisi, WEB-21: <https://morphocode.com/rabbit>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: SortalGI eklentisi, WEB-22: <https://www.sortal.org/downloads/plugin.html>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Quelea eklentisi, WEB-23: <https://www.alexjfisher.com/portfolio/quelea>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

İnternet: Bristol Üniversitesi Fry Binası, WEB-24: <https://www.hydrorock.com/news/milestone-reached-university-bristols-fry-building-transformation>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2023.

Iuorio, O. and Sanctis, H. (2017). *A parametric investigation into the development of cold formed steel free form grid shells*. Proceedings of IASS Annual Symposia, Hamburg, 1-10.

Kardasis, A. (2011). *The Soft Grid*. Massachusetts Institute of Technology. Doctoral thesis, Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts.

Khabazi, Z. (2012). *Generative Algorithms (using Grasshopper)*. London: morphogenesisism, 2-4.

Khoraskani, R., Kazemi, P. and Tahsildoost, M. (2018). *Adaptation of Hyperboloid Structure for High-Rise Buildings with Exoskeleton*. 5th International Conference S.ARCH-2018, Venice, Italy, 1-10.

Knight, T. and Stiny, G. (2001). Classical and non-classical computation. *Arq: Architectural Research Quarterly*, 5(4), 355-372.

Knight, T. W. (1994). Shape grammars and color grammars in design. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(6), 705-735.

Kolarevic, B. *Designing and Manufacturing Architecture in the digital age*. Architectural Information Management, Proceedings of the 19th eCAADe Conference, Helsinki, Finland, 117-123.

- Koning, H. and Eizenberg, J. (1981). The language of the prairie: Frank Lloyd Wright's prairie houses. *Environment and planning B: planning and design*, 8(3), 295-323.
- Kotnik, T. (2010). Digital architectural design as exploration of computable functions. *International Journal of Architectural Computing*, 8(1), 1-16.
- Krawczyk, R. J. (2002). *Experiments in Architectural Form Generation Using Cellular Automata*. eCAADe 2002 Conference. Warsaw, Poland, September.
- Leach, N. (2009). Digital morphogenesis. *Architectural Design*, 79(1), 32-37.
- Leitão, A., Santos, L. and Lopes, J. (2012). Programming languages for generative design: a comparative study. *International Journal of Architectural Computing*, 10(1), 139-162.
- Liew, H. (2002). *Descriptive conventions for shape grammars*. Proceedings of the 2002 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design In Architecture, Pomona, 365-378.
- Macy, M. W. ve Willer, R. (2002). From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling. *Annual Review of Sociology*, 143-166.
- Mccormack, J., Dorin, A. and Innocent, T. (2004). *Generative design : a paradigm for design research*. Proceedings of Futureground, Design Research Society, Melbourne.
- Meibodi, M.A (2016). *Generative design exploration: Computation and material practice*. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Mele, E., Fraldi, M., Montuori, G. M. and Perrella, G. (2016). *Non-conventional Structural Patterns for Tall Buildings : from Diagrid to Hexagrid and Beyond*. Fifth International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering, Rome.
- Miller, K. (2011). *Organized Crime : The Role of Ornament in Contemporary Architecture*, Parametricism (SPC) ACADIA Regional 2011 Conference, 67-73.
- Mitchell, W. J., Liggett, R. S. and Tan, M. (1990). Top-down knowledge-based design. *The Electronic Design Studio*, 137-148.
- Moussavi, F. and Kubo, M. (2006). *The Function of Ornament*. Barcelona: Actar, 6-11.
- Mutlu Avinç, G. ve Arslan Selçuk, S. (2020). Geçmişten Günümüze Yapı Tasarımında Doğa Temelli Paradigmat Değişimler. *Gelenekselden Moderne Yapı Tasarımı ve Malzemesi*, Ankara: Iksad Publishing House, 3-38.
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. and Chiu, S. N. (2000). *Spatial tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. Chichester: John Wiley & Sons, 1-116.
- Opel, A. (1998). *Adolf Loos: Ornament and Crime: Selected Essays*. (Trans: M. Mitchell). CA: Ariadne Press, 165-176,

- Oxman, R. (2006). Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), 229-265.
- Oxman, R. (2008). Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. *Design Studies*, 29(2), 99-120.
- Oxman, R. and Oxman, R. (2010). New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*, 80(4), 14-23.
- Picon, A. (2013). *Ornament: The politics of architecture and subjectivity*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 129-155.
- Preisinger, C. (2013). Linking structure and parametric geometry. *Architectural Design*, 83(2), 110-113.
- Prusinkiewicz, P. and Lindenmayer, A. (2012). *The Algorithmic Beauty of Plants*. New York: Springer, 1-35.
- Reynolds, C. W. (1987). Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics*, 21(4), 25-34.
- Rokicki, W. and Gawell, E. (2016). Voronoi diagrams – architectural and structural rod structure research model optimization. *MAZOWSZE Studia Regionalne*, (19), 155-164.
- Ronnett, M. and Abdullah, A. (2010). Cell Wall: Resolving Geometrical Complexities. *Perkins & Will Research Journal*, 2(1), 7-21.
- Schumacher, P. (2007). Arguing for elegance. *Architectural Design*, 77(1), 28-37.
- Schumacher, P. (2009). Parametric Patterns. *Architectural Design*, 79(6), 28-41.
- Schumacher, P. (2015). *The Routledge Companion for Architecture Design and Practice*, NY: Routledge, 35-52.
- Sendi, M. (2016). The Effect of Technology to Integrate Aesthetic Desire of Contemporary Architecture with Environmental Principles in Façade Design. *International Scientific Journal Architecture and Engineering*, 7, 24-31.
- Serrato-Combe, A. (2005). *Lindenmayer systems—experimenting with software string rewriting as an assist to the study and generation of architectural form*. Proceedings of the 9th Iberoamerican Congress of Digital Graphics. SIGRADI, Lima, 1-166.
- Singh, V. and Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design Studies*, 33(2), 185-207.
- Smith, A. R. (1984). Plants, fractals, and formal languages. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 18(3), 1-10.
- Snooks, R. (2014). *Behavioral formation: multi-agent algorithmic design strategies*. Doctoral thesis, RMIT University, Melbourne.

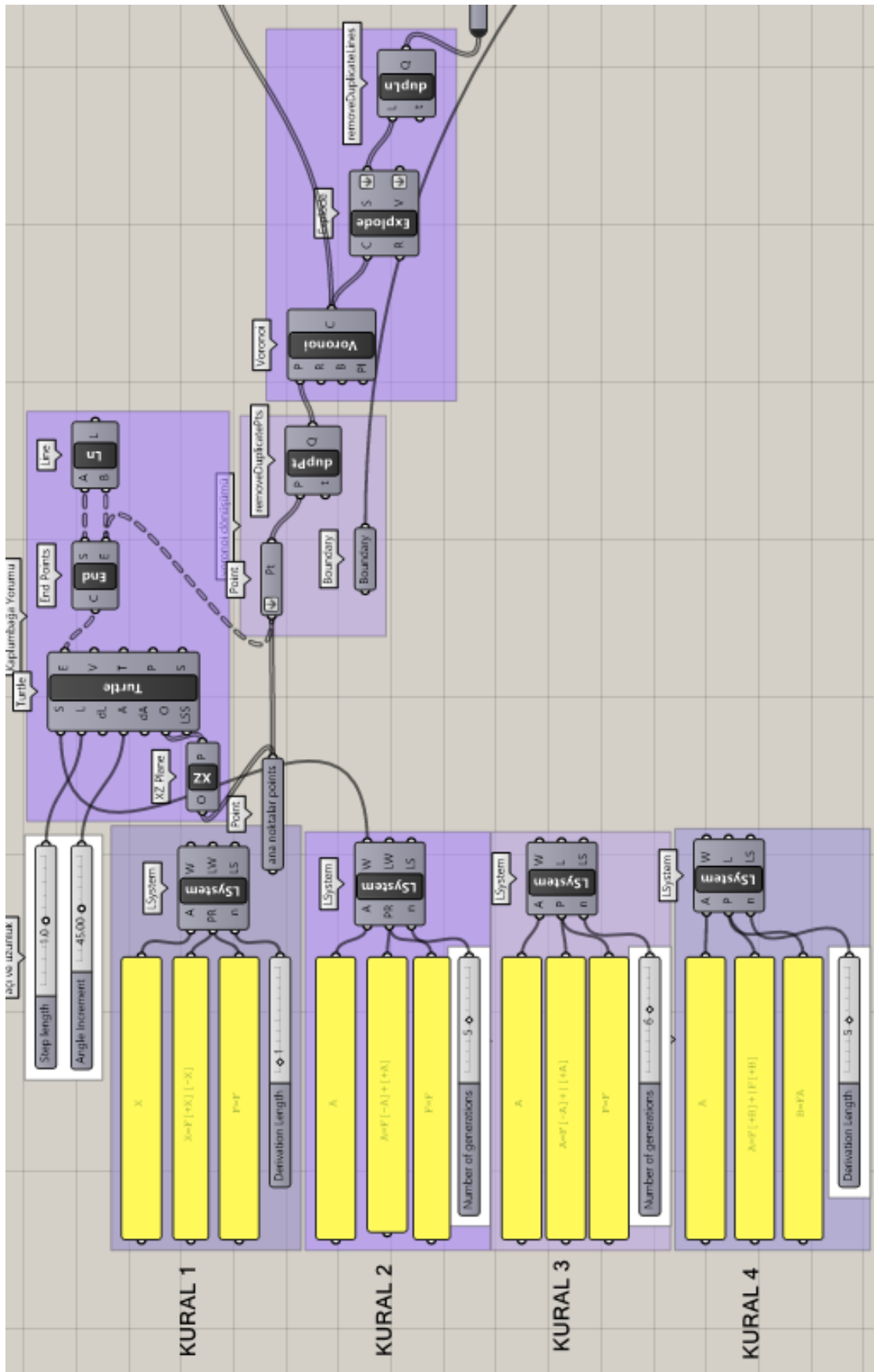
- Stiny, G. (1976). Two exercises in formal composition. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 3(2), 187-210.
- Stiny, G. (1980). Introduction to shape and shape grammars. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 7(3), 343-351.
- Stiny, G. and Gips, J. (1971). *Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture*. Proceedings of IFIP Congress 71, 2, 1460-1465.
- Stiny, G. and Mitchell, W. J. (1980). The grammar of paradise: on the generation of Mughul gardens. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 7(2), 209-226.
- Terzidis, K. (2006). *Algorithmic Architecture*. Oxford: Architectural Press, 1-105.
- Terzidis, K. (2008). Algorithmic Complexity: Out of Nowhere. *Complexity. Design Strategy and World View*, Ed. Gleiniger, Andrea y Vrachliotis, Georg, Birkhäuser Verlag AG, Berlin.
- Torghabehi, O. O. and von Buelow, P. (2014). *Genetic based form exploration of mid-rise structures using cell morphologies*. D. Gerbe ve R. Goldstein (Ed.), In Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design, Society for Computer Simulation International, 85-90.
- Tsiliakos, M. (2012). *Swarm Materiality: A multi-agent approach to stress driven material organization*. Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe Conference, 1, 301-309.
- van Eck, C. A. (2009). Figuration, tectonics and animism in Semper's Der Stil. *Journal of Architecture*, 14(3), 325-337.
- von Neuman, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana: University of Illinois Press, 64-87.
- Wallin, D. and Wasberg, M. (2016). *Parametric design of building structures in cooperation with architects: Usage and evaluation of structural plug-ins in 3D visualisation software*. Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science: 12- The Principle of Computational Equivalence*. Tokyo: Wolfram Media, 715-1197.
- Yazar, T. (2015). Design of dataflow. *Nexus Network Journal*, 17, 311-325.
- Zawidzki, M. (2009). Implementing cellular automata for dynamically shading a building facade. *Complex Systems*, 18(3), 287.

EKLER

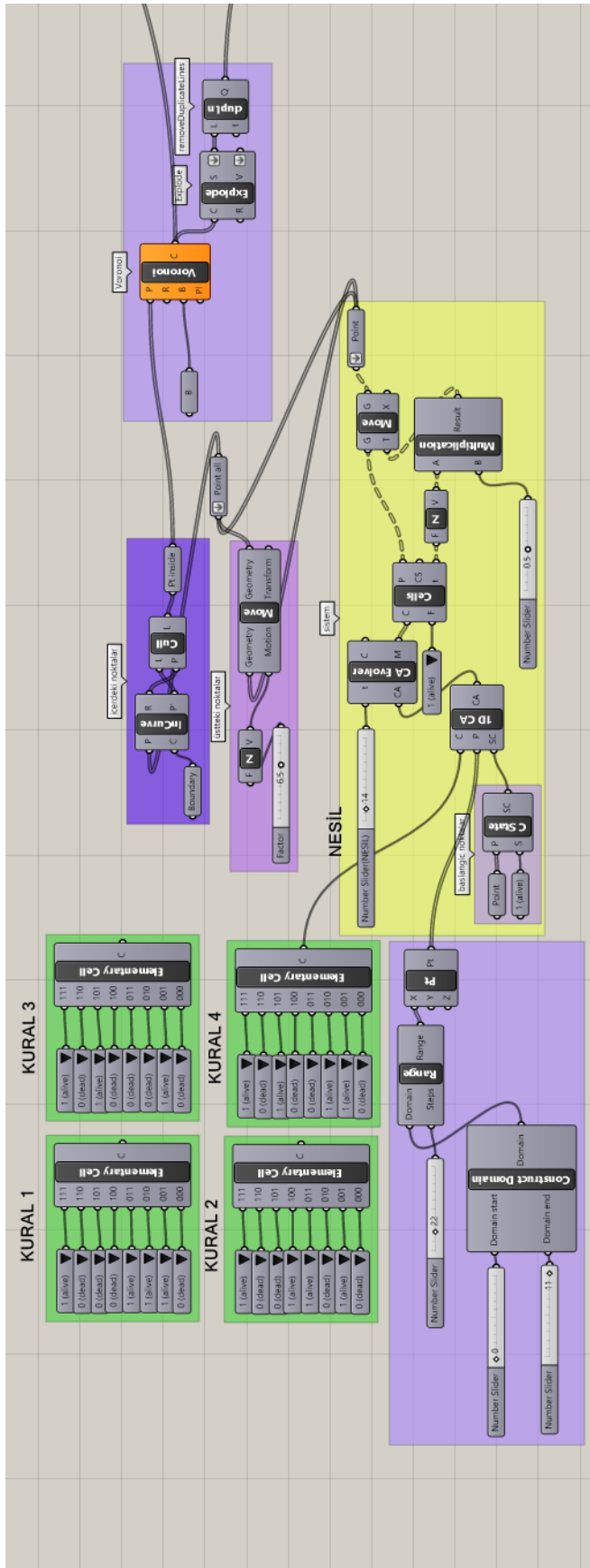
EK- 1. L-sistem kurallara ait aksiyom, talimatlar ve bunlardan üretilen nesil dizileri

KURAL 1			
Aksiyom	A	Talimatlar	<ul style="list-style-type: none"> • $A=F [-A] [+A]$ • $F=F$
Nesiller			
1. $F[-A][+A]$ 2. $F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]$ 3. $F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]$ 4. $F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]$ 5. $F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]$ 6. $F[-F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]]]$			
KURAL 2			
Aksiyom	A	Talimatlar	<ul style="list-style-type: none"> • $A=F [-A] + [+A]$ • $F=F$
Nesiller			
7. $F[-A][+A]$ 8. $F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]$ 9. $F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]$ 10. $F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]$ 11. $F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]]]$ 12. $F[-F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]][+F[-F[-F[-F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]][+F[-F[-A][+A]][+F[-A][+A]]]]]]]]]$			

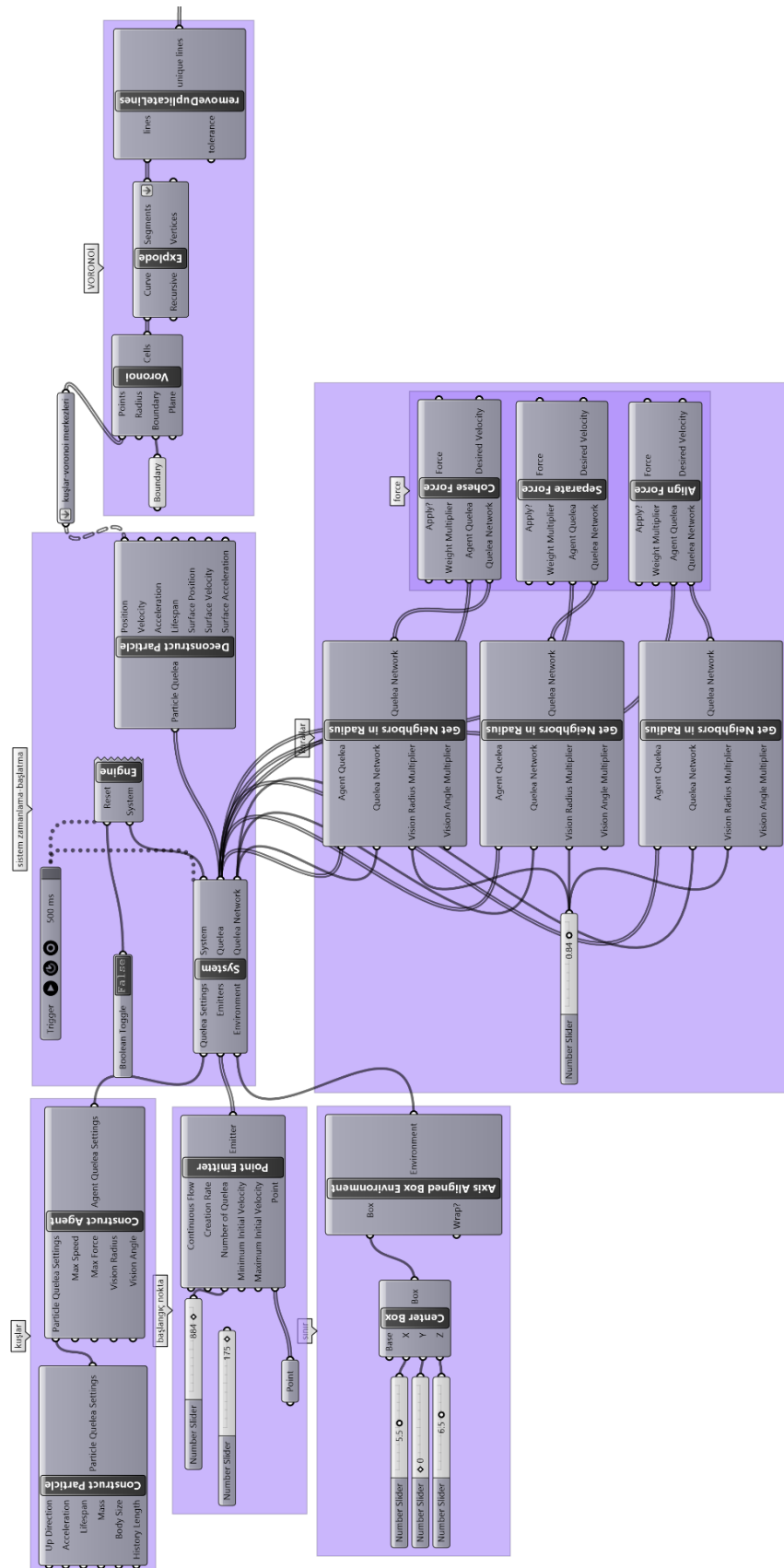
EK- 2. L-sistem ile Voronoi desen üretmeyi sağlayan, Grasshopper ortamında oluşturulan algoritma



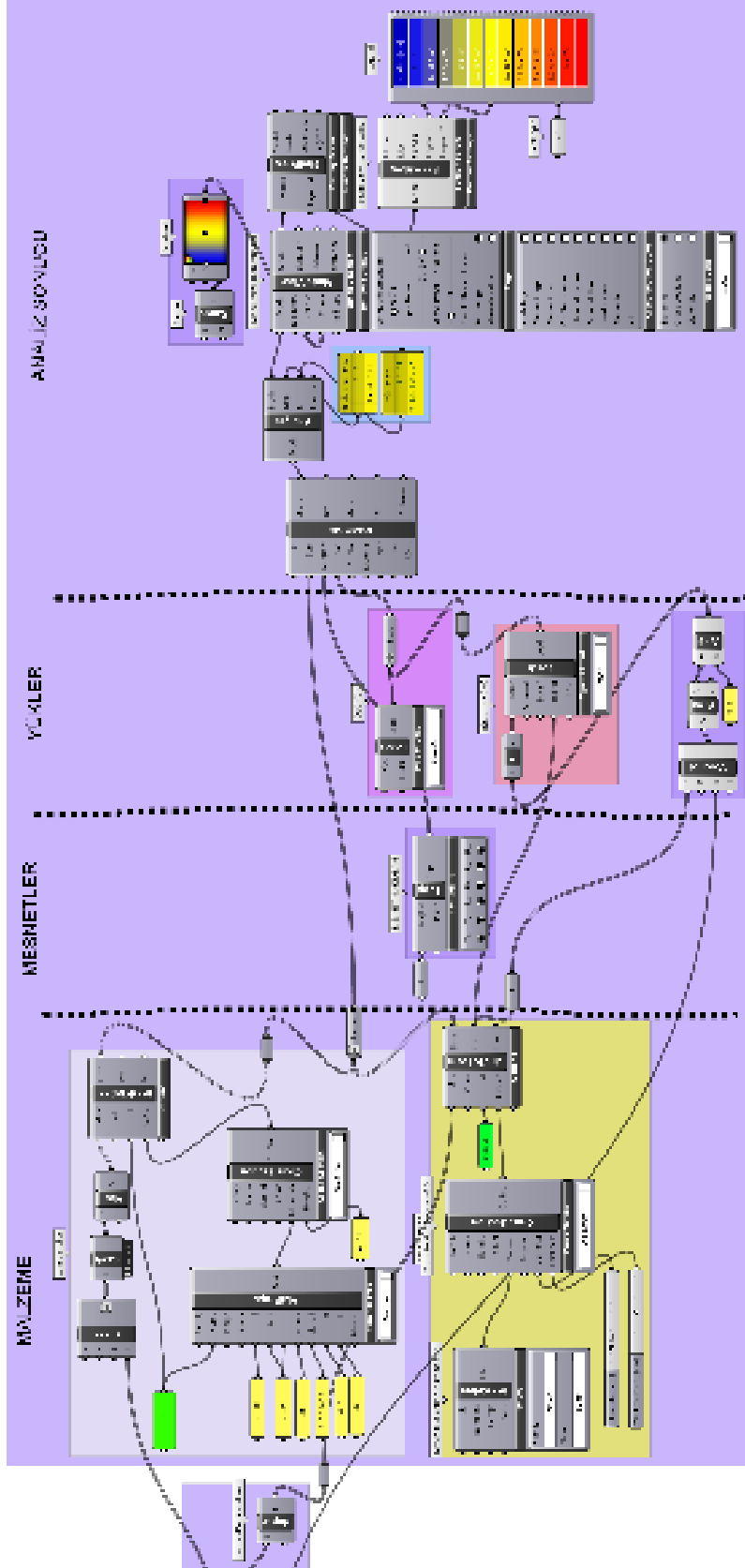
EK- 3. Hücresel özdevinim ile Voronoi desen üretmeyi sağlayan, Grasshopper ortamında oluşturulan algoritma



EK- 5. Sürü zekası ile Voronoi desen üretmeyi sağlayan, Grasshopper ortamında oluşturulan algoritma



EK- 6. Karamba ile oluşturulan yapısal analizi sağlayan, Grasshopper ortamında oluşturulan algoritma





Gazili olmak ayrıcalıktır