

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIMDA YENİDEN YAPILANDIRMA
SÜREÇLERİ İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE**



DOKTORA TEZİ

Hülya ORAL KARAKOÇ

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

ARALIK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIMDA YENİDEN YAPILANDIRMA
SÜREÇLERİ İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE**

DOKTORA TEZİ

**Hülya ORAL KARAKOÇ
(523152012)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Meryem Birgül ÇOLAKOĞLU

ARALIK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 523152012 numaralı Doktora Öğrencisi Hülya ORAL KARAKOÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIMDA YENİDEN YAPILANDIRMA SÜREÇLERİ İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Birgül ÇOLAKOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Leman Figen GÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdurrahman Tuğrul YAZAR
İstanbul Bilgi Üniversitesi

Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Emre İLAL
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **03 Kasım 2021**
Savunma Tarihi : **15 Aralık 2021**





Aileme,



ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca değerli görüş ve katkılarını paylaşarak tezimin bu aşamaya gelmesinde büyük payı olan, her zaman anlayışlı ve hoşgörülü yaklaşımıyla beni motive eden çok değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Meryem Birgül ÇOLAKOĞLU'na;

Değerli zamanlarını ayırarak, yapıcı eleştiri ve önerileriyle tez sürecime katkıda bulunan ve tez konuma farklı açılardan bakmamı sağlayan tez izleme komitesi hocalarım Sayın Prof. Dr. Leman Figen GÜL'e ve Sayın Prof. Dr. Abdurrahman Tuğrul YAZAR'a;

Değerli yorumları ile tezimin son haline getirilmesinde büyük rolü olan, tez savunma jürisindeki hocalarım Sayın Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER'e ve Sayın Prof. Dr. Mustafa Emre İLAL'e;

Yüksek Lisans ve Doktora eğitimim boyunca fikri ve manevi desteğini esirgemeyen ve farklı bakış açısıyla fikirlerimin olgunlaşma sürecine katkıda bulunan eşim ve meslektaşım Dr. Erhan KARAKOÇ'a; tezimin teknik açıdan gelişmesine büyük katkısı olan elektronik ve haberleşme mühendisi İlhan KARAKOÇ'a;

Eğitim hayatım boyunca manevi desteklerini hep hissettiğim anneme, babama ve kardeşlerime;

Bu süreçte katkılarını ve desteklerini esirgemeyen herkese;

Sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2021

Hülya ORAL KARAKOÇ
(Y. Mimar)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı, Kapsam ve İçeriği.....	4
1.2 Tezin Yöntemi.....	7
1.3 Özgün Değer ve Yaygın Etki	11
2. YAPMA BİÇİMLERİNİN DÖNÜŞÜMÜ.....	13
2.1 Kural Tabanlı Üretim: Yapım Gramerleri.....	17
2.2 Zanaata Dayalı Kurallı Üretim: Dijital Zanaat.....	20
2.3 Ortamın Dönüşümü: Yeni Bilgi Paylaşım Kanalları.....	23
2.4 Araçların Dönüşümü: Rijit Araçlardan Esnek Araçlara.....	26
2.4.1 Esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar	30
2.4.1.1 Pim tabanlı araçlar.....	34
2.4.1.2 Bileşen tabanlı araçlar	37
2.4.1.3 Polimer ve kumaş tabanlı araçlar	39
2.4.1.4 Gelecek çalışmaları ve araştırma açığı.....	41
2.4.2 Kil biçimlendirme araçları	44
3. FİZİKSEL ARAÇ DÖNÜŞÜMÜ: YENİDEN-YAPILANDIRILABİLİR EKSTRÜZYON ARAÇI (YEA)	49
3.1 Ekstrüzyona Dayalı Tasarımda Fiziksel Araçlar.....	50
3.1.1 Ekstrüzyon aracı (EA).....	50
3.1.2 Yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracı (YEA).....	52
3.2 Ekstrüzyona Dayalı Araç ile Yapılan Denemeler ve Üretilen Biçimler	59
3.3 Ön Değerlendirme	61
3.3.1 Değerlendirme yöntemi.....	62
3.3.2 Üretilen biçimlerin değerlendirilmesi	64
3.3.2.1 Üretim sürelerinin karşılaştırılması.....	66
3.3.2.2 Kalıpların karşılaştırılması	66
3.3.2.3 Kural setlerinin karşılaştırılması	67
3.3.3 YEA'nın potansiyelleri ve kısıtları	69
3.3.3.1 Aracın yeniden-yapılandırılma derecesi	70
3.3.3.2 Aracın prototipleme açısından değerlendirilmesi	72
3.3.3.3 Aracın kurulum sürümlerinin değerlendirilmesi.....	73

4. DİJİTAL ARAÇ DÖNÜŞÜMÜ: EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIM GRAMERİ (EdYG).....	75
4.1 Ekstrüzyon Aracı ile Fiziksel Denemeler.....	76
4.1.1 Malzeme ve biçim ilişkisi	76
4.1.2 Kalıp-arac başlığı ve biçim ilişkisi.....	77
4.1.2.1 Kalıp kombinasyonları	78
4.1.2.2 Kalıp-arac başlığı hareketi ve biçim ilişkisi.....	80
4.1.2.3 Eş zamanlı kuralların uygulanması ve biçim ilişkisi.....	82
4.1.3 Kesici ve kılavuz yüzey ile biçim ilişkisi.....	83
4.2 Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri (EdYG) ile Denemeler.....	85
4.2.1 Dijital ortamda yapım grameri ve baz biçim geliştirilmesi.....	88
4.2.2 Fiziksel ortamda yapım grameri.....	89
4.3 Üretilen Biçimlerin Değerlendirilmesi	89
4.4 EdYG'nin Potansiyelleri ve Kısıtları.....	92
4.4.1 Kalıpların karşılaştırılması	92
4.4.2 Kural setlerinin karşılaştırılması	94
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	97
5.1 Yeniden-yapılandırılabilir Araç Geliştirme.....	97
5.2 Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri	98
5.3 Değerlendirme Yönteminin ve Bulguların Analizi	99
5.4 Dijital Zanaat Açısından Geliştirilen Yönteme ait Bulgular	101
5.5 Yöntemin Potansiyelleri ve Kısıtları ile Gelecek Senaryoları.....	102
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	125

KISALTMALAR

2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ	: Bilgisayar Destekli Üretim
EA	: Ekstrüzyon Aracı
EdYG	: Ekstrüzyona dayalı Yapım Grameri
EİS	: Esnek İmalat Sistemi
GH	: Grasshopper
KB	: Kitlesele Bireyselleştirme
MMİ	: Mimarlık, Mühendislik ve İnşaat
SÜ	: Seri Üretim
SY	: Saat Yönü
SYT	: Saat Yönünün Tersı
YEA	: Yeniden-yapılandırılabilir Ekstrüzyon Aracı
YİS	: Yeniden-yapılandırılabilir İmalat Sistemi



SEMBOLLER

A : Amper

° : Derece

Rpm : Revolutions per minute (dakikadaki devir sayısı)

Tork : Kuvvet momenti

V : Volt





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Araştırma soruları ve yöntem.	10
Çizelge 2.1 : Literatürde yer alan fiziksel gramer örnekleri.	18
Çizelge 2.2 : Kullanılan anahtar kelimeler ile aramanın daraltılması.	33
Çizelge 2.3 : Pim tabanlı araçlar.	35
Çizelge 2.4 : Bileşen tabanlı araçlar.	37
Çizelge 2.5 : Polimer ve kumaş tabanlı araçlar.	39
Çizelge 3.1 : Araç kurulumlarının 3B yazıcı ile kıyaslanması. (*2020 yılının birim fiyatları esas alınarak hesaplanmıştır).	70
Çizelge A.1 : EA ve YEA ile üretilen biçimlerin karşılaştırılması.	118
Çizelge A.2 : Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinin değerlendirilmesi.	119
Çizelge A.3 : Kural seti, kalıp ve sapma değerleri ilişkisi.	120



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tezin kapsamı.	6
Şekil 1.2 : Tezde izlenen yöntem.....	8
Şekil 2.1 : Üretim paradigmasının değişimi.	14
Şekil 2.2 : Pratik öğretimin mekânsal değişimi (Celani, 2012).....	24
Şekil 2.3 : Dijital fabrikasyon yöntemleri: eksiltmeli, eklemeli, biçimlendirici (URL-1, URL-2, URL-3, URL-4).....	28
Şekil 2.4 : Sistematik haritalama yöntemi (Petersen ve diğ., 2008).....	32
Şekil 2.5 : Sınıflandırma algoritmasını gösteren akış diyagramı.....	33
Şekil 2.6 : Pim tabanlı sistem konsepti (Raun & Kirkegaard, 2012).....	34
Şekil 2.7 : Uyarlanabilir bileşenlere sahip mekanizma (Khabazi & Budig, 2016)....	38
Şekil 2.8 : Robot kolu ile kontrol edilen Rotoforming mekanizması (Tessmann & Mehdizadeh, 2019).....	40
Şekil 2.9 : Manuel ekstrüzyon mekanizması (Mussi, t.y.).....	45
Şekil 2.10 : Kil biçimlendirmede kullanılan manuel ve otomatik ekstrüder örnekleri. (a) Duvara monte edilen manuel kil ekstrüderi (URL-6) (b)(c) Anton Alvarez'in geliştirdiği otomatik kil ekstrüderi ve üretilen biçim (Alvarez, 2016.) (d)(e) Peter Webb'in tasarladığı kılavuz ve üretilen biçim (URL-7; URL-8) (f)(g) California College of the Arts'da 2012 yılında Architecture and Ceramics departmanında bir stüdyo kapsamında geliştirilen kalıp ve üretilen biçim (Stein & Swaine, 2012).	46
Şekil 2.11 : El ile kavranabilen kil ekstrüder örnekleri. (a) (b) (c) Düşey presleme mekanizmasına sahip araçlar (URL-9; URL-10) (d) Vidalı presleme mekanizmasına sahip araç (URL-11).	47
Şekil 3.1 : Dijital ve fiziksel ortamda aracın bileşenlerine bağlı olarak geliştirilmiş sürecin akış şeması.	50
Şekil 3.2 : Manuel araca ait bileşenler ve kalıplar.....	51
Şekil 3.3 : Yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme.....	53
Şekil 3.4 : Manuel araçtan uyarlanan ve araca eklenen parametreler.....	54
Şekil 3.5 : Araca ait bileşenler ve hareket yönleri.	55
Şekil 3.6 : Elektro-mekanik aracın bağlantı şeması.....	56
Şekil 3.7 : YEA ile ekstrüze edilmiş biçim.	58
Şekil 3.8 : Araca bağlı biçim türetme parametreleri.....	58
Şekil 3.9: YEA'nın kurulum adımları.	60
Şekil 3.10 : El ile üretilen farklı başlık ve kalıplar.	60
Şekil 3.11 : Araç başlığını döndürme işlemi için geliştirilen kasnak-mil bileşeni. ...	61
Şekil 3.12 : Göreceli Konumlandırma Yöntemine göre oluşturulan ölçüm düzeneği.	63
Şekil 3.13 : 3DF Zephyr Aerial yazılımı ile dijital model oluşturma.....	64
Şekil 3.14 : Manuel ve hibrit araç ile üretilen biçimler.	65
Şekil 3.15 : Kalıpların karşılaştırılması.	67
Şekil 3.16 : Kural setlerinin karşılaştırılması.	68

Şekil 3.17 : İki farklı yükseklikteki biçimlerin karşılaştırılması.	69
Şekil 4.1 : Farklı malzemelerdeki yüzey deformasyonları.	77
Şekil 4.2 : Kalıp-arac başlığı bileşenine bağlı keşifler.	78
Şekil 4.3 : Tasarlanan ve 3B yazıcı ile üretilen kalıp denemeleri.....	79
Şekil 4.4 : Kalıp kombinasyonları ile üretilen biçimler.....	80
Şekil 4.5 : Tekli ve çoklu kalıplar ve hareketli araç başlığı ile üretilen biçimler.	81
Şekil 4.6 : Kalıp değiştirme kural seti ile ortaya çıkan biçimler.....	82
Şekil 4.7 : Farklı presleme ve döndürme kural setlerinin biçime olan etkisi.....	83
Şekil 4.8 : Farklı kesim biçimleri ile ortaya çıkan birleşim detayları.....	84
Şekil 4.9 : Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri (EdYG).	87
Şekil 4.10 : Tek bir kalıp ve farklı kural setleri aracılığıyla elde edilen biçimler.	88
Şekil 4.11 : Final değerlendirmesi için üretilen biçimler.....	90
Şekil 4.12 : Dijital ve fiziksel çıktıların karşılaştırılmasında kullanılan ölçütler.	91
Şekil 4.13 : Kalıp alanı ve birim zamanda basılan malzeme ilişkisi.	93
Şekil 4.14 : Kalıpların karşılaştırılması.	93
Şekil 4.15 : Kural setlerinin karşılaştırılması.....	94
Şekil B.1: Ekstrüzyona dayalı yapım gramerine ait GH kodu.....	121
Şekil B.2 : Toplam yüzey sapması değerinin ve eğilme açısının hesaplanması.....	123
Şekil B.3 : Orta nokta sapması, ideal kalıp kesiti ve açısal sapmanın hesaplanması.	123

EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIMDA YENİDEN YAPILANDIRMA SÜREÇLERİ İÇİN KAVRAMSAL BİR ÇERÇEVE

ÖZET

Üretim yöntemleri ve süreçleri teknolojik gelişmelere paralel olarak zaman içerisinde farklılaşmıştır. Öte yandan, hesaplamalı tasarım yaklaşımındaki paradigma değişimleri, zanaatın bu yönüne olan ilgiyi arttırmış ve bu alandaki dönüşüme zemin hazırlamıştır. Bununla birlikte, mevcut kaynakları kullanarak tasarlama, yapma, dönüştürme ve onarım gibi zanaata özgü kavramlar önem kazanmış; bireysel yapım süreçlerini kapsayan üretici kültürünün yaygınlaşması ile yapıma dair bilgi, sanal üretici platformları aracılığıyla paylaşılmaya başlamıştır. Bu gelişmeler ve dönüşümler, insanın el ile yapma ve keşfetme becerisinin sayısal teknolojilerle birlikteliğinden oluşan dijital zanaatın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Hesaplamalı tasarım düşüncesinin bir yansıması olarak mevcut üretim biçimleri, dijital ortama aktararak sayısal makinaların işleyeceği ve etkileşim kuracağı hale getirilmiştir. Bu dijitalleştirme sürecinde, el ile ve sezgisel olarak gerçekleştirilen yapım süreçlerindeki örtük bilginin açığa çıkarılmasında yapım gramerleri gibi kural tabanlı yöntemlerin kullanımı giderek önem kazanmaktadır.

Biçim gramerlerinin bir alt başlığı olarak nitelendirilen yapım gramerleri, parametre ve kurallardan oluşan işlem dizileri ile yapım süreçlerini tanımlamak ve gramer kurallarının malzemeyi biçimlendirmek için uygulanması ile çözüm uzayını genişletmek için kullanılmaktadırlar. İncelenen çalışmalarda yapım gramerlerinin dijital fabrikasyon araçlarına bağlı yapım süreçlerinde veya ön tasarım aşamasında malzeme ile birlikte keşif süreçlerinde kullanıldığı belirlenmiştir. Bu yöntemin manuel araçlara bağlı yapım süreçlerinin çözülmesinde deneysel yöntemle birlikte kullanılması ile özellikle el ile yapımdaki riskin azaltılması, yapımın planlı ve kontrollü hale getirilmesi, mevcut araçların özelleştirilmesi söz konusu olabilmektedir.

Mevcut araçların ve yapım yöntemlerinin özelleştirilmesi, dijital fabrikasyon araçlarına erişimin ve müdahale imkanının sınırlı olması gibi sebepler bu fabrikasyon süreçlerine alternatif olabilecek yaklaşımlar geliştirilmesine ön ayak olmaktadır. Dijital fabrikasyon araçlarının kısıtları arasında üretici kültürü kapsamında değerlendirilen fabrikasyon laboratuvarlarını kullanan katılımcıların sınırlı olması, bu araçların kullanımları için dijital okuryazarlığa sahip olma gerekliliği ve genellikle özelleşmiş ve kısıtlı tezgâh gövdesine sahip, yani tek işlevli olmaları sayılabilir. Aynı zamanda, bu araçların bileşenlerine ve arayüzlerine olan erişim, araçlarla etkileşim kurma ve araçları manipüle etme açısından zanaat araçlarıyla kıyaslandığında sınırlı olabilmektedir.

Dijital fabrikasyon araçlarının görece yüksek esnekliği ile, rijit araçların sabit ve değiştirilemez doğası arasında yeniden-yapılandırılabilir araç ve sistemler fikri ortaya atılmıştır. Erken tasarım aşamasında ve prototiplemede, 1:1 ölçekli birim eleman üretiminde kullanılmak üzere hareketli elemanlara sahip yeniden yapılandırılabilir araçlar geliştirilmektedir. Mevcut araç bileşenlerinin yapılandırılmasında, birlikte

eşleştirilebilir (kombinatoriyal) mantıktan ve kurala dayalı ayarlanabilir ve hareketli mekanik bileşenlerden faydalanan bu araçlar, genellikle mevcut yapım tekniklerinden türetilmişlerdir. İncelenen çalışmalara dayanarak, yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyona dayalı araçlar, geliştirmeye açık bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tezde, hesaplamalı düşüncenin yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme yöntemleriyle bütünleştirilerek el ile yapma bilgisinin çözümlenmesinde, mevcut araca bağlı tasarım uzayının genişletilmesinde ve üretilen biçimlerin doğruluk açısından değerlendirilmesinde kullanılmak üzere alternatif bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşımın vaka çalışması olarak eklemeli bir üretim biçimi olan ekstrüzyondaki; girdi, süreç ve çıktı aşamalarının seçilen manuel ekstrüzyon aracı (EA) üzerinden incelenmesi hedeflenmiştir. İki aşamalı olarak kurgulanan süreçte, araç bileşenlerinin birleştirilmesi, değiştirilmesi ve hareketli hale getirilmesi yoluyla Yeniden-yapılandırılabilir Ekstrüzyon Aracı (YEA), manuel yapımın çözümlenmesi ile Ekstrüzyona dayalı Yapım Grameri (EdYG) geliştirilmiştir. El ile gerçekleştirilen deneyler ile farklı bileşen ve fonksiyon eşleşmelerine bağlı yapım senaryolarını keşfetmek ve araca bağlı yapım grameri ile kontrollü bir üretimi, manuel ve hibrit senaryoda belirli bir doğrulukta gerçekleştirebilmek hedeflenmiştir. Doğruluk değerini belirlemek amacıyla geliştirilmiş olan ölçüm düzeneğinin küçük ölçekli biçimlerin dijitalleştirilmesinde kullanılması ve bu sayede ölçümün hassasiyet yüzdesinin artırılması amaçlanmıştır.

Önerilen iki aşamalı sürecin değerlendirilmesinde, fotogrametri yöntemi ve değerlendirme için özel olarak yazılan ve yapım gramerinin dijital modeline dayanan görsel kod ve betikler kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen veriler ile EdYG ve YEA, küçük ölçekli üretimde yapım bilgisini çözümleme, çözüm uzayını genişletme ve belirli bir doğrulukta biçim üretme açısından; gramer kuralları, kalıp biçimleri, üretim süresi ve yeniden-yapılandırma ölçütleri bağlamında değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinin ilk aşamasında, EA ve YEA ile belirli kural setleri kullanılarak üretilen biçimler karşılaştırılmıştır. Modülerlik, özelleştirilebilme, ölçeklenebilme, bütünleştirilebilme, değiştirilebilme, teşhis edilebilme, farklı malzemeler kullanabilme, hibrit kontrole sahip ve müdahaleye açık olma ile çeşitlilik, doğruluk, üretim süresi ölçütleri yeniden-yapılandırılabilir bir aracın tasarım ve değerlendirme ilkeleri olarak tanımlanmıştır. Değerlendirme sürecinin ikinci aşamasında, yine aynı yöntem kullanılarak fiziksel ve dijital ortamda belirli kural setleri ile üretilen biçimler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile, kalıp biçimlerine, kural setlerine, malzemenin özelliklerine ve üreticinin kabiliyetine bağlı veriler elde edilmiş; yapım grameri kuralları ve üretilen biçimler arasındaki korelasyon ortaya çıkarılarak yapım gramerinin işlerliği test edilmiştir. Bu sayede, geliştirilen fiziksel ve dijital aracın tasarım ve yapım süreçlerinde, deney ve prototipleme aracı olarak kullanımına ve bu süreci başka zanaat araçlarına uygulayabilmesi için tasarımcının dijital okuryazarlık açısından kazanması gereken becerilere dair sonuçlara ulaşılmıştır.

Tüm bu nicel ve nitel değerlendirmelerin sonucunda, geliştirilen fiziksel ve dijital aracın doğruluk açısından geliştirilmesi gerektiği belirlense de yapım süreçlerinin deneyim ve ölçme yoluyla araştırılmasında ve değerlendirilmesinde, açık kaynaklı ve yeniden-yapılandırılabilen bir hesaplama aracı olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Mevcut aracın özelleştirilmesine dayanan iki aşamalı süreci tasarımcının uygulayabilmesi için sahip olması gereken beceriler; deneyim yoluyla zaman içerinden kazanılan örtük bilgi, temel mekanik ve elektronik bilgisi, ölçümleme için gereken kodlama bilgisi, denemelerin dijital aktarılması için fotogrametri bilgisi ile yapım sürecinin analizinde kullanılan kural tabanlı tasarım bilgisi olarak

belirlenmiştir. El ile yapımın dijitalleştirilmesi; yapım sürecinin tüm yönleriyle analiz edilmesine, araç ile gerçekleştirilen tüm denemelerin kaydedilmesine ve sanal üretici platformları üzerinden paylaşılarak çoğaltılmasına ve geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Tez beş ana başlıktan oluşmaktadır. Giriş bölümünde, problem tanımı, tezin amacı ve kapsamı, tezde izlenen yöntem ile tezin özgün değeri ve yaygın etkisi anlatılacaktır.

İkinci bölümde, dijital zanaatın ortaya çıkışına zemin hazırlayan tasarım ve üretim paradigmalarındaki değişim, endüstri ve tasarım perspektifinden ele alınmıştır. Yapım gramerlerinin kullanım alanları ve yapımın çözümlenmesinde kullanılma potansiyelleri kural tabanlı üretim yaklaşımları bağlamında tartışılmıştır. Buna ek olarak, dijital zanaatın çeşitli sanal ortamlar üzerinden paylaşılmasının tasarım yaklaşımlarını ve araçlarını nasıl dönüştürdüğü açıklanmıştır. Aynı zamanda, mimarlık ve inşaat alanında birim eleman üretmek için geliştirilen esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçların özellikleri kapsamlı bir literatür araştırmasıyla ortaya konarak araştırmaya açık alanlar belirtilmiştir.

Üçüncü ve dördüncü bölüm, geliştirilen yöntemin vaka çalışması olarak Yeniden-yapılandırılabilir Ekstrüzyon Aracı (YEA) ve Ekstrüzyona dayalı Yapım Gramerinin (EdYG) önerilen tasarım ilkeleri doğrultusunda geliştirilmesi ve değerlendirilmesini içermektedir. Üçüncü bölümde, YEA'nın geliştirilme adımları açıklanarak araç ile gerçekleştirilen denemeler ortaya konmuştur. EA ve YEA ile üretilen biçimlerin fotogrametri ve yazılan görsel kod aracılığıyla gerçekleştirilen değerlendirme süreci açıklanmıştır. Kural setleri aracılığıyla üretilen biçimlerin karşılaştırılması ile farklı kalıplar, kural setleri ve üretim süresi açısından elde edilen veriler analiz edilerek geliştirilen araç, yeniden-yapılandırma derecesi, prototipleme ve kurulum sürümleri açısından değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde ise, manuel ekstrüzyon aracının bileşenlerine yönelik, farklı malzemeler ile gerçekleştirilmiş denemeler açıklanarak, araca ait yeniden-yapılandırma şeması ortaya konmuştur. Dijital ve fiziksel ortam arasındaki benzerlik ve farklılıkları ölçmek için belirli kural setleri ile üretilen biçimler; farklı kalıplar, kural setleri ve üretim süresi açısından değerlendirilmiştir.

Tezin sonuç ve tartışma bölümü beş alt başlık altında incelenmiştir. Bu bölümde, değerlendirme yöntemi, elde edilen sonuçlar ışığında tartışmaya açılmış ve geliştirilen iki aşamalı yöntemin dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları ele alınmıştır. Önerilen yöntemi herhangi bir üreticinin tam olarak tatbik edebilmesi için dijital okuryazarlık açısından sahip olması gereken beceriler ortaya konmuştur. Aynı zamanda, YEA ve EdYG'nin potansiyelleri ve kısıtlarına dayanarak, yeniden-yapılandırılabilir fiziksel ve dijital araç geliştirme açısından gelecek öngörülerinde bulunulmuştur.



A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR THE RECONFIGURATION PROCESSES IN EXTRUSION-BASED MAKING

SUMMARY

Production methods and techniques have changed over time in parallel with the developing technology. Due to the shift from mass production to mass customization triggered by computational design paradigms, the needs of the customer become crucial which further evokes a renewed interest in the crafts. Craft-specific concepts such as designing, making, transforming, and repairing have gained importance to produce context-specific designs by using available resources. Moreover, the spread of the maker culture, which includes individual making processes, tacit knowledge gained through making has begun to be shared through virtual maker platforms by defining it explicitly. As a result of these developments and shifts, digital craft has emerged as a new area of research by defining a hybrid ground consisting of computational thinking and human factor to providing variability as well as experimentation with materials and tools that lead to innovation. Using computational design thinking approaches, existing making processes have been transferred to the digital medium and made to be processed and interacted by digital machines. In this digitization process, rule-based methods have become important in externalizing the tacit knowledge generated through the manual and intuitive making processes. Making grammars as a subset of shape grammars are used to define the making procedures through parameters and rules. Thus, design space is explored by manipulation of the parameters and a combination of rules to generate variable designs in a controlled way. In the studies examined, it has been determined that either the making grammars are used in examining the processes of digital fabrication tools or in material exploration at the preliminary design stage in crafts. By using this method together with the experimental method in the analysis of making processes with manual tools, it is possible to reduce the risk in making, to plan and control the process, and to customize the existing tools by extending the tool affordances.

The customization of existing tools and making processes can lead to the development of alternative approaches to digital fabrication processes of which have limited access and usage possibilities. The constraints of digital fabrication tools are the limited user profiles in fabrication laboratories within the scope of maker culture, the necessity of having digital literacy for the use of these tools, and the fact that they generally have a specialized limited bed size, that is, they are single-functional. At the same time, access to components and interfaces of these tools can be limited compared to craft tools. Therefore, the discovery processes based on hands-on making cannot be realized in the file-to-factory production with digital fabrication tools.

In between the relatively high flexibility of digital fabrication tools and the fixed nature of rigid tools, the idea of reconfigurable tools and systems has been put forward. Considering the shortcomings of digital fabrication tools, reconfigurable tools with manually or automatically controllable moving components are being developed for

use in the early design phase, rapid prototyping, and 1:1 scale unit production. Utilizing combinatorial logic and rule-based adjustable and movable mechanical components, these tools are often derived from existing making techniques. In the literature, the reconfiguration of extrusion-based tools is a promising area of research to integrate low-cost reconfigurable tool strategies to transform rigid craft tools into controlled and parametric tools. As a result of this transformation, the risk in repetitive making related to the inadequate control systems in the crafts can be reduced. Moreover, the industry has a demand to initiate the research and development processes in production by craft-driven innovation through collaborations with craftsmen and designers. For this reason, defining the tacit knowledge in the craft explicitly is also of great importance in terms of craft-manufacturing hybridization, where it is aimed to realize craft-driven innovation.

It is aimed to develop an alternative approach by integrating computational thinking with reconfigurable tool development methods to be used in the analysis of hands-on knowledge, expanding the existing tool-based design space, and evaluating the produced forms in terms of accuracy. As a case study of this approach, it is examined the input, process, and output stages in extrusion, which is an additive manufacturing method, through the selected manual and hand-held extrusion tool (EA). In the two-stage process, the Reconfigurable Extrusion Tool (YEA) was developed by combining, modifying, and mobilizing the tool components resulting in variable making scenarios, and the Extrusion-based Making Grammar (EdYG) was developed by decoding the manual making process into the parameters and rules. It is aimed to discover different component-function relations with hands-on experimentation and to realize a controlled making process with a certain accuracy in manual and hybrid scenarios with extrusion-based making grammar. It is planned to use the proposed measuring setup to determine the accuracy rate in the digitization of small-scale forms and thus to increase the precision of the measurement.

In the evaluation of the proposed two-stage process, the photogrammetry method and visual codes and scripts written specifically for the evaluation and based on the digital model of the making grammar were used. Using the data obtained by this method, the EdYG and YEA are evaluated according to grammatical rules, forms, production time, and reconfiguration criteria whether EdYG and YEA can be used to analyze tacit knowledge in small-scale production, expand the solution space and produce forms with a certain accuracy. In the evaluation of the first stage of the process, the forms produced with rule sets were analyzed to compare the EA and YEA. Modularity, customization, scalability, integrability, convertibility, diagnosability, use of different materials, hybrid control and openness to intervention, as well as variability, accuracy, production time criteria have been defined as the design and evaluation criteria of a reconfigurable tool. For the evaluation of the second stage of the process, the forms produced with certain rule sets in the physical and digital medium were compared using the same method. In this comparison, the functionality of the making grammar was tested by revealing the correlation between the rule sets and the corresponding physical forms via the data related to the die (mold) forms, rule sets, material, and the ability of the maker. In this way, results have been obtained regarding the use of the developed physical and digital tool in the design and making processes as an experimental and prototyping tool and the skills that the designer should acquire in terms of digital literacy to apply this process for the customization of other craft tools.

As a result of all these quantitative and qualitative evaluations, it has been determined that although the developed physical and digital tool should be improved in terms of accuracy, it can be used as an open-source and reconfigurable computing tool in the experimentation and evaluation of the making processes of craft tools. The skills that the designer must have to implement the two-step process based on the customization of the existing tool; tacit knowledge gained over time through experience, basic mechanics and electronics knowledge, coding knowledge required for measurement, photogrammetry knowledge for transferring the physical outputs to the digital medium, and rule-based design knowledge used in the analysis of the making process. Digitization of manual making will contribute to the analysis of all aspects of the making process, the recording of all experiments with the tool, and their reproduction and development by sharing them over virtual maker platforms.

The thesis consists of five main chapters. The problem area, the aim and scope of the thesis, research objectives and methodology, significance, and outline of the thesis will be covered in the introduction.

In the second chapter, the change in design and production paradigms that paved the way for the emergence of digital craft is discussed from the perspective of industry and design. Within the scope of rule-based design, the use of making grammars and their potentials and limitations in the analysis of the making processes are discussed. Next, it is explained how digital craft has transformed the medium and tools with the emergence of new maker platforms to share tacit knowledge. On the other hand, the properties of flexible and reconfigurable tools developed to produce units in the field of architecture and construction were revealed through a comprehensive literature review, and the areas open to research were specified.

The third and fourth chapters include the development and evaluation of the two-stage method in line with the proposed design principles of the Reconfigurable Extrusion Tool (YEA) and Extrusion-based Making Grammar (EdYG) as a case study. In the third chapter, the development steps of the YEA are explained, and the experiments carried out with the tool and polymer clay are presented. The forms produced with the EA and YEA are evaluated by using photogrammetry and written visual code in which the physical forms are transferred to the digital medium and compared with each other according to total surface displacement, bending angle, and 3D-shift values. The results were analyzed in terms of different die (mold) forms, rule sets, and production time, and the degree of tool reconfiguration was evaluated in terms of prototyping and production setups. In the fourth chapter, customized experiments for the components of the manual clay extruder are explained and the reconfiguration scheme of the tool is presented. Forms produced with specific rule sets are analyzed to measure similarities and differences between digital and physical mediums, so that different die forms were evaluated in terms of rule sets and production time.

The conclusion and discussion chapter of the thesis has been structured under five sub-headings in relation to the research questions. In this section, the evaluation method is discussed considering the results obtained. Moreover, the potentials and limitations of the developed two-stage method to transform craft tools are put forward in terms of digital craft. For any maker to fully implement the proposed method, the skills that must be possessed in terms of digital literacy have been revealed. At the same time, future projections for reconfigurable physical and digital tool customization and development are explained based on the potentials and constraints of the YEA and EdYG. YEA is a tool that can be used in tool-based form-finding and solution space exploration that allows experimentation and evaluation. The system design and digital model of the YEA can be used as measurement tools that can be used to decode the intuitive and haptic sense-based making process. Therefore, mechanizing and digitizing a manual tool should be considered together which are realized in both physical and digital mediums. The developed grammar was found to be useful in creating the cycle of making, measuring-comparing, and remaking accordingly, which is carried out in both physical and digital mediums. This cycle can be repeated until the targeted criteria are reached.

Within the scope of this thesis, and transformation of medium and tools in manual making processes and the possibility of innovation by deriving from existing tools and methods, as in the gradual development in craft practice, are focused on. By making use of computational design methods, it is possible to make more sustainable designs without losing the opportunity to develop novel systems for more local and small production enterprises. Therefore, with the developed digital design and physical making process, the potential of computational design thinking and tools to transform the knowledge of local making has been revealed as a final remark.

1. GİRİŞ

Hesaplamalı tasarım paradigmalarının sebep olduğu seri üretimden kitlesel bireyselleştirmeye geçiş süreci zanaata olan ilgiyi de artırmıştır (Adamson, 2007; McCullough, 1996; Sennett, 2008). Dijital zanaat, hesaplamalı düşünce ve insan faktörünün birlikteliğinden oluşan hibrit bir zemini kullanarak inovasyona yol açacak şekilde malzeme ve araçlarla deneyler yapmayı içeren (Niedderer, 2009; Woolley, 2011) yeni bir araştırma alanı olarak ortaya çıkmıştır (McCullough, 1996; N. Oxman, 2007). Bu dönüşümle birlikte mevcut kaynakları kullanarak tasarlama, yapma, dönüştürme ve onarım gibi zanaata özgü kavramlar önem kazanmıştır. Hesaplamalı tasarım düşüncesinin bir yansıması olarak mevcut üretim biçimleri, dijital ortamlara aktarılmış; sayısal (nümerik) makinaların işleyeceği ve etkileşim kuracağı hale getirilmiştir. Bu süreçte zanaata özgü olan, el yordamıyla ve sezgisel olarak gerçekleştirilen yapıma dair örtük bilgi, yapım sürecini daha fazla kontrol etmek için açıkça tanımlanmalıdır (Polanyi, 1958). Bu bilgi transferini yapabilmesi için zanaatkarın veya günümüz bakış açısıyla tasarımcının, hesaplama dayalı soyut düşünme becerisini geliştirmesi beklenmektedir. Bu gelişim, parametrik düşünme sistemi ve kural tabanlı tasarlama yöntemleri ve araçları ile doğrudan ilintilidir.

Geometrik çözüm uzayında keşif yoluyla biçimsel çeşitliliğin artırılması, parametrelerden ve bunların ilişkilerinden oluşan topolojik modeller aracılığıyla mümkün olmaktadır (R. Oxman, 2017; Trumer, 2011; Woodbury, 2010). Biçim gramerleri, parametre ve kurallardan oluşan bir tasarım grameri olarak yapım süreçlerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Knight, 2018). Bu sayede, planlı ve kontrollü bir şekilde çeşitli tasarımlar üretmek için parametrelerin manipüle edilmesi ve kuralların kombinasyonu ile çözüm uzayı genişletilebilmekte ve gerektiğinde seçimler yoluyla daraltılabilmektedir. Biçim gramerlerinin görsel-fiziksel temsili, uzman ve yetkin olmayan tasarımcıların dahi, yapım kurallarını algılayarak tatbik etmesini sağlayabilmektedir. Biçim gramerlerinin tasarım sonrası araç ve malzeme ile gerçekleştirilen uygulamaları ise yapım gramerleri olarak ele alınabilir. Mevcut eklemeli ve eksiltmeli fabrikasyon araçları için yapım gramerleri önerilmesine rağmen

(Krstic, 2019; MacLachlan & Jowers, 2016; Sass, 2009), manuel zanaat araçları ve yapım süreçleri için yapılan çalışmaların ve pratikteki uygulamalarının henüz başlangıç seviyesinde olduğu görülmektedir.

Bilgisayar destekli tasarım (BDT) araçlarının kullanıldığı hesaplamalı tasarım ürünleri, bilgisayar destekli üretim (BDÜ) araçlarıyla, doğrudan sayısal veriler baz alınarak fiziksel ortamda üretilmektedir. Bunun sonucunda, tasarım ve yapım arasındaki ilişki daha görünür hale gelmiştir (Carpo, 2011). Dijital fabrikasyon ve fiziksel hesaplama araçlarının yaygınlaşması ile ortaya çıkan ve zanaattan mühendisliğe kadar her türlü bireysel yapma aktivitesini kapsayan üretici kültürü (maker culture), kendin-yap kültürünün (Do-it-yourself) bir uzantısı olarak görülmektedir (Katterfeldt, 2014). Üretici (maker) adı verilen yeni bir aktör, yüksek ve düşük teknoloji, yavaş ve sınırlı üretim kapasitesine sahip, yerinde gerçekleşen yapma süreçlerinin uygulayıcısı olarak tariflenmektedir. Üreticilerin oluşturduğu bu kültür, 3 boyutlu yazıcı, CNC tezgâhları, lazer kesici-işaretleyici ve bazen de robot kolu gibi yüksek teknolojiye sahip araç kullanımına imkân veren fabrikasyon laboratuvarları ile de yaygınlaşmıştır. Bu kültür, yapımın dijitalleştirilmesine de ön ayak olmuş ve yapıma dair bilgiyi açık hale getirme, kaydetme ve paylaşma biçimlerinin de farklılaşmasını sağlamıştır. Değiştirilmesi ve düzenlenmesi zahmetli ve yavaş olan fiziksel medya ve yapım süreçleri dijital ortama aktararak programlanabilir, değiştirilebilir ve algoritmik olarak manipüle edilmeye açık hale getirilmiştir (Miller, 2011). Bu gelişmenin üretici kültürü açısından önemi, sanal zanaat gruplarının katkılarıyla oluşan Thingiverse ve Instructables gibi çevrimiçi platformların önemli birer bilgi kaydetme ve aktarım noktaları olarak ortaya çıkmasıdır. Bu platformların etkileşimli olarak kullanımında dijital okuryazarlık önemli bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, yerel yönetimler, meslek odaları ve üniversiteler tarafından dijital okuryazarlığın kazandırılmasına yönelik çeşitli programlama ve 3B yazıcı eğitimlerinin yanı sıra Arduino gibi fiziksel hesaplama araçlarının kullanımını içeren kurslar verilmektedir. Bu eğitimler, üretici kültürünün yaygınlaşmasına ve gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

Üretici kültürünün yüksek teknoloji ayağını oluşturan fabrikasyon laboratuvarları aracılığıyla, inovasyonun demokratikleştirilmesi olasılığına rağmen, olası aktörlerin çeşitliliğine odaklanan birçok endişe sıklıkla dile getirilmektedir (Walter-Herrmann & Buching, 2014, s. 18). Ayrıca, dijital fabrikasyon araçları yüksek teknoloji (Hawkins

ve diğ., 2016), genellikle tek işlevli (Koren, 2006, s. 38) ve kısıtlı tezgâh gövdesine sahip olabilmektedir (Peek & Moyer, 2017). Dijital okuryazarlık olarak adlandırılan işlemsel bilgi sayesinde kullanılabilen bu araçların tasarımcılar tarafından özelleştirilmelerinin sınırlı olduğu ifade edilmiştir (Katterfeldt, 2014; N. Oxman, 2007).

Dijital fabrikasyon araçlarının görece yüksek esnekliği ile, rijit araçların sabit ve değiştirilemez doğası arasında yeniden-yapılandırılabilir araç ve sistemler fikri ortaya çıkmıştır. Fabrikasyon araçlarının eksiklikleri göz önünde bulundurularak erken tasarım aşamasında, hızlı prototiplemede, 1:1 ölçekli birim eleman üretiminde kullanılmak üzere manuel, hibrit veya otomatik olarak kontrol edilebilen hareketli elemanlara sahip esnek ve yeniden yapılandırılabilir araçlar geliştirilmektedir. Bu araçların endüstriyel üretimde ortaya çıkış amacı, ürünlerde çeşitlilik sağlarken birim başına maliyeti düşürmek için üretim parametrelerinin manipüle edilmesine imkân vermeleridir (Ferguson ve diğ., 2007; Koren, 2006). Mimarlık, mühendislik ve inşaat (MMİ) endüstrisinde ise birim eleman üretmek için geliştirilen bu araçlar ile rijit ve tek seferlik kalıplamada ortaya çıkan atık, yüksek kalıp maliyeti, zaman ve emek yoğun kalıplama işlemlerini en aza indirmek amaçlanmıştır. (Khabazi & Budig, 2016; Raun & Kirkegaard, 2015; Yang ve diğ., 2019; Kelkar ve diğ., 2005). Mevcut araç bileşenlerinin değiştirilmesinde, birlikte eşleştirilebilir (kombinatoriyal) mantıktan ve kurala dayalı ayarlanabilir ve hareketli mekanik bileşenlerden faydalanan bu araçlar, genellikle mevcut yapım tekniklerinden türetilmişlerdir. Literatürde, yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyona dayalı araçlar, gelişime açık bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır (Oral & Colakoglu, 2020).

Endüstrinin de zanaat güdümlü inovasyon ile üretimdeki araştırma ve geliştirme ilişkisini iş birlikleri aracılığıyla kurgulama talebi vardır. Zanaattaki yinelemeli ve deneye dayanan süreçlerin başarılı bir şekilde endüstriye transfer edilebilmesi için yöntem açığı olduğu İngiltere Zanaat Konseyi'nin (UK Craft Council) 2016 tarihli raporunda ortaya konulmuştur (Warburton, 2016). Bu nedenle, zanaattaki örtük bilginin açık ve dolayısıyla kontrollü hale getirilmesi, zanaat odaklı inovasyonun gerçekleştirmenin hedeflendiği zanaat-üretim hibritleşmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Zanaattaki kısıtlı kontrolden kaynaklanan ve tekrarlı üretimde karşılaşılan “yapım riskini” (Pye, 1968) azaltmak amacıyla, hesaplamalı tasarım ve yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme stratejileri el ile tutulan ve kullanılabilen

(hand-held) araçları özelleştirilmek için kullanılabilir. Bu araçsal dönüşüm sürecine üretici kültürü açısından baktığımızda ise, zanaatkarın dijital zanaatkara dönüşebilmesi için “*kolay araçlar, hesaplama dayalı soyutlama bilgisi, 3 boyutlu model yaratımı ve programlama açısından*” desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir (Katterfeldt, 2014). Bu bilgi türleri ve araçlardan birine veya birkaçına sahip olmanın üretilen biçimlerdeki çeşitliliği, doğruluk ve hassasiyet değerlerini, el ile keşfetme ve öğrenme süreçlerini doğrudan etkilediği düşünülmektedir.

Bu tezin tartışmaya açtığı problem alanları:

- Kişiselleştirmede kullanılan dijital fabrikasyon araçlarının pahalı, tek fonksiyonlu, tasarımcının doğrudan müdahalesine kapalı ve dolayısıyla özelleştirilmelerinin güç olması (Koren, 2006; N. Oxman, 2007; Peek & Moyer, 2017),
- Dijital fabrikasyon araçlarının kullanımı için gereken dijital okuryazarlık (Katterfeldt, 2014) ve bu araçların sahip olduğu yüksek teknoloji gibi nedenlerle yapım süreçlerinde kullanımının özellikle gelişmekte olan ülkelerde sınırlı olması (Hawkins ve diğ., 2016),
- Dijital fabrikasyon araçlarının kullanımının fabrikasyon laboratuvarları gibi organizasyonlara bağlı ve merkezileşmiş olması ile sınırlı mesai saatleri, coğrafi konum, bazı durumlarda ücretler ve kültürel erişim açısından dezavantajlı olması (Walter-Herrmann & Buching, 2014),
- Zanaatta sezgisel araç kullanımına bağlı olarak yapım esnasında ortaya çıkan risk kontrolünün eksikliğine bağlı tekrarlı üretimdeki doğruluk oranının düşük olması (Pye, 1968), zanaattaki yinelemeli ve deneye dayanan süreçlerin başarılı bir şekilde endüstriye transfer edilebilmesi için yöntem açığı (Warburton, 2016),
- Üretilen biçimlerin belirlenen parametrelere göre değerlendirilmesi için fotogrametri yönteminin uyarlanması ile elde edilen verilerin dijital ile fiziksel ortamda karşılaştırılmasıdır (Culver ve diğ., 2016; Engholt & Pigram, 2019; Tessmann & Mehdizadeh, 2019; Yabanigül & Yazar, 2021; Yang ve diğ., 2019).

1.1 Tezin Amacı, Kapsam ve İçeriği

Tezde, hesaplamalı düşüncenin yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme yöntemleriyle bütünleştirilerek el ile yapma bilgisinin çözümlenmesinde, mevcut

araca bağı tasarım uzayının genişletilmesinde ve üretilen biçimlerin doğruluk açısından değerlendirilmesinde kullanılmak üzere alternatif bir yaklaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yaklaşımın vaka çalışması olarak eklemeli bir üretim biçimi olan ekstrüzyondaki; girdi, süreç ve çıktı aşamalarının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşım, manuel kil ekstrüderine bağı araç bileşenlerinin değiştirilmesi, birleştirilmesi ve hareketli hale getirilmesi yolu ile çözüm uzayının kontrollü bir şekilde genişletilmesi için uygulanmıştır. El ile gerçekleştirilen deneyler ile farklı bileşen-fonksiyon kullanımlarını keşfetmek ve araca bağı yapım grameri ile kontrollü bir üretimi, manuel ve hibrit senaryoda belirli bir doğrulukta gerçekleştirebilmek hedeflenmiştir. Tezde, geliştirilen fiziksel aracın, küçük ölçekli üretimde belirli bir doğrulukta biçim üretme potansiyelinin; gramer kuralları, kalıp biçimleri, üretim süresi ve yeniden-yapılandırma ölçütleri bağlamında değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Gramer tabanlı dijital araç ise, kural setlerine bağı olarak ve hem manuel hem hibrit kontrol ile üretilen biçimlerdeki doğruluk değerinin tespiti için baz model olarak oluşturulmuştur. Buna ek olarak, tasarlanan süreç ile üretilmiş biçimlerin, fotogrametri yöntemi ile ölçümlenmesi için hazırlanmış olan ölçüm düzeneğinin küçük ölçekli biçimlerin dijitalleştirilmesinde kullanılması ve bu nedenle ölçümün hassasiyet yüzdesinin artırılması hedeflenmiştir.

Tez sürecinde cevaplanması amaçlanan sorular aşağıdaki gibidir:

AS1: Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinde kullanılan araç ve bileşenler, biçimin oluşturulma işlemine nasıl etki etmektedir?

AS2: Yapım gramerine dayalı biçimlerin üretiminde manuel aracın ve bileşenlerinin yapılandırıldığı hibrit aracın dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları nelerdir?

AS3: Ekstrüzyona dayalı yapım grameri kullanılarak dijital ortamda üretilen biçimler ile bir araç yardımıyla şekillendirilerek fiziksel ortamda üretilen biçimlerin, doğruluk açısından farklarının dijital zanaat açısından ne tür etkileri olabilir?

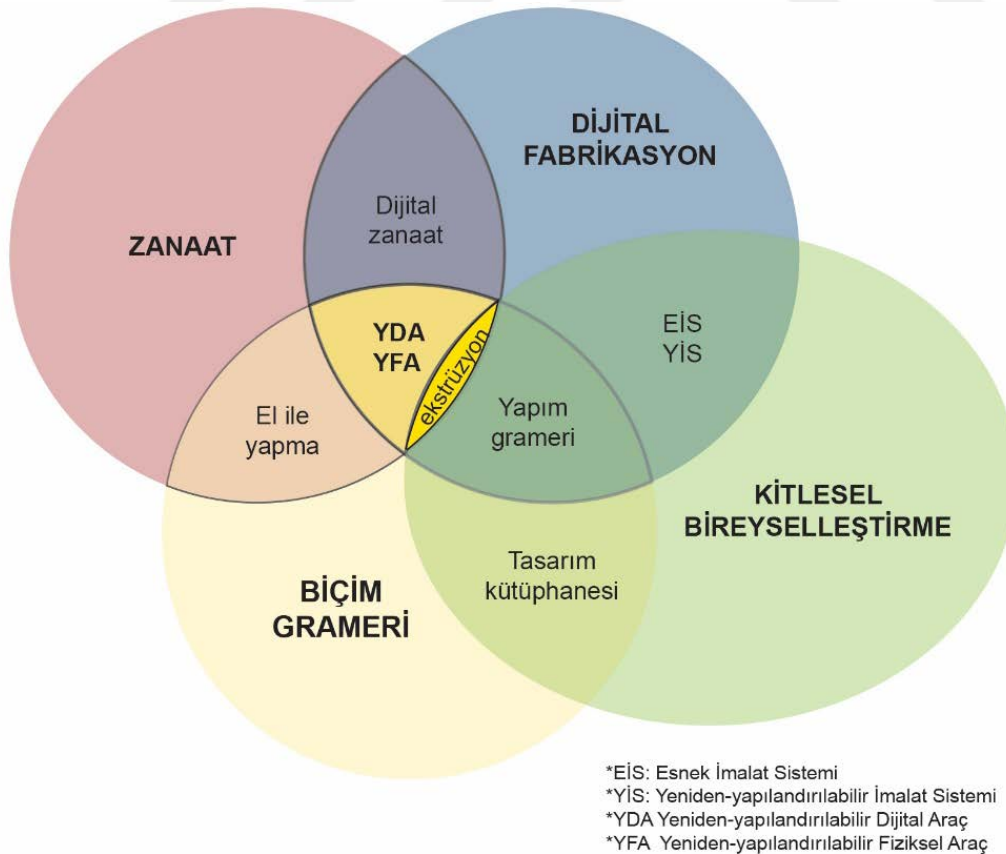
AS4: Zanaatkarın veya tasarımcının fiziksel ve dijital ortamda yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirebilmesi için dijital okuryazarlık açısından kazanması gereken beceriler nelerdir?

Bu tez, aşağıdaki hedefleri takip eder:

- Rijit ekstrüzyon aracını (EA) analiz ederek aracın bileşenlerine, işlem adımlarına bağı yapılandırma şemasını oluşturmak,

- Yapılandırma şemasına dayanan hibrit bir araç geliştirmek (YEA),
- Araca dayalı yapım grameri için ölçütleri belirlemek,
- Fiziksel çıktıları dijital çıktılar ile karşılaştırarak yapım gramerine bağlı hem manuel hem hibrit üretimdeki doğruluk değerini belirlemek,
- Ekstrüzyona dayalı Yapım Gramerinin (EdYG) biçimsel potansiyellerini ve kullanım alanlarını tartışmak,
- Dijital zanaat kapsamında, fiziksel ve dijital yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme çalışmaları için kavramsal bir çerçeve oluşturmaktır.

Önerilen iki aşamalı süreç, sezgisel yapım süreçlerini kurallı yapım süreçlerine dönüştürme ve bu bilgi transferine bağlı olarak küçük ölçekli araç geliştirmenin dijital zanaat açısından ele alınmasına katkı sağlayacaktır. Dijital araç kullanma ve geliştirme açısından önemli hale gelen dijital okuryazarlığın ve buna bağlı olarak ortaya çıkan dijital kültürün, zanaat pratiklerini yeniden canlandırma ve dönüştürme potansiyeli, açık kaynaklı ve müdahaleye izin veren fiziksel ve dijital ortamda yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirilmesi kapsamında tartışılacaktır.



Şekil 1.1 : Tezin kapsamı.

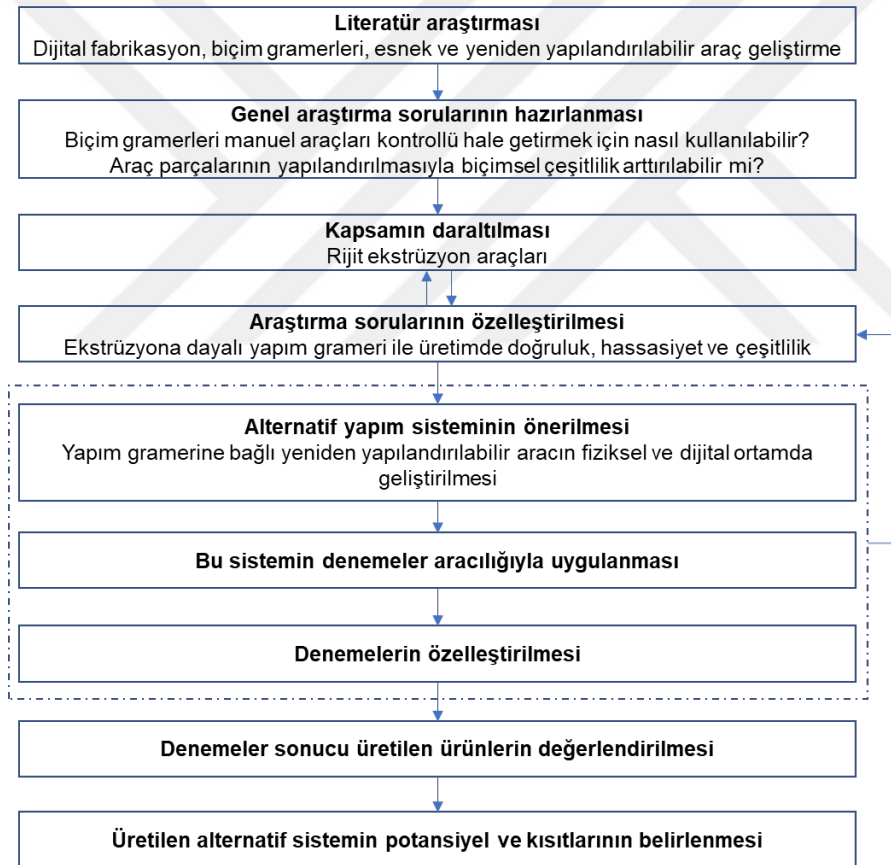
Bu bağlamda, tezin üç ana bilgi alanının ve bu paralelde pek çok kavramın kesişim noktası olarak tanımlanması planlanmaktadır (Şekil 1.1). Bu bilgi alanları; dijital zanaat, biçim gramerlerinin alt başlığı olan yapım gramerleri ile kitlesel bireyselleştirmede kullanılan esnek ve yeniden yapılandırılabilir araçlardır. Bu bilgi alanlarının kesişiminde, ekstrüzyon yapım yöntemi incelenerek, yeniden yapılandırılabilir araç tasarlama stratejileri, seçilen manuel kil ekstrüderini analiz etmek ve geliştirmek için kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, zanaat-üretim ara kesitinde başka araçlar ve üretim süreçleri için de kullanılabilecek, araştırma ve geliştirme kapsamında yer alabilecek bir yapım süreci tanımlanmıştır.

Tez, literatür araştırması, fiziksel ve dijital araç dönüşümü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Literatür araştırması bölümünde, yapım süreçlerini çözümleme yöntemi olarak hesaplamalı tasarım yöntemlerinden biçim ve yapım gramerleri ele alınacaktır. Dijital zanaat başlığı altında yaparak öğrenme ve keşfetme süreçleri ile araç-yapım-biçim ilişkisi, girdi-işlem-çıktı iş akışları üzerinden tartışılacaktır. Devamında, yapma pratiklerinde teknolojik gelişmelere bağlı olarak gerçekleşen organizasyonel, ortamsal ve araçsal dönüşümler irdelenecektir. Tezin üçüncü bölümünde, üretimde fiziksel araç dönüşümü kapsamında ele alınan yeniden yapılandırılabilir ekstrüzyon aracının (YEA) geliştirilmesine yönelik önerilen süreç açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise, ekstrüzyona dayalı yapım grameri geliştirme adımları açıklanmış ve gramer manuel araç ile biçimler üretmek için kullanılmıştır. Bu bölümün sonunda dijital ve fiziksel ortam arasındaki benzerlikler ve farklılıklar ortaya konmuştur. Son bölümde, tasarımda ve üretimde ekstrüzyona dayalı yeniden yapılandırılabilir aracın ve yapım gramerinin potansiyelleri ve kısıtları tartışılarak olası gelecek çalışmaları ortaya konmuştur.

1.2 Tezin Yöntemi

Bu tez çalışması, teorik çerçeveyi oluşturmak amacıyla dijital fabrikasyon, biçim gramerleri ve kitlesel bireyselleştirme konuları üzerine eleştirel okumalarla başlamıştır (Şekil 1.2). Bu eleştirel okumalar sonucu, dijital fabrikasyon araçlarında müdahaleye kapalı ve pahalı olma, tek malzeme ve uca sahip olma gibi kısıtlar ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, biçim gramerlerinin de yapımı kurallı hale getirmede faydalanılan bir yöntem olduğu tespit edilmiş, manuel araçlara bağlı yapım süreçleri üzerinden tanımlanan bir gramer çalışmasına rastlanmamıştır. Bu aşamada, biçim gramerlerinin sezgisel araç

kullanımını kontrollü hale getirmede nasıl kullanabileceği ile araca bağlı yapının yeniden-yapılandırılmasıyla nasıl biçimsel çeşitlilik üretilebileceği üzerine genel sorular sorulmuştur. Bu çalışmada analiz edilecek ve yeniden yapılandırılacak aracı belirlemek amacıyla sistematik haritalama yöntemine dayanan bir literatür araştırması gerçekleştirilmiş ve birim eleman üretmek için kullanılan hareketli mekanizmaya sahip esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçların mevcut kategorileri belirlenmiştir. Bu literatür araştırması sonucunda, bu araçların henüz prototipleme aşamasında bulunan bir araştırma alanı olduğu, tasarımı ve üretimi ile ilgili yöntem eksikliği bulunduğu ve ekstrüzyon yönteminin araştırmaya açık bir alan olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hibrit kullanıma sahip bu araçların yaparak öğrenme açısından potansiyelleri araştırmaya değer bulunmuştur.



Şekil 1.2 : Tezde izlenen yöntem.

Bu literatür araştırmasını takiben zanaat veya tasarım atölyelerindeki araçların teknolojik gelişmeler doğrultusunda nasıl özelleştirilebileceğini; zanaat-üretim hibritleşmesi üzerinden kurgulamak için yeniden yapılandırma kavramının seçilen manuel ekstrüzyon aracı üzerinden tartışılmasına karar verilmiştir. Araç seçiminde dikkat edilen hususlar, hem zanaatta hem de yapı endüstrisinde kullanılan bir araç

olması, vida gibi mekanik olarak hareketli bileşenlere sahip olması ve hem el hem motor ile kullanıma imkân vermesidir. Bu ölçütlere göre, elle kavranabilen ve kullanılabilen (hand-held) ve kil bazlı malzemeleri biçimlendirmeye yarayan rijit ekstrüzyon aracı, tasarımdan üretime iş akışını içeren iki aşamalı sürecin başlangıç mekanizması olarak seçilmiştir.

Sürecin ilk aşamasında, sezgisel olarak kullanılan araçların tasarımcılar ve zanaatkarlar tarafından düşük maliyetli, hibrit kullanıma imkân veren ve belirli bir biçim ailesi üretebilecek şekilde özelleştirilmesi için endüstriyel üretimde yer alan değişken ve hareketli araç bileşenleri ve süreçlerini içeren Yeniden-yapılandırılabilir İmalat Sistemleri (YİS) kavramsal çerçeve olarak kullanılmıştır. Bu süreç, zanaatkârın veya tasarımcının atölyesinde sezgisel olarak kullanılan manuel araçların, biçimlerin kontrollü ve elle yapıma göre hızlı bir şekilde üretilmesi için parametrelerinin ve yapım kurallarının belirlenmesi ile başlar. Bu araçların; farklı malzemelere, kontrol parametrelerine, araç bileşenlerine ve yapım kurallarının kombinasyonlarına dayalı araca bağlı yapılandırma şemasının oluşturulmasıyla devam eder. Seçilen başlangıç aracının hibrit bir araca çevrilmesi ise yapılandırma şemasında yer alan farklı kontrol parametrelerinin yapım üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için gerçekleştirilmiştir. Sürecin ilk aşamasının değerlendirmesinde, belirli kural setleri yardımıyla EA ve YEA ile üretilen biçimler fotogrametri ve değerlendirme için özel olarak yazılan görsel kod ve betikler aracılığıyla doğruluk oranları açısından karşılaştırılmıştır. Modülerlik, özelleştirilebilme, ölçeklenebilme, bütünleştirilebilme, değiştirilebilme, teşhis edilebilme, farklı malzemeler kullanabilme ve hibrit kontrole sahip ve müdahaleye açık olma ile çeşitlilik, doğruluk, üretim süresi ölçütleri yeniden-yapılandırılabilir bir aracın değerlendirme ilkeleri olarak tanımlanmıştır. Bu değerlendirmenin sonucunda, YEA'nın yapımdaki haptik duyu eksikliğine bağlı olarak ortaya çıkan görece yüksek doğruluk değeri açısından geliştirilmesi gerektiği belirlenerek yapım gramerinin dijital ve fiziksel ortamda işlerliğinin test edilmesine odaklanılmıştır.

Sürecin ikinci aşamasında, yapımın çözümlenmesi için biçim gramerinden yararlanılmıştır. Biçim gramerleri, biçimsel çeşitlilik yaratmada kullanılan görsel bir kural tabanlı sistem olduğu için tercih edilmiştir. Bu gramerin açığa çıkarılmasında deneysel yöntemden yararlanılmıştır. Farklı malzemeler, bileşen kombinasyonları ve kural setleri ile iki aşamalı deneyler düzenlenmiş, araca ait yeni bileşen ve fonksiyon

ilişkileri keşfedilerek mevcut çözüm uzayı genişletilmiştir. Bu deneyler vasıtasıyla ekstrüzyona dayalı yapım grameri oluşturulmuş, bu gramerden türetilen kural setleri aracılığıyla üretilen biçimler değerlendirme aşamasında kullanılmıştır. Ayrıca, EdYG kuralları Rhinoceros 3D üzerinde tanımlı Grasshopper’da yazılan bir görsel kod ile parametrik bir modele de çevrilmiştir. Bu sayede, farklı kural setleri ile dijital ve fiziksel ortamda üretilen biçimleri ölçümlemek ve karşılaştırmak mümkün olmuştur. Bu karşılaştırma ile, kalıp biçimlerine, kural setlerine, malzeme ve üreticinin kabiliyetine bağlı veriler elde edilmiş; yapım grameri kuralları ve üretilen biçimler arasındaki korelasyon ortaya konmuştur.

Tez sürecinde araştırma sorularını cevaplarken kullanılacak veri türü ve teknikler aşağıda belirtilmiştir (Çizelge 1.1). Tasarım araştırmaları gibi nitel veriler içeren çalışmalarda, teoriye dair geçerliliği sağlamak amacıyla karma yöntem kullanılmaktadır. Karma yöntem, aracılığıyla herhangi bir yönteme ait eksiklik başka bir yöntemin gücüyle dengelenebilmektedir. Bilgisayar simülasyonları gibi nicel yöntemler, değişkenlerin ölçümü ve kontrollü kesinlik bağlamında başarıyla, saha çalışmaları ve deneyleri ise modelin doğruluğunun mevcut bağlam kapsamında kanıtlanması anlamında başarılıdır.

Çizelge 1.1 : Araştırma soruları ve yöntem.

Araştırma Soruları	Yöntem-Veri Türü
AS1: Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinde kullanılan araç ve bileşenler, biçimin oluşturulma işlemine nasıl etki etmektedir?	DeneySEL Yöntem (Nitel ve Nitel) Araç bileşen-fonksiyon ve çıktı ilişkilerinin tanımlanması, gramerin geliştirilmesi
AS2: Yapım gramerine dayalı biçimlerin üretiminde manuel aracın ve bileşenlerinin yapılandırıldığı hibrit aracın dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları nelerdir?	Fotogrametri ve Simülasyon (Nitel) Farklı kontrol türleriyle üretilen fiziksel üretimlerin 3B tarama ve görsel kod aracılığıyla karşılaştırılması
AS3: Ekstrüzyona dayalı yapım grameri kullanılarak dijital ortamda üretilen biçimler ile bir araç yardımıyla şekillendirilerek fiziksel ortamda üretilen biçimlerin, doğruluk açısından farklarının dijital zanaat açısından ne tür etkileri olabilir?	Fotogrametri ve Simülasyon (Nitel) Fiziksel ve dijital ortamda yapım gramerine bağlı olarak üretilen biçimlerin 3B tarama ve görsel kod aracılığıyla karşılaştırılması
AS4: Zanaatkarın veya tasarımcının fiziksel ve dijital ortamda yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirebilmesi için dijital okuryazarlık açısından kazanması gereken beceriler nelerdir?	Karma Yöntem (Nitel ve Nitel) Sürecin potansiyellerinin ve kısıtlarının tartışılması

AS1, araç-bileşen-fonksiyon ve üretilen biçim ilişkilerini tanımlamak ve geliştirilen yapım grameri ile iş akışının açık bir şekilde tariflenmesi içindir. El ile deneyimleme ve öğrenme ile araç potansiyellerinin keşfedilmesi amacıyla deneysel yöntemden yararlanılmıştır. Deneyler belirli araç bileşenleri ve kural setleri açısından sınırlandırılarak kontrollü hale getirilmiştir. AS2, YEA'nın kullanımındaki kontrol parametrelerinin, çıktıların biçimsel çeşitliliği ve doğruluğuna olan etkisinin araştırılması içindir. Fotogrametri ve simülasyon yönteminden yararlanılarak EA ve YEA ile üretilen biçimler doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen veri, denemelerdeki gözlemlerle birleştirilerek araçların potansiyelleri ve kısıtları ortaya konulmuştur. AS3, fiziksel ve dijital yapım grameri arasındaki korelasyonun belirlenmesi içindir. Fotogrametri ve simülasyon yönteminden yararlanılarak elde edilen nicel veri, deneylerdeki gözlemlerle birleştirilerek yapımdaki sapma değerleri tespit edilmiştir. AS4, iki aşamalı sürecin, dijital zanaat ve üretici kültürü açısından değerlendirilmesi içindir. Önceki soruların cevapları AS4'ün cevabını oluşturur.

1.3 Özgün Değer ve Yaygın Etki

Bu tezin literatüre katkısı, üç yönlüdür. Bunlardan ilki, endüstrideki yeniden-yapılandırılabilir araç tasarım ve değerlendirme ölçütlerinin zanaat araçlarına entegre edilerek, yeniden-yapılandırılabilir fiziksel ve dijital araç geliştirmeye yönelik iki aşamalı bir süreç önerilmesidir. Ekstrüzyona dayalı Yapım Grameri (EdYG) ve manuel ekstrüzyon mekanizmasının yeniden yapılandırılması ile geliştirilen Yeniden-yapılandırılabilir Ekstrüzyon Aracı (YEA) bu ilkeler doğrultusunda geliştirilerek dijital zanaat ve üretici kültürü açısından değerlendirilmiştir. Tüm bu nicel ve nitel değerlendirmelerin sonucunda, geliştirilen fiziksel ve dijital aracın doğruluk açısından geliştirilmesi gerektiği belirlense de yapım süreçlerinin deneyim ve ölçme yoluyla araştırılmasında ve ölçümlemesinde, açık kaynaklı ve yeniden-yapılandırılabilen bir hesaplama aracı olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

İkincisi ise, bu protokolün vakası olarak, ekstrüzyona dayalı manuel bir araç ve buna bağlı yapım sürecine ait parametrelerin bir gramer aracılığıyla ortaya konması ve hibrit bir araç geliştirmeye yönelik olarak kullanılmasıdır. Bu sayede, literatürde daha önce birbirleriyle ilişkilendirilmemiş, yapım gramerleri ve araç tasarımı sentezlenerek tasarımdan üretime bir süreç kurgulanmıştır. Üçüncüsü ise, yazılım alanında kullanılan sistematik haritalama (systematic mapping) yönteminin birim eleman üretmede

kullanılan esnek ve yeniden yapılandırılabilir araç kategorilerinin belirlenmesinde kullanılması ile ortaya konulan özgün literatür araştırmasıdır. Literatürdeki çalışmaların analizi ışığında, bu türden araç geliştirmek isteyen tasarımcı, mimar ve mühendislerin kullanımına yönelik, bu araçların mekanizmalarına ait bilgiler içeren bir kılavuz oluşturulmuştur. Kavramsal çerçevesi oluşturulan hibrit araç (YEA), MMİ endüstrisinde birim eleman üretiminde kullanılan esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar ile ilgili çalışmalarda, bileşen tabanlı araçlar kategorisinde değerlendirilebilecek bir prototipin denemelerini içermektedir.

Önerilen süreç ile kendini üretici olarak tanımlayan tasarımcıların veya zanaatkarların mevcut yapım süreçlerini hesaplanabilir veriye dönüştürebilme ve zanaata özgü deneme yanılma süreci doğrultusunda geliştirilen araç ile, mevcut yapım sistemleri dışında yeni, öncül ve sürdürülebilir sistemler tasarlayabilme potansiyelleri ortaya konmuştur. Hibrit kontrole ve esnek bir ara yüze sahip araçlar, zanaatta olduğu gibi kademeli bir gelişmeye imkân vererek yapıma dair bilgiyi dönüştürme potansiyelini açığa çıkarabilmektedirler. Üretici kültürünün uzantısı olarak düşünebileceğimiz bu dijital zanaat kültürü sonucu, manuel araçların dijital olarak programlanabilmesi ile bilgiyi sanal platformlar aracılığıyla oluşturma, kaydetme ve paylaşma imkânı artacağı öngörülmektedir. Gelişen teknolojilerin zanaat pratiklerine aktarılması ile aşağıdan yukarı (bottom-up) bir gelişme sağlanması; bu zanaat pratiklerinin devamlılığı ve zanaattaki inovasyonun endüstrideki araştırma ve üretim mekanizmalarını beslemesi açısından önemli hale gelmiştir. Bu sayede, zanaat pratiklerinin dijital kültürün parçası haline getirilmesi ve zanaat odaklı inovasyonun endüstriye transfer edilmesi mümkün olabilecektir.

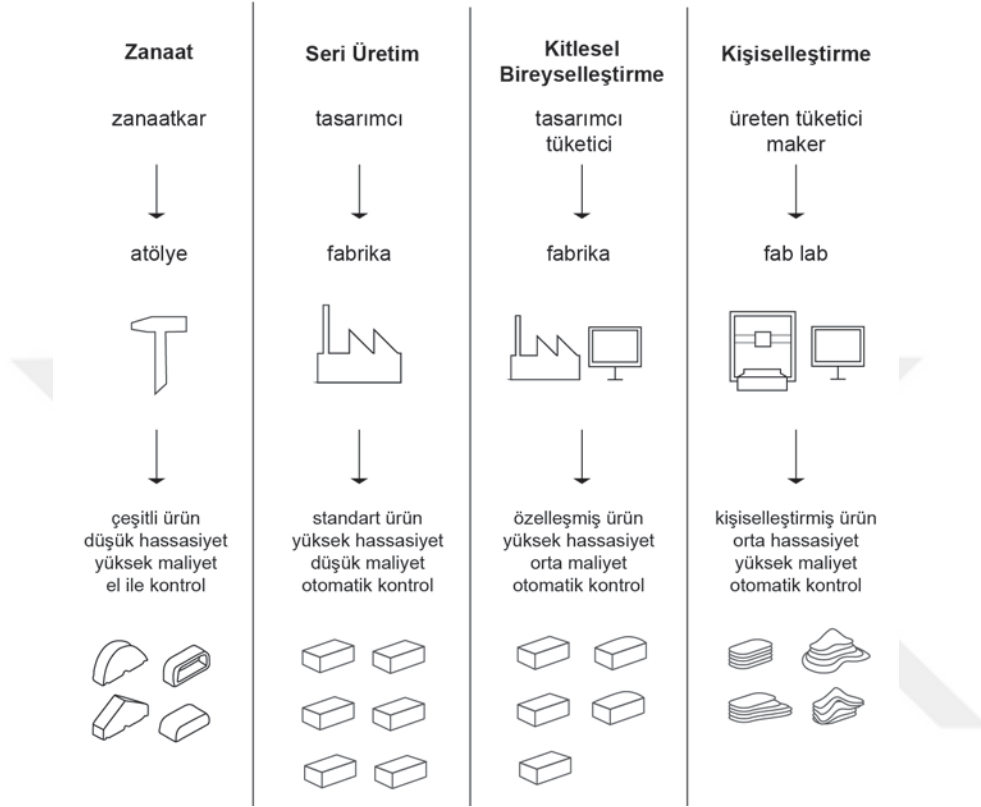
2. YAPMA BİÇİMLERİNİN DÖNÜŞÜMÜ

Bu bölümde, dijital zanaatın ortaya çıkışına zemin hazırlayan tasarım ve üretim paradigmalarındaki değişim, endüstri, mimarlık ve tasarım perspektifinden açıklanacaktır.

Üretim paradigmasının değişimine endüstri perspektifinden baktığımızda, zanaatkar tarafından el ile gerçekleştirilen çeşitli ürünlerin sınırlı sayıda üretilebildiği yapım süreçlerinin makineleştirilmesi ile karşılaşmaktayız (Şekil 2.1). Zanaat üretimi (ZÜ), kullanıcı ihtiyaçlarına yönelik ürünlerin yüksek maliyetle ancak sınırlı sayıda üretildiği ilk endüstriyel üretim biçimidir. İngiltere’de 1770’te ortaya çıkan ve tekstil endüstrisine uygulanan ilk makineleşme örneğidir. Endüstri 1.0 olarak isimlendirilir. (Hu, 2013; Yin ve diğ., 2018). Seri üretimde (SÜ) ise düşük maliyetli ve yüksek hacimde ürünler üretilir. Bu tür üretim zanaat üretimini takiben Endüstri 2.0 olarak isimlendirilir. Henry Ford tarafından üretilen Model T bu alandaki ilk örnektir. Montaj hattı üzerinde hareket eden ürün, farklı uzmanlığa sahip işçiler tarafından bir araya getirilir. İşçiler üretimin bütününe hâkim değildir. SÜ, kalite garantisini hedefler ve dolayısıyla birebir aynı ürünlerin aynı hassasiyette üretilmesini sağlar. Bu nedenle SÜ’de maliyet büyük oranda düşürülürken sınırlı çeşitlilikte ürün üretilir (Koren, 2006).

Kitlesel bireyselleştirme (KB) ise aynı üretim bandından çıkan ürünlerin üretim esnasında veya sonrasında kullanıcı seçimlerine göre farklılaştırılması yoluyla geniş bir ürün çeşitliliği sunmaktadır. Örneğin, bir otomobil, kullanıcı tercihlerine göre klima, ses sistemleri gibi ek bileşenler ile zenginleştirilerek farklı kullanıcı ihtiyaçlarını karşılar hale gelmektedir. KB ile farklı konsept ve teknolojiler gündeme gelmiştir. Ürün çeşitliliğini arttırmaya yönelik olarak; ürün aile mimarisi, yeniden-yapılandırılabilir imalat ve geciktirilmiş ürün farklılaşması gibi stratejiler önerilmiştir (Hu, 2013). Ürün aile mimarisinde belirli sayıdaki fonksiyonel modüller ile montaj kombinasyonları üretilir. Tüketici bu kombinasyonlar içerisinden seçim yapar. Bu sayede, belirli üretim modüllerinin yeniden-yapılandırılmasıyla ürün bazında çeşitlilik yaratılırken, üretime dair karmaşıklık azaltılmakta ve her bir ürün ailesi arasında ortak

bir dil oluşturulmaktadır. Yeniden-yapılandırılabilir imalat, değişen piyasa ihtiyaçlarına hızlıca cevap verebilmek için imalat sistemine ait bileşenlerin değiştirilebilmesidir. Geciktirilmiş ürün farklılaştırılması ise tüketiciye ait seçeneklerin ana ürüne sonradan eklenebilmesidir.



Şekil 2.1 : Üretim paradigmasının değişimi.

Hu'nun yanı sıra Piroozfar ve Piller (2013) tarafından da ürün tasarımına yönelik KB stratejileri önerilmiştir. Bunlar, çözüm kümesini genişletme (solution space development), seçenek navigasyonu (choice navigation) ve güçlü süreç (robust process) olarak tanımlanmıştır. Çözüm kümesi geliştirme, kullanıcının ihtiyaçlarını belirlemek üzere veri toplamak ve bunları değerlendirerek ürün bazlı bir kütüphane oluşturmaktır. Seçenek navigasyonu ise mevcut ürünün, kullanıcının ihtiyaçlarına göre karmaşık olmayacak şekilde yapılandırılarak farklılaştırılmasıdır. Güçlü süreç, üretim sürecine ait bileşenlerin tekrar düzenlenmesi sonucu yeni tasarımların dolayısıyla çeşitliliğin elde edilmesidir.

Güçlü süreç, geciktirilmiş ürün farklılaşması veya esnek üretim ile sağlanabilir. Geciktirilmiş ürün farklılaşması, otomobillerde kullanılan klima, ses sistemi gibi bileşenlerin ana ürüne sonradan eklenmesi ile gerçekleşmektedir. Esnek üretim, operasyonel ve değer-zinciri süreçlerinin segmentler halinde kurgulanması ve bu

segmentlerin kullanıcı isteklerinin çeşitliliğiyle eşleştirilmesidir (Pine ve diğ., 1993). Üretim bandındaki robotların tekrar programlanmasıyla ya da bulundukları hücrelerin değiştirilmesiyle yüksek bir maliyet artışına neden olmadan üretim süreci düzenlenebilmektedir.

Bu noktada, üretim aşamalarının veya bileşenlerinin yeniden düzenlenmesine imkân veren ve genelde modüler süreçleri içeren esnek ve yeniden-yapılandırılabilir üretim stratejileri ön plana çıkmaktadır. Üretim sistemleri, mevcut kaynaklardan tam olarak yararlanmak yerine imalat sistemlerinin esnekliğine ve uyarlanabilirliğine geçişin bir sonucu olarak ürün modülerliği yerine üretim modülerliğine odaklanmıştır (Kelkar ve diğ., 2005). Tek bir ürün yerine bir ürün ailesi tasarlanmıştır (Ferguson ve diğ., 2007). Pazardaki değişen ihtiyaçlara yanıt olarak, seri üretimdeki özel imalat hattı (ÖİH), esnek imalat sistemine (EİS) veya yeniden-yapılandırılabilir imalat sistemine (YİS) dönüştürülür. Yeniden-yapılandırılabilir sistemler, yazılım veya donanımın yinelemeli olarak değiştirilebildiği esnek sistemlerin bir alt kümesi olarak tanımlanır (Ferguson ve diğ., 2007). ÖİH, belirli bir ürünü büyük miktarlarda üretmek için tasarlanır. EİS ise bilgisayarlar tarafından kontrol edilen makine modüllerine sahiptir. Kabul edilebilir bir maliyetle özelleştirilmiş ürünler de üretebilen EİS, hızlı ancak sınırlı olan esneklik derecesine sahip YİS'ten farklıdır (Bortolini ve diğ., 2018). EİS'de CNC, robot kolu ve 3B yazıcılar gibi dijital fabrikasyon araçlarının kullanılması nedeniyle, bu sistemle üretimdeki herhangi bir değişikliğe uyum sağlayabilir.

Esnek üretim, sayısal yazılım ve araçlara ihtiyaç duyar, dolayısıyla hem ilk yatırım maliyeti hem de yazılım ve donanım yükseltmelerini düşündüğümüzde yüksek maliyetli bir yöntem olarak karşımıza çıkar (Koren, 2006; Roumeliotis, 2015). Ürün çeşitliliğinin en yüksek olduğu bu üretim sistemleri çok fazla bileşen, süreç, tedarikçi, satıcı ve dağıtım mekanizmalarına ihtiyaç duyar. Bununla birlikte, EİS'in yatırım maliyeti, montajın kombinatoriyal mantığından yararlanan YİS'den daha yüksektir (Koren, 2006). Çeşitlilik ve üretim hacmi arasında bir uzlaşma sunan YİS, ÖİH ve EİS arasında kategorize edilir (ElMaraghy, 2005; Hu, 2013). Üretim hattındaki ve makine bileşenlerindeki yeniden-yapılandırmalar, hesaplamalı tasarım ve üretime ilişkin esnek yazılım ve donanım kullanılarak tersine çevrilebilir.

KB ile ürün çeşitliliği sağlansa da bu üretim biçiminin sürdürülebilirliği tartışmalıdır. Walker'ın (2006) belirttiği gibi, sürdürülebilirlik yöntemleri coğrafi ve kültürel bağlamda ele alınmalıdır. Yerele özgü sorunların merkezileşmiş üretim mekanizmaları

tarafından çözümlenmeleri oldukça güçtür. Walker (2011) sürdürülebilirliğin bireye uygun olması gerektiğini vurgulayarak üretim mekanizmalarında aşağıdan yukarı bir gelişmeyi destekler. Ayrıca, zanaat pratiğinde olduğu gibi, ürünle ve onun yapımıyla kişisel bir ilişki kurulması gerektiğini savunur. Bu kapsamda, yerele özgü malzeme, üretim kapasitesi ve beceriler kullanılarak ürünün tamirini, yeniden işlevlendirilmesini ve üretilmesini kapsayacak şekilde yani sürdürülebilir üretim mekanizmaları oluşturulmalıdır. Bu tür bir üretim ekolojisinin potansiyelleri, insanların farklı ihtiyaçlarının ve kültürel tercihlerinin karşılanması, nakliye ve paketlemenin azaltılması yoluyla çevresel zararı azaltma, kaynakları sürdürülebilir şekilde kullanma, kendine güvenen katılımcı topluluklarını artırma, yerel ve bölgesel düzeylerde istihdam sağlama şeklinde özetlenebilir (Avcı, 2019).

Ürün çeşitliliği arttırılırken tüketicinin aktif katılımının amaçlanması ile ürün bazında kişiselleştirme fikri ortaya atılmıştır. Öznesi tasarımcı veya üretici olabilen üreten tüketici (prosumer), tasarımın tüm aşamalarında bulunabilir. Zanaattan etkilenen bu akım, bir ürünün tasarımından yapımına hatta bakımına ve onarılmasına kadar geniş kapsamlı bir yaşam döngüsünün ele alınmasını sağlar. Hu'ya göre bu kapsamda geliştirilen konseptler; kişiselleştirilmiş tasarım, talebe bağlı üretim sistemleri, açık kaynaklı ürünler ve siber-fiziksel sistemlerdir (2013). Kişiselleştirilmiş tasarımda kullanıcı belirli bir tasarım diline yani strüktüre sahip arayüz ile tasarım parametrelerini manipüle ederek farklı ürünler tasarlayabilir. Bu bağlamda, kullanıcının tasarım sürecine dahil edildiği ortak tasarım araçları ortaya çıkmıştır (Von Hippel, 2001). Bu sayede farklı bileşenlerin kullanıcı tarafından bir araya getirildiği ürün kişiselleştirmeleri gerçekleştirilmektedir. Örneğin, Nervous Systems'in geliştirdiği Radiolaria uygulaması (Nervous System, 2007) ile hücresel biçimlere dayanan takı ve ev eşyaları üretilebilmektedir. Açık kaynaklı platformlar üzerinden tedarik edilebilen farklı modüller yoluyla ürün kişiselleştirilmesi yapılabilir. Siber-fiziksel sistemler ise, sayısal tasarımın üretim mekanizmalarıyla entegrasyonunu öngörür. Kişiselleştirmede, dijital tasarım ve üretim araçlarının kullanımıyla kullanıcıların tercihleri ile şekillenen ürün çeşitliliği elde edilmiştir. Kural tabanlı üretim ve yapım gramerleri buna benzer bir çeşitliliğin elde edilmesinde etkin araçlar olarak kullanılabilirler.

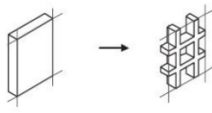
2.1 Kural Tabanlı Üretim: Yapım Gramerleri

Parametrelere ve algoritmalara dayalı sayısal tasarım ve üretim araçları ile, dijital olarak geliştirilen tasarımlar fiziksel olarak üretilebilir hale gelmiştir. İnsan uzmanı desteklemek ve/veya tasarım sürecini otomatikleştirmek için kullanılan üretken sistemler (Singh & Gu, 2012) çeşitli parametrelerle tanımlanan tasarım süreçlerinin kurgulanmasına imkân verirler. Çözüm uzayının genişletilmesi, eniyilemeye (optimizasyon), enerji verimliliği gibi geniş bir problem uzayında kullanılırlar. Genellikle aşağıdan yukarıya (bottom-up) tasarım anlayışının hâkim olduğu üretken sistemlerde geometrik ilişkiler, belirli parametreler ve kural setleri yardımıyla tanımlanır. Değişken ve sabitlerin kontrolü ile tasarımda doğruluk, süreklilik ve tekrarlanabilirlik elde edilir.

Biçim gramerleri, bir dizi biçimsel kurala dayalı olarak, mevcut tasarımları analiz etmek veya görsel-mekânsal hesaplama yoluyla tasarım gramerleri üretmek için kullanılan kural tabanlı bir tasarım yaklaşımıdır. Biçim gramerleri, mevcut tasarımları çözümlemek (Çolakoğlu, 2005; Stiny & Mitchell, 1978) ve mevcut tasarımlardan mekânsal konfigürasyonlar olarak türetilen kural setleri aracılığıyla yeni stiller oluşturmak için kullanılır (Duarte, 2005; Kotsopoulos, 2008; Stiny, 1980). Biçim gramerlerinde, tanımlanmış kurallar, bir dizi tasarım oluşturmak için başlangıç biçimine (initial shape) yinelemeli olarak uygulanır. Biçim gramerlerindeki biçim muğlaktır ve belirlenen kurallar ile tanımlı hale getirilebilir. Stiny ve Gips'in ilk makalesinde (1971) kural dizileri ile biçim oluşturma ve bu biçimleri fiziksel olarak üretme ayrık süreçler olarak kurgulanmıştır. Biçim gramerlerinde biçimler mekânsal olarak tanımlandığından sembollerle tanımlanan set gramerlerinden farklı olarak, bu biçimlerin fiziksel ortamda bir araya getirildiklerinde çakışmaları olasıdır. Dolayısıyla, Frobel bloklarında olduğu gibi (Stiny, 1980) ayrık elemanlara ait gramerler üretilirken set gramerlerini kullanmak daha yerinde olur. Bu alandaki çalışmalar, Heisserman'ın Genesis programı ile ürettiği Boeing Boundary Solid Grammars (1990), Mitchell'in, strüktürel ve inşa gerekliliklerini yerine getirmeye yönelik olarak önerdiği fonksiyonel gramerler (1991) ve çakışma önleyen gramerlerdir (Krstic, 2001). Set gramerleri özellikle, bileşenlerin kombinatoriyel olarak bir araya getirilmesi ile bütünde çeşitlilik üretmek amacıyla kullanılır.

Biçim gramerlerinin alt başlığı olarak yapım ve inşa süreçlerinin çözülmesine dayanan fiziksel gramer çalışmaları ortaya çıkmıştır. Dijital fabrikasyon kısıtlarından yola çıkan gramer çalışmaları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Biçim grameri ve dijital fabrikasyon araçları arasındaki ilişki, bir katıy malzeme ve makine kısıtlarına göre alt bölümlere ayırma süreci olan inşa gramerini (construction grammar) ortaya çıkarmıştır (Sass, 2006). Bu bağlamda, biçim gramerleri, malzeme ve bağlantı detayları ile ilgili yapı bileşenlerinin montaj sürecini sistematik hale getirmek için bir kitlesel bireyselleştirme yöntemi olarak kullanılmaktadır (Knight ve diğ., 2008; Kotsopoulos, 2008; Sass, 2006, 2008). Bu yöntemde amaç, yapının bütünü neredeyse hiç değiştirmeksizin, bu bütünü malzeme ve üretim kısıtlarına göre alt bölümlere ayırarak üretmektir. Ön üretimli birimler yardımıyla şantiyede oluşan maliyetin ve hata payının azaltılması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım sonucu, modüler sistem tasarımına dayanan birbirine kenetlenen birimler ve paneller üretildiği görülür (Knight ve diğ., 2008; Sass, 2006). Aynı zamanda, projeye özgü birim eleman üretimi ve birleşim detayı oluşturulduğu için yapı elemanı anlamında özelleştirmeye gidildiği söylenebilir.

Çizelge 2.1 : Literatürde yer alan fiziksel gramer örnekleri.

Görsel	İsim	İşlev	Malzeme	Üretim Biçimi
	Ahşap Çerçeve Grameri (Sass, 2006)	Konut	Kontrplak	CNC
	Fiziksel Tasarım Grameri (Sass, 2008)	Duvar	Plastik	3B Yazıcı
	Yunan Motifi (Knight ve diğ., 2008)	Duvar	Beton	CNC kalıplama
	Simmons Hall (Kotsopoulos, 2008)	Cephe	PerfCon Panel	Endüstriyel üretim

Bu kapsamda üretilen örneklere baktığımızda, düşük maliyetli, yüksek kaliteli ve görsel olarak tatmin edici duvar sistemleri önerildiğini görmekteyiz. Bu duvar sistemlerini oluşturmak için kullanılan birim elemanlar prototipleme ölçeğinde 3B

yazıcı ile (Sass, 2008) 1:1 ölçekte ise kalıplama yöntemi ile üretilmiştir (Knight ve diğ., 2008). Farklılaşan geçmeli birimlerin, birleşim kuralları sayesinde bir araya geliş biçimleri kurgulanarak inşa sürecinin otomatik hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmalarda, “boşluk” (Kotsopoulos, 2008) ve “Yunan motifi” (Knight ve diğ., 2008) gibi kavramsal ve biçimsel çıkış noktalarından faydalanılmıştır. Buradan hareketle, gramerlerin erken tasarım aşamasından üretim aşamasına kadar kullanılabileceği belirtilmiştir.

Biçim gramerleri ve zanaatın ara kesitinde ise, kural setleri aracılığıyla tanımlanan yapım gramerleri ortaya çıkmıştır. Knight ve Stiny’nin (2015) önerdikleri “yapım gramerleri” tasarımların el veya dijital fabrikasyon araçları ile üretilmesinde kullanılan yapım adımlarının çözümlenerek yapıma dayalı biçimsel çeşitliliği keşfetmeyi amaçlar. Biçim gramerleri ile tasarlamak “yapmak ve görmek” olarak tanımlanmışken ellerin veya makinelerin zanaat performansları ile şeyler üretmek ise madde ile “yapmak ve hissetmek” olarak tariflenmiştir (Knight, 2018; Knight & Stiny, 2015). Bu argümanın ardından, malzemeyi açıkça manipüle etmek için birkaç uygulamalı yapım süreci gerçekleştirilmiştir (Gürsoy & Özkar, 2015; Knight, 2018). Bu araştırmaların ortak özelliği gramerlerin, el ile yapım adımlarının görsel notasyonlar aracılığıyla soyutlanması için kullanılmasıdır. Yapım gramerleri, manuel yapım performansının kısmi görselleştirilmesiyle sınırlıyken; inşa gramerleri, fabrikasyon araçlarına bağlı üretim süreçlerini değiştirmek veya geliştirmek yerine yalnızca üretim ve montaj işlemlerini otomatikleştirmek için kullanılmaktadır.

Biçim gramerleri gibi kural tabanlı tasarım yöntemlerinde, geometrik çözüm uzayında keşif, parametrelerin ve bunların ilişkilerinin manipülasyonu ile mümkündür. Bu model tarafından tanımlanan görsel-mekânsal ortam, biçim ve şeylere ait çeşitli tasarımları sistematik olarak ifade etmeyi sağlar. Bu hem tasarımların hem de yapım süreçlerinin soyutlanması yoluyla çözüm uzayının araştırılmasına yarar. McCullough'a göre, keşif sürecinin manipülasyonlar halinde gerçekleşmesi için üretken bir yapının var olması gerekir (1996). Tasarımcılar, bilgisayarlardan farklı olarak, üretim yöntemi ile ilgili belirli yetenekler veya belirli araç ve gereçlerle kurulan ilişki sonucunda ortaya çıkan beklenmedik dirençler arayışı içindedirler (Kolarevic, 2008). Bu hipoteze göre, biçim gramerlerinde tartışılan belirme kavramı zanaattaki doğaçlama kavramı ile örtüşmektedir. Biçim ve yapım gramerlerinde belirme, kural setinin tekrarlı bir biçimde uygulanmasını takiben ortaya çıkan biçimlerin yeniden

yorumlanması sonucu asıl plandan sapma ve keşfin beklenmedik bir sonuç olarak ortaya çıktığı yaratıcı süreçlerin bir parçası olarak kabul edilir (Knight, 2018). Elle yapım süreçlerini formalize etmek, beklenmedik örüntüler ve biçimler ortaya çıkarabilir (Knight, 2018).

Kullanılan aracın el ile manipüle edilmesi yoluyla da önce kurallara dayanan bir katkı sonra ise bu kurallarla üretilen çıktılar içerisindeki yeni ve beklenmedik biçimlerin keşfi yapım gramerlerine getirilen yeni bir yorum olarak düşünülmektedir. Biçim hesaplaması yerine araç bileşenlerinin ve işlevlerinin kombinasyonlarına dayalı bir gramer ile çözüm uzayı keşfedilebilir. Çıktılara değil, malzemeyi araç ile biçimlendirme sürecine odaklanılarak bir yapım grameri oluşturulabilir. Manuel bir araç, parametrik modelde olduğu gibi varyasyon oluşturmak için kontrol edilerek yeniden yapılandırılacak şekilde parametreler ve kurallar aracılığıyla tanımlanabilir. Özellikle uzman olmayan tasarımcılar ve çoklu kullanıcılar için görsel olarak tanımlanan kurallar, yapım sürecini formalize etmek ve gramerin uygulanmasını kolaylaştırmak için bir ortam oluşturabilir.

2.2 Zanaata Dayalı Kurallı Üretim: Dijital Zanaat

Zanaat, geçmişten bu yana süregelen teorik ve pratik bilginin görerek takip etme ve yaparak yeniden canlandırma yani taklit yoluyla öğrenildiği bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Sennett'e göre zanaatkarlık, işin içine girmek olarak belirtilen özel bir insani durumu temsil eder. Arkaik Yunanca'da zanaat nesilden nesle aktarılan beceri olarak tanımlanır. Aristo ise zanaatkarı el işçisi olarak açıklar. Plato'ya göre beceri yapma (poiein) eyleminden gelir. İşinde mükemmelliğe ulaşma isteği zanaatkarı güdüler (Sennett, 2008). Ellerin kullanıldığı herhangi bir meslek zanaat olarak tanımlanabilir. Aynı biçimi tekrar ve tekrar üretmek için kullanılabilecek belirli sayıda ve tanımlı mekanik eylemler bütünüdür (McCullough, 1996). David Pye (1968), zanaatkarlığı makine üretiminden ayırarak, bu türden işçiliği üretimin kesinliği bakımından risk işçiliği olarak tanımlar.

Zanaat pratiğinde, mükemmele ulaşma isteği, taklit (imitation), tekrar (repetition) ve doğaçlama (improvisation) süreçlerini izler. Çıraklık eğitime başlayan her birey, ustasını taklit ederek pratiğe adım atar. Çıraklık eğitiminde, ustanın eylemlerinin tekrar edilmesi, bu eylemlerin daha da içselleştirilmesini sağlar ve doğaçlama süreci başlar. Yapmanın bedensel deneyimiyle kazanılan bilgi, örtük bilgi olarak tanımlanır

(Polanyi, 1966). Şeyleri yapmak yoluyla elde edilen örtük bilgi, başlangıçta ifade edilemez (Dormer, 1997), ancak tarifler aracılığıyla açıkça ortaya konulabilir (Polanyi, 1958). Bu tarifler, yapımın parametrelerinden ve talimatlarından oluşur. Sennett'e (2008) göre, örtük bilgi, kişinin öz farkındalığı ile açık bilgiye dönüşerek beceri gelişimine yol açar. Beceri, dosyadan fabrikaya (file-to-factory) üretimde eksik olan ve döngüsel olarak gerçekleşen örtük ve açık bilgi arasındaki bilgi aktarımı yoluyla kazanılır. Sorgulama sanatı (art of inquiry) olarak adlandırılan yapma ve görme yani yorumlama süreçleri, yapım esnasında elde edilen geri bildirimler yoluyla ustalaşmayı sağlar (Ingold, 2013). Yapararak öğrenilen beceri (McCullough, 1996), malzeme, araç ve tekniğe ait potansiyellerin deneme yanılma yoluyla keşfedildiği, zanaatın en belirgin özelliğidir.

Sennett'e göre problem çözme ve problem tespitin keşfe dayalı ritmik düzeni, antik çömlekçi ile günümüz programcılar için ortaktır. İnsana ait tekrara, eğitici ve elle öğrenmeye dayanan bilişsel kavrayış, makineler tarafından engellenmiştir (2008). Sennett (2008) zanaat bağlamında simülasyonun ise dijital olarak pek mümkün olmadığını vurgular. Ancak, makineleşme yoluyla kaybedilen tekrar ve keşif süreçlerinin üretici kültürü bağlamındaki dijital zanaat çalışmaları ile tekrar ele alındığı söylenebilir. Bu noktada simülasyon; biçimin tasarlanmasında, üretim öncesinde üretim aracına bağlı olarak modellenmesinde ve üretim sonrasında üretilen biçimin ölçülünerek dijital modele geribildirim sağlanmasında kullanılabilmektedir.

Çığır açan teknolojilerin (Disruptive Technologies) zanaata aktarımı sonucu, algoritmanın veya parametrik modelin dijital ortamda manipüle edilmesi mümkün olmuştur. Dijital zanaat, biçim gramerlerindeki belirme kavramına benzer şekilde, ortaya çıkan veya beklenmeyen sonuçlar elde etmek için ortamın olanaklarından tam olarak yararlanarak, ortamı yaratıcı bir şekilde kullanmaktır (McCullough, 1996). Dijital nesnenin işlenmesi yani arayüzler aracılığıyla yinelemeli olarak gerçekleştirilen manipülasyonlar ile şekillendirilmesi sonucu elde edilen bilgi, bir tür örtük bilgi olarak tanımlanır.

Çığır açan teknolojilerin zanaata ikincil aktarımı sonucu ise fabrikasyon araçları vasıtasıyla dijital nesnenin doğrudan fiziksel nesneye çevrilmesi mümkün olmuştur (Mitchell, 2003). Tasarımcılar dijital fabrikasyon araçları sayesinde, tasarladıkları nesneleri fiziksel olarak da üretme imkanına sahip olmuşlardır (Carpo, 2011). Bu araçlar, dijital modeli GCode adlı makine diline çevrilmiş bir dizi talimat aracılığıyla

fiziksel bir nesneye dönüştürür. Dijital fabrikasyon araçlarıyla sağlanan doğrudan veri iletimi, doğruluk ve zaman açısından zanaata göre belirli avantajlar sunsa da el ile yapımda gerçekleşen keşfi sınırlandırır. Dijital zanaat, dijital fabrikasyonun eksikliklerinin üstesinden gelmek ve dosyadan-fabrikaya üretimin (file-to-factory) doğrusal süreçlerini kırmak için, fabrikasyon bilgisinin tasarıma etki ettiği döngüsel iş akışları geliştirmeyi amaçlar. Oxman, dijital zanaatın malzeme seçimi, imalat ve montaj aşamalarından oluştuğunu belirtir. Şeyleri verimli bir şekilde üretmek için kodun adım adım işletilmesinden ziyade, aracın ve yapım sürecinin biçimi nasıl etkilediğine odaklanır (2007). Bu fikir, yeni tasarımların ve süreçlerin keşfedilmesi için araç ve malzemeyle gerçekleştirilen ve deneme yanılmaya dayanan yapımdaki tekrara vurgu yapmaktadır.

Bu yinelemeli keşif süreçlerinin hem dijital hem fiziksel ortamda kurgulanması yoluyla manuel araçlar geliştirilebilir. McCullough (1996) tarafından tanımlanan sınırlı yazılım kapasitelerinin becerikli ve yaratıcı bir şekilde kullanması olarak tanımlanan dijital zanaat, fiziksel araçların rijit kullanımlarının dışına çıkılması olarak da tanımlanabilir. Zanaatta doğaçlama olarak tanımlanan bu durum, aracın kullanım olanaklarının yaratıcı şekilde genişletilmesidir (McCullough, 1996; Walker, 2011). David Pye, dijital modelin tam bir çevirimini makineye aktarmak yerine, hazırlık işçiliği aşamasında üretime yardımcı araçların yorumlanması yoluyla, mevcut araçlardan yeni araçların üretilebileceğini belirtmiştir (1968). Mevcut araçların yeni teknolojilerin kademeli olarak entegrasyonu ile geliştirilmesi, zanaatkarın teknolojik gelişmelere yabancılaşmasını önleyerek bilinen araç ve tekniklerden türeyen, yeni araçlar geliştirmesine imkân tanıyabilir.

Araç geliştirme açısından baktığımızda, aracın el ile deneyimlenmesi yoluyla yaratıcı kullanımı ve gerektiğinde ek bileşenlerin geliştirilmesi, bir tür doğaçlama ve keşif süreci olarak tanımlanabilir. Araç bileşenlerinin yeniden-yapılandırılması olarak tanımlanan bu süreçte; aracın mevcut bileşenlerinin değiştirilmesi, birleştirilmesi ve hareketli hale getirilmesi ile çözüm uzayının genişletilmesi mümkündür. Zanaattaki bu deneysel ve sezgisel süreç, doğruluk ve hassasiyetin her bir araç ve yapım süreci için ölçülmesini ve tanımlanmasını gerektirir. Doğruluk, her bir çıktının tasarlanan biçime ne kadar yakınsadığı, hassasiyet ise bir doğruluk değerine etkiyen sapma değerlerinin ölçülmesinin tekrar edilebilmesidir. Bu açıdan bakıldığında, el ile kullanılan araçlarda yapım kurallarının tekrarlı olarak tatbik edilmesi ve üretilen

biçimlerin doğruluk açısından değerlendirilebilmesi için hesaplamalı düşünceye ihtiyaç vardır.

Zanaatkar tarafından sağlanan benzersiz el yapımı ürünlerin yüksek maliyeti (Luckman, 2013) ve zanaatla ilgili konulara olan ilginin son yıllarda azalması (Warburton, 2016) göz önüne alındığında zanaat uygulamalarına yeni teknolojilerin entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Böylece, dijital zanaat, kontrolün merkezileştirilmesini sağlayan sürdürülebilir bir üretim modeli olarak “yerel yönelimli, dağıtılmış ve çeşitlenebilir bir üretim ekonomisi” sunabilir (Gibbs, 2005; Orr, 2002) ve bu da tasarıma özgü araçların ve yöntemlerin kullanımıyla mümkün olmaktadır (Väänänen & Pöllänen, 2020). Hem el ile deneysel keşfe izin veren hem de fiziksel hesaplama araçları yardımıyla kontrol edilebilen hibrit araçlar, açık ve paylaşılabılır tasarım ve üretim ortamları sunabilir. Bu ortamlar, “kolektif buluş” (Allen, 1983) veya “kültürel doğaçlama” (Hallaam & Ingold, 2007) yoluyla geleneksel zanaatta yavaş olarak gerçekleşen sürekli yeniliğe izin verecek şekilde zanaatı dönüştürebilir (Sennett, 2008). Bilginin hızlı bir şekilde dolaşıma girmesi, onun yeniden yorumlanma ve geliştirilme potansiyelini de arttırabilir.

2.3 Ortamın Dönüşümü: Yeni Bilgi Paylaşım Kanalları

Teknolojik gelişmelerin kendin-yap kültürüne entegrasyonu ile birlikte üretici kültürü ortaya çıkmıştır. Bu süreçlerin bir bölümünün, kişisel ve dolayısıyla dağıtılmış ve düşük teknoloji ile üretim araçlarına bağlı olarak, bir diğer bölümünün ise yüksek teknolojiye sahip dijital fabrikasyon araçları ile merkezileşmiş fabrikasyon laboratuvarlarında gerçekleştiğini görmekteyiz. Düşük teknoloji ile üretimlerde, Arduino gibi fiziksel hesaplama araçlarıyla da zenginleştirilebilen yeni ürünler veya araçlar geliştirilmiştir. Dijital fabrikasyon araçlarından özellikle 3B yazıcılar sayesinde bireylerin ihtiyaçları olan herhangi bir şeyi istedikleri zaman ve istedikleri yerde tasarlayıp üretebilecekleri belirtilmiştir (Gershenfeld, 2012). Ancak, fabrikasyon araçları genellikle ihtiyaç duyulan ürünlerin boyutları, maliyetleri ve üretim süreleri gereği, küçük ölçekli üretimde ve hızlı prototipleme aşamasında kullanılmışlardır. Bu araçlar orta ve büyük ölçekli biçimleri sınırlı tezgâh boyutlarından dolayı üretemezler. Ancak, başka araçlar geliştirebilmek için gerekli bileşenleri ve birleşim elemanlarını üreterek orta ve büyük ölçekli biçim üretimine katkı sağlayabilirler. Öte yandan, bu araçların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte

global ölçekte tasarlanan bir ürünün yerel ölçekte üretilmesi amaçlanmaktadır. Açık imalat olarak da adlandırılan bu sosyoekonomik model, “Küresel Tasarla, Yerelde Üret” sloganına sahip, açık kaynaklı ve iş birliğine dayanan bir hareket olarak karşımıza çıkmaktadır (“Open Manufacturing”, 2020). Bu sayede, yerel problemlere yerel çözümler üretilerek global ölçekteki üretim mekanizmalarına olan bağımlılık azaltılabilir ve sürdürülebilir bir üretim ekolojisi oluşturulabilir.

Pratik bilginin oluşturulması, kaydedilmesi ve aktarılması süreçlerine baktığımızda ahilik teşkilatlanmasıyla başlayan çeşitli meslek gruplarının bir araya geldiği meslek odaları ile devam eden organizasyonel yapılar ile karşılaşmaktayız (Şekil 2.2). Atölye veya stüdyolarda usta-çırak ilişkisi ile araçlar ve yapma biçimleri üzerinden pratik bilgi aktarımı devam etmiştir. Bauhaus’ta ise bu usta-çırak ilişkisi yeni bir biçim kazanarak tasarım bilgisi ve teknik bilgi, iki farklı usta tarafından aktarılmaya başlamıştır (Celani, 2012). Dijital fabrikasyon araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, fabrikasyon laboratuvarları ortaya çıkmıştır. Bu mekânlar, çeşitli sayısal araçların yanı sıra marangozluk ve kil biçimlendirme gibi manuel araçların da yer aldığı bir araç kütüphanesine sahiptir. Genellikle ölçekli maket, obje ve mobilya benzeri ürünler üretilen bu laboratuvarlarda, birlikte yapma ve öğrendiğini paylaşma süreçleri de gerçekleşebilmektedir.



Şekil 2.2 : Pratik öğretimin mekânsal değişimi (Celani (2012)’den uyarlanmıştır.).

Günümüzde yapının dijitalleşmesi sonucu, fiziksel üretim mekanlarının yanı sıra sanal loncalar (virtual guilds) adı verilen yeni platformlar ortaya çıkmıştır. Bu platformlar, pratikteki üretim aşamalarına dair bilgi paylaşımı, uzman görüşü alma ve destek verme amaçlarıyla kullanılmaktadır (Sabiescu ve diğ., 2015). Açık kaynaklı yazılım ve çevrimiçi paylaşım ağları ile bilgi birikimi, geleneksel zanaat ile uğraşan çeşitli gruplara (loncalar, ahi teşkilatları, meslek odaları ve diğ.) kıyasla herhangi bir yerde ve herhangi bir kişiyle paylaşılabılır hale gelmeye başlamıştır. Bu dağıtılmış ve merkezsizleşmiş platformlar sayesinde, ürün kalitesi, heterojen bir kolektif zekâ ile sağlanır (Bonanni & Parkes, 2010).

Tasarlanan ürünlerin dijital platformlarda açık kaynaklı olarak paylaşılmasıyla birçok üretici bu ürünlere erişebilmiştir. Bu bilgiyi kullanabilme dijital bir okuryazarlık gerektirmektedir, ancak açık tasarımda gerekli olan uzmanlık halihazırda çeşitli sayısal yazılım ve araçların öğretilmesi amacıyla yerel yönetimler, üniversiteler veya özel sektör tarafından sunulmaktadır. Örneğin, yerel yönetimler tarafından 3B yazıcı eğitimleri verilmekte, zanaatkarlar tasarımlarını üretebilmek için çeşitli yazılımlar ve araçlar öğrenmekte ya da geliştirmektedirler. Üreticilerin dijital ortamlarla etkileşimi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar:

- Üretimlerini web topluluklarındaki iletişim araçlarıyla tüketen, oluşturan, paylaşan üreticiler,
- Dijital ortamın kendisini zanaat aracı olarak kullanarak yapıtlarını üretenler,
- Hedef yapıtı, etkileşimli bir ürün veya bir dijital ortam olan üreticilerdir (Katterfeldt, 2014).

Üreticilerin dijital araçlarla olan etkileşimlerini belirleyen üç eşik tanımlanmıştır. Bunlardan ilki, üreticilerin dijital ürünü kişisel bilgisayarlarına indirmesi ve 3B yazıcılar aracılığıyla üretmesinin içerir. İkincisi ise, üreticinin 3B tasarım yazılımlarını kullanarak indirmiş olduğu modeli düzenlemesi ve özelleştirmesidir. Bu aşamada tasarım çözüm uzayının genişletilmesi beklenir. Son aşamada ise, üretici kişiselleştirdiği ürünü fiziksel olarak üretmek için kendi 3B yazıcısını yaparsa hem dijital hem fiziksel araçların potansiyellerini en üst seviyede keşfetmiş sayılır (Katterfeldt, 2014; Resnick ve diğ., 2005). Bu aşamalı gelişmeye üretici kültürü açısından baktığımızda ise, zanaatkarın dijital zanaatkara dönüşebilmesi için “kolay araçlar, hesaplama dayalı soyutlama bilgisi, 3B model yaratımı ve programlama

açısından desteklenmesi gerektiği belirtilmiştir (Katterfeldt, 2014). Bu imkanlardan birine veya birkaçına sahip olmanın sonuç ürünlerdeki biçimsel çeşitliliği, doğruluk ve hassasiyet oranlarını, el ile keşfetme ve öğrenme süreçlerini doğrudan etkilediği düşünülmektedir.

Üretici kültürünün de etkisiyle, halihazırda Avrupa'daki yerel zanaat ve tasarım atölyelerine yeni teknolojileri entegre etmek için MadeEu isimli bir program yürütülmektedir (Made@Eu, t.y.). Bu kapsamda verilen eğitim ve destekler yoluyla dijital zanaat atölyeleri oluşturulmaktadır. Bu sayede, yereldeki malzeme, bilgi birikimi ve iş gücü kullanılarak yine yerelde ortaya çıkan kullanıcı ihtiyaçlarına ve problemlerine yönelik sürdürülebilir bir atölye modeli geliştirilebilir. Oluşturulan bu atölye, dijital olarak sanal lonca olarak nitelendirilen çevrim içi platformların bir parçası olurken fiziksel olarak da dijital zanaat atölyeleri ağının bir parçasıdır. Bu açıdan önerilen dijital zanaat atölyeleri modeli siber-fiziksel bir sistemdir. Siber-fiziksel sistemler fiziksel durumun geri besleme yoluyla dijital modeli etkilemesine ve dönüştürmesine dayanır (Hu, 2013). Dağıtılmış İmalat Sistemleri (DİS) olarak tanımlanan bu yeni sürdürülebilir ekolojide, esnek ve adapte olabilen küçük ölçekli fabrikalardan oluşan yerel ağların, lojistiğin azaltılmasından dolayı karbon emisyonunu azaltacağı, bölgesel gelişmeyi ve büyümeyi hızlandırılacağı beklenmektedir (Rauch ve diğ., 2015).

Sürdürülebilirlik vurgusunun getirdiği yerel mekanizmaların güdümündeki yeni ekolojide her bir nesne birbirine bir ağ aracılığıyla bağlanarak deneyim ve bilgi paylaşımı gerçekleştirecektir. Dolayısıyla mevcut manuel araçların da sistemin parçası olabilmesi istenildiğinde bu ağa entegre olabilen bir sistem tasarımına sahip olabilmeleri dolayısıyla, ölçümlenebilir olabilmeleri gerekir. Ayrıca ürün bazındaki özelleştirme kavramının genişletilerek araç bazında özelleştirmeye gidileceği öngörülmektedir. Bu özelleştirmenin merkezi olmayan ve yerinde kurulmuş küçük fabrikalar ya da atölyeler aracılığıyla gerçekleşeceği belirtilmiştir (Rauch ve diğ., 2015). Yapma ortamının dönüşümü, yapma araçlarının da dönüşümüne yol açmıştır.

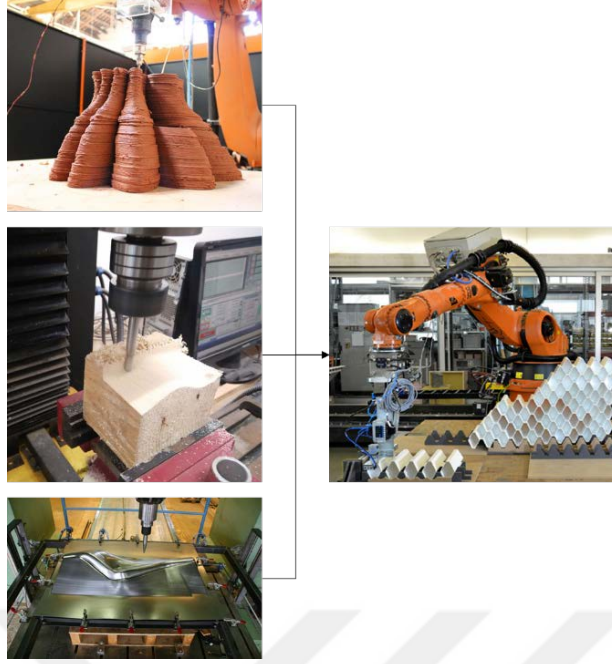
2.4 Araçların Dönüşümü: Rijit Araçlardan Esnek Araçlara

Dijital bir nesnenin bir dizi adım veya işlemin otomatik hale getirilmesi ile fiziksel olarak üretilmesi olarak tarif edilen fabrikasyon (Mitchell, 2003), 1952'de MIT'de bilgisayar kontrollü frezeleme makinasının kullanılması ile başlayan süreçte tasarım

üretim ilişkisi kökten değiştirmiş oldu (Gershenfeld, 2012). Öte yandan, NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) modellemenin eğriler ve yüzeyler için getirdiği yeni kesinlik tanımı dijital nesnenin minimum hata oranı ile üretilebildiği bir sürecin önünü açtı. Burada bahsedilen dijital nesneden kasıt, fabrikasyon araçlarının veri aracılığıyla bilgisayar tarafından kontrol edilmesi anlamındadır (Iwamoto, 2013), yani malzemenin kendisi dijital değildir (Gershenfeld, 2012). Dijital fabrikasyon hem tasarım hem üretim sürecini içerir, BDT yazılımlarından gelen veri BDÜ araçlarıyla üretilir.

Endüstrileşmiş yapım sistemlerinde belirli bir hassasiyet ve kesinlik ile gerçekleştirilen üretim, dijital fabrikasyon araçlarının yaygınlaşmasıyla birlikte tasarımcıların da kontrol edebileceği süreçler haline dönüştü. Bu sayede tasarımcılar, Bill Mitchell'a göre sadece çizebildikleri kadarını değil, bunun ötesini üretmeye olanak veren araçlara sahip oldular (Kolarevic, 2003). Bu açıdan dijital fabrikasyon araçları dijital ortamda üretilen veriyi çeşitli makine ve malzeme özelliklerine bağlı olarak dönüştürerek dijital zanaatın bir diğer ayağını oluşturur. Ancak buradaki insan müdahalesi makinenin kendisine değil, yapım sürecinin kendisine dahil olabilme ve bu süreci kontrol edebilme anlamındadır. Dijital fabrikasyon araçları, kişilerin herhangi bir ürüne ihtiyaçları olduğu anda bu ürünleri tasarlayıp fiziksel olarak üretmelerini sağlayan araçlar olarak tanımlansalar da (Gershenfeld, 2012), bu araçlar genellikle belirli kurumlara bağlı fabrikasyon laboratuvarlarında bulunurlar ve bu araçlara erişimin oldukça kısıtlı olduğu görülür (Walter-Herrmann & Buching, 2014).

Dijital fabrikasyon araçları, eksiltmeli (subtractive), eklemeli (additive), biçimlendirici (formative) (Kolarevic, 2001) olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. CNC kesim araçları ve frezeleme tezgâhı gibi eksiltmeli yöntemleri kullanan araçlar, belirli bir biçimdeki malzemeden belirli işlem adımları izlenerek parçaların çıkarılmasını sağlar. 3B yazıcılar gibi eklemeli yöntemleri kullanan araçlar ise malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle biçimi oluştururlar. CNC bükme ve delme araçları gibi biçimlendirici araçlar herhangi bir çıkarma veya ekleme işlemi olmaksızın malzemenin mevcut özelliklerinden faydalanarak malzemeyi biçim değişikliğine uğratırlar. Robot kolları ve insansız hava araçları, farklı uç-efektörlerle farklı işlevler kazanabilirler. Bu araçlar, kavrayıp yerleştirme (pick & place), kesme ve frezeleme, 3B yazdırma ve biçimlendirme gibi farklı mevcut üretim süreçlerini bünyelerinde barındırabilirler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Dijital fabrikasyon yöntemleri: eksiltmeli, eklemeli, biçimlendirici (URL-1, URL-2, URL-3, URL-4).

Eksiltmeli yöntemlerde, malzeme kesilerek veya işlenerek (machining) ana bütünden parçalar eksiltmek yoluyla şekillendirilir. Malzeme kalınlığının az değişkenlik gösterdiği durumlarda makaslama makinesi, lazer kesici, hidro jet veya termo-kesici kullanılarak kesme işleminden yararlanılır (Hauschild ve diğ., 2011). Sıcak tel ile köpük malzemenin şekillendirilmesi de bu kategoriye girer. Eksiltmeli yöntemlerin en büyük dezavantajı katı malzemeden istenen biçim elde edilirken ortaya çıkan atıktır. CNC kontrollü lazer kesici mukavva, ahşap, MDF/HDF ve kumaşlar olmak üzere farklı birçok malzemeyi kesebilir veya üzerinde bir imaj veya yazı gibi kabartmalar oluşturabilir. Hidro jet, daha çok taş, metal ve plastik gibi kalınlığı 500 mm'ye varabilen katı malzemelerin kesimi için kullanılır (Hauschild ve diğ., 2011). CNC kontrollü frezelemede çok akıllı işleme ile ürün çok farklı açılarda modifiye edilebildiği için tasarımcılar tarafından tercih edilmektedir. Bu aracın en önemli dezavantajı, kesilen biçimin pozisyonunu değiştirmeden içten oyulamamasıdır. CNC kontrollü freze makinası ahşap esaslı malzemeden ya da sert köpükten üretilen kalıplarda kullanılsa da malzeme israfı fazla olduğundan sürdürülebilir bir üretim biçimi değildir.

Robot kolu, değiştirilebilen uç kısmı sayesinde birden fazla fonksiyona sahip olabilen, bir kontrol sistemine bağlı olarak karmaşık üretim veya montaj hatlarında çalışabilen araçlardır. 6-akslı kontrol sağlarlar, robot kolun türüne göre 3 metre çapındaki bir alana

erişebilirler, bir taşıyıcı bant üzerine yerleştirilerek 7-akslı olarak da kullanılabilirler (Hauschild ve diğ., 2011). Robot kolunun en önemli özelliği diğer dijital fabrikasyon araçlarında olmayan kavrayıp yerleştirme özelliğidir. Bu özelliklerinden dolayı mimaride inşa süreçlerinde yer alabilme potansiyeline sahiptirler (Kohler ve diğ., 2014).

Eklemeli imalat yöntemleri, akışkanlar, gazlar, fiberler ve tozlar gibi biçimi olmayan malzemenin kimyasal ve fiziksel işlemler sonucu üst üste yığılarak katı biçimin oluşturulduğu tüm yöntemleri içerir. Bu yöntemler manuel döküm, hava basınçlı kalıplama, numerik kontrollü sinterleme, genleştirme ve ekstrüzyondur (Hauschild ve diğ., 2011). Bu yöntemin avantajları, karmaşık geometrilerin yüksek hassasiyette üretilebilmesi, düşük hacimde üretimin düşük maliyet ve eksiltmeli yöntemlere göre neredeyse sıfır atık ile gerçekleştirilebilmesidir. Eklemeli üretimin dezavantajları ise, yüksek hacimli üretimde ortaya çıkan yüksek maliyet (Frazier, 2014; D'Aveni, 2015; Baumer ve diğ., 2016), büyük ölçekli üretim yavaşlığı ve iki katman arasındaki bağlayıcılığın zayıf olması nedeniyle üretilen biçimin dayanımının az olmasıdır (Frazier, 2014; Chen ve diğ., 2017). Bu yöntemin 1:1 yani büyük ölçekli uygulamaları; CNC kontrollü kalıplama makinesi ile üretim, robot kolu ile tuğla veya ahşap bileşenlerin üst üste konarak bir araya getirilmesi ve kontur işçiliğidir (Hauschild ve diğ., 2011). Robot kolu ile, geleneksel tuğla dizim işlemine kıyasla, daha az emek ile farklı oryantasyonlarda tuğla dizilebilmektedir. Ancak, iki tuğla arasına standart harca göre daha kuvvetli bir bağlayıcı olan epoksi reçine uygulanması maliyeti arttırmaktadır.

Ürün geliştirme adımlarının erken aşamalarında, 3B bileşenlerin 2B malzeme katmanları ile üretimini kapsayan hızlı prototipleme (HP) sıklıkla tercih edilmektedir. Bu üretimde kullanılan yaygın dosya formatı STL'dir. Küçük ölçekli prototiplemede kullanılan yöntemler stereo-litografi (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLM), 3B yazıcı (3BY), eriyik yığılma yöntemi (FDM)'dir. SLA'da hareket eden lazer ışığı ile ışığa duyarlı malzeme sertleştirilerek şekillendirilir. SLS'de toz halindeki malzeme erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra lazer, bu malzeme üzerindeki belirli noktalarda dolaşır ve istenen biçimi toz halindeki malzemeyi sertleştirerek oluşturur. SLM'de metal tozu lazer ışını ile eritilerek alttaki katman ile bağlanması sağlanır ve bu yöntemle yüksek dayanımlı çeşitli kalıplar ve araçlar üretilebilir. 3BY'da toz halinde malzeme her bir katmanda aşağı yönlü hareket

eden bir platform üzerinde, bilgisayar kontrollü yazıcı tarafından bir bağlayıcı katman ile üst üste yığılarak bir araya getirilir. FDM, diğer yöntemlere göre daha ucuz olan masaüstü yazıcılarda kullanılır ve filament denilen ısıya duyarlı plastik bir malzemeyi ekstrüder yardımıyla nozülünden geçirerek modeli oluşturur. Malzemenin üst üste yığıldığı platform, 3B yazıcı kafasının hareket kabiliyetine göre sabit veya Z ekseninde hareketli olabilir. Nozülünden çıkan maddenin halinin, sıcaklık veya kimyasal değişim yoluyla kontrol edilebilmesi için yarı-katı özellikte olması ve bir önceki katmanla şeklini bozmadan bağlanması beklenir (Gibson ve diğ., 2010). Alt katman ve üst katman arasındaki bağlanma süreci yavaş olduğu için destek malzemesine ihtiyaç duyulur. FDM türü yazıcılar, yazıcı maliyetinin düşük olması ve kullanım kolaylığı sebebiyle tercih edilmektedir.

Biçimlendirme işlemi, malzemenin mekanik bir kuvvet yardımıyla genellikle bir kalıp kullanılarak yapısal bütünlüğünü bozmadan şekillendirmeyi içerir. Yaygın olarak levha halindeki metal ve plastik malzemenin biçimlendirilmesinde CNC kontrollü presleme, katlama ve bükme makineleri kullanılır. Yapı sektöründe en çok serbest biçimlerin levha halindeki malzemeden büküm yoluyla üretilmesi için tercih edilmektedir. Bu üretim yönteminin avantajları, malzeme dayanımının bükme işlemiyle daha da artırılması, karmaşık biçimlerin sıfır atık ile üretilebilmesi, üretim hacminin maliyete etkisinin az olması, sistem elemanlarının farklı büküm açıları elde edebilmek için yeniden yapılandırılabilmesidir (Hauschild ve diğ., 2011). Ancak, tasarım sürecinde, büküm açısını doğrudan etkileyen malzeme türü, kalınlığı ve sertlik derecesi hassas şekilde optimize edilmelidir.

2.4.1 Esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar

Üretici kültürünün bir parçası olarak dijital zanaat, mevcut yapım süreçlerinin dijitalleştirilmesine ve bu süreçlerin dijital modeli geri beslemesine dayanan çift yönlü bir süreçtir. Oxman (2007) tarafından tanımlanan dijital zanaatta, yapımdan gelen bilginin tasarımı geri beslemesi beklenmektedir. Yapım gramerlerine dayanan dijital zanaat kapsamındaki ilk çalışmalar dijital fabrikasyon süreçlerine yöneliktir. Ancak, dijital zanaatın bir diğer kolu ise ev veya atölye ortamında dahi ihtiyaç duyulan ürünün üretilebilmesidir. 3B yazıcılar, CNC ve lazer kesim gibi dijital fabrikasyon araçları, araç başlık fonksiyonunun sabit olması (Koren, 2006, s. 38), malzeme ve araçla deney

yapmayı sınırlayan sabit tezgâh boyutu (Peek & Moyer, 2017) ve dosyadan fabrikaya (file-to-factory) üretim (N. Oxman, 2007) gibi kısıtlara sahip olabilmektedir.

Dijital fabrikasyon araçlarının arayüzleri ve kapasiteleriyle sınırlanan mimarlar ve mühendisler, mevcut araç ve tekniklerin özelleştirilmesi amacıyla tasarıma özgü araçlar geliştirmeye başlamışlardır. İncelenen esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar, üretim parametrelerinin yeniden yapılandırılmasını sağlayan makine bileşenlerinin modülerliği, değiştirilebilirliği ve taşınabilirliği nedeniyle endüstrideki güçlü süreçlerin bir parçası olarak tanımlanabilir. Dijital zanaat kapsamında biçimsel çeşitliliği arttırmak için hem mevcut fabrikasyon araçlarıyla birlikte hem de tek başlarına kullanılabilecek, esnek başlığa sahip araçlar tasarlama; mevcut yapım yöntemlerinin geliştirilmesi açısından da önemlidir.

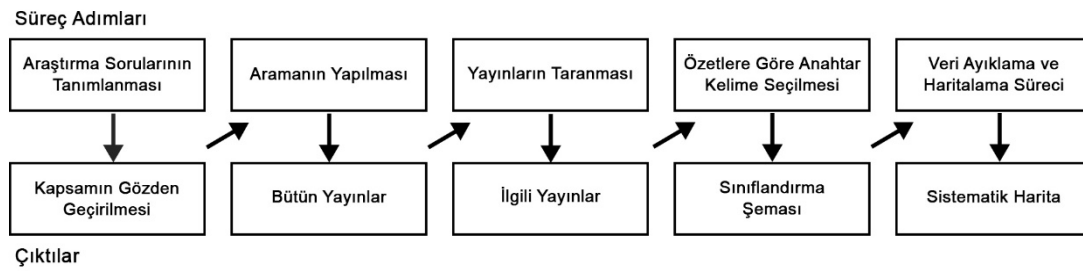
Mimarlık ve inşaatta esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar, biçimsel çeşitliliği sağlarken zaman ve maliyeti düşürmek için geliştirilmiştir. Bu alandaki ilk örneklerden biri, Renzo Piano'nun, İtalyan Endüstrisi Pavyonu çatısı için önerdiği güçlendirilmiş polyesterden yapılmış esnek kalıp sistemidir (*RPBW- Early Works*, 2021). Rijit ve tek seferlik kalıplama, esnek ve yeniden yapılandırılabilir araçları uygulamak için umut verici bir araştırma alanıdır. Değişken (variable) ve standart olmayan (non-standard) birim elemanların üretilmesi, yüksek maliyet, zaman ve emek yoğun kalıp yapım sürecinin yanı sıra, her bir farklılaşan kalıp için atık oluşumuna ve üretim süresinde artışa sebep olmaktadır (Echenagucia ve diğ., 2019; Kelkar ve diğ., 2005; Khabazi & Budig, 2016; Raun & Kirkegaard, 2015; Yang ve diğ., 2019). Esnek kalıpta maliyet ve üretim süresi, rijit kalıba kıyasla önemli ölçüde azalmıştır (Kontovourkis ve diğ., 2019). Yeniden yapılandırılabilir araçlar, değişen veya hareket eden bileşenleri kullanarak malzeme üzerinde deneyler yapılmasına olanak tanır ve üretime dair yenilikçi iş akışları sunar (Aşut ve diğ., 2018; Raun & Kirkegaard, 2015; Tessmann & Mehdizadeh, 2019). Paneller, birleşim elemanları veya yapısal elemanlar gibi farklılaştırılmış ve standart olmayan yapı bileşenleri, değiştirilebilir araç bileşenleri ve esnek malzemelerle üretilir. Esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar, mimarlar ve mühendisler arasındaki iş birliğine dayalı daha sürdürülebilir çalışma ortamları aracılığıyla, yaratıcı bir şekilde tasarlanmış biçimler üretmekte kullanılabilir (Kostova ve diğ., 2019).

Esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlar, endüstriyel tasarım ve üretimde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bu araçların tasarımı ve imalatı mimarlık ve tasarımda

göz ardı edilmektedir. Ayrıca, literatürde bu araçların yapım yöntemlerini içeren kapsamlı ve detaylı bir literatür araştırmasına rastlanmamıştır. Bu literatür araştırmasının amacı, esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçlara ait kategorileri ana hatlarıyla belirlemek için literatürü incelemek, mimarlara ve mühendislere bu araçları keşfetmek için rehberlik edecek gelecekteki araştırma eğilimlerini ortaya koymaktır.

Bu araştırma kapsamında, literatürdeki ilgili makaleler, multidisipliner bir veri tabanı olan Scopus ve hesaplamalı tasarım veri tabanı olan CuminCAD (Martens & Turk, 1999) kütüphanesinde taranmıştır. Scopus veri tabanı, PubMed ve Web of Science (WoS) ile karşılaştırıldığında geniş bir bilimsel dergi kapsamına sahiptir (Aksnes & Sivertsen, 2019; Falagas ve diğ., 2008). Ayrıca, WoS'daki mimari ve tasarım alanının kapsamı, Scopus'a kıyasla oldukça düşüktür (Aksnes & Sivertsen, 2019). Hesaplamalı tasarım alanında kıtalararası konferanslarda sunulan bildirileri kapsayan CuminCAD veri tabanı ise tamamlayıcı bir veri tabanı olarak kullanılmıştır.

Petersen ve diğerleri tarafından önerilen sistematik haritalama yöntemi (Petersen ve diğ., 2008), sistematik incelemeye alternatif olarak özellikle yazılım mühendisliği tarafından benimsenmiştir (Şekil 2.4). Sistematik haritalamada, derinlemesine analiz edilecek birincil alanların sınıflandırmasını yapabilmek için geniş kapsamlı çalışmaları içerecek şekilde çoklu sorular sorulur (Kitchenham & Charters, 2007). Sistematik haritalama, sistematik inceleme yöntemine kıyasla daha az çabayla mevcut çalışmaların haritasını çıkarmak için kullanılır.



Şekil 2.4 : Sistematik haritalama yöntemi (Petersen ve diğ., 2008) (yazar tarafından tekrar üretildi).

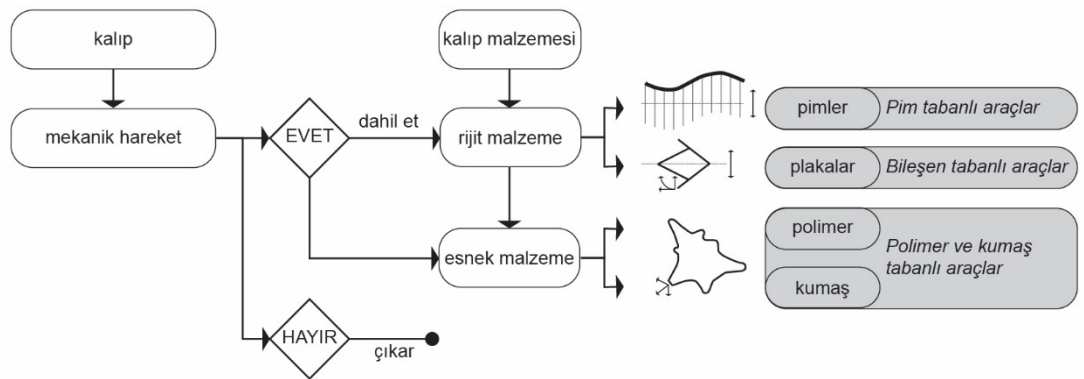
Haritalama süreci, araştırma kapsamını belirlemek için esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçların mekanizmaları, araçlarda kullanılan malzeme ve bu araçlar ile ne tür biçimler üretilebildiğine dair araştırma soruları ile başlamıştır. Elde edilen veriler, ilk aşamada, arama tarihi olan 27 Nisan 2020'de Scopus'tan alınmıştır. İlk arama, 1999–2020 yılları arasında EİS ve YİS literatüründe yer alan “yeniden

yapılandırılabilir”, “esnek”, “ayarlanabilir”, “değişken” anahtar sözcükleri “kalıp” kelimesi ile birleştirilerek yapılmıştır. Araştırma alanını mimari tasarım ve inşaat alanına indirmek için kullanılan anahtar kelime stratejisi Çizelge 2.2’de gösterilmektedir. Aramaya dahil edilme ölçütleri, MMİ endüstrisinin ilgili terminolojisinden olan "inşaat, bina, mimari ve imalat gibi kelimelerden en az birini içermek" şeklinde tanımlanmıştır. Araştırma, prizlenen malzemelere odaklandığından dolayı “metal, cam, biyo-malzemeler ve nano-malzemeler”, arama algoritmasından çıkarılmıştır.

Çizelge 2.2 : Kullanılan anahtar kelimeler ile aramanın daraltılması.

Anahtar kelimeler	Seçilen yayınlar	Çakışma	Cumin CAD	Scopus 2. eleme	Hiçbiri	Scopus 1. eleme	En az biri	Scopus 1. arama
Ayarlanabilir kalıp	5	4	3	6	metal	16	inşaat	30
Esnek kalıp	20	0	9	11	nano	58	yapı	225
Yeniden-yapılandırılabilir kalıp	7	5	3	9	biyo	15	mimarlık	17
Değişken kalıp	2	3	1	4	cam	22	fabrikasyon	42
Toplam	34					111		314

İkinci aramada ise, Scopus'ta taranan belge sayısının giderek arttığı son 15 yılı kapsayacak şekilde, 2005–2020 tarihleri arasındaki yayınlara odaklanılmıştır. CuminCAD veri tabanı da aynı şekilde tarandıktan sonra, birbiri ile aynı ve ilişkisiz yayınlar aramadan çıkarılmış ve birim eleman üretiminde kullanılan araçların haritalanması için 34 çalışma seçilerek analiz edilmiştir.



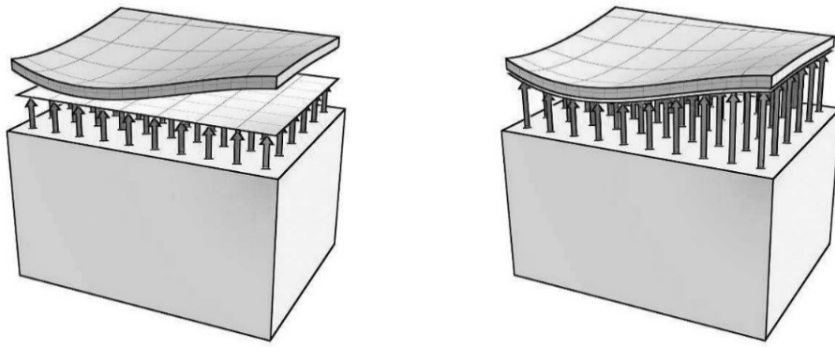
Şekil 2.5 : Sınıflandırma algoritmasını gösteren akış diyagramı.

Sınıflandırma aşamaları Şekil 2.5’teki akış diyagramında gösterilmiştir. Sınıflandırma algoritması, kalıbın mekanik olarak hareketli olup olmadığının belirlenmesi ile başlar. Daha sonra, üretilen mekanizmalar kalıp malzemesinin rijit veya esnek olması göz

önünde bulundurularak; pim tabanlı araçlar (Galizia ve diğ., 2019), bileşen tabanlı araçlar (Shaffer, 2011), polimer ve kumaş tabanlı araçlar (Peters, 2014; R. Schmitz, 2014) olmak üzere sınıflandırılmıştır. Değişken serbest biçimli yüzeyler oluşturan pim tabanlı sistemler, Z ekseninde hareket eden pimlere sahiptir. Bileşen tabanlı araçlar, pim tabanlı araçlara göre daha fazla serbestlik derecesine sahip, düzlemler üzerinde hareket eden veya dönen rijit plakalardan oluşur. Polimer ve kumaş tabanlı araçlar, araç bileşenlerinin düzlemler üzerindeki hareketine ek olarak biçimsel çeşitlilik yaratmak için malzemenin esnekliğini kullanır.

2.4.1.1 Pim tabanlı araçlar

Pim tabanlı araçlar, değişken serbest biçimli panel üretiminde kullanılan kalıplamadaki üretim süresini ve atık miktarını azaltmak için geliştirilmiş en eski yeniden-yapılandırılabilir araç türüdür. Bu araçlar, dikey veya yatay olarak hareket eden pimler ile bu pimleri örten şekillendirilebilir bir tabakadan oluşur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 : Pim tabanlı sistem konsepti (Raun & Kirkegaard, 2012).

Mekanizmanın parametreleri; pim çapı ve pimler arasındaki mesafe, ara katman kalınlığı, kilitleme sistemine sahip kontrol mekanizmasıdır. Eyleyiciler, CNC, Arduino veya robot kolu olmak üzere üretilmesi hedeflenen biçime göre farklı mekanizmalara sahiptirler. Ancak bu mekanizmalarda manuel ayarlamalar da kolaylıkla yapılabilir. Malzeme, pimlerin ayarlanmasından önce veya sonra dökülebilir. Dökülen malzeme genellikle beton olmakla birlikte kil, poliüretan, fiberglas ve tekstil kompozitleri de kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerin pahalı CNC freze kalıplama süreçlerine bir alternatif olabileceği ve endüstriyel boyuta ölçeklendirilerek bir üretim hattında uygulanabileceği belirtilmiştir (R. Schipper ve diğ., 2014). Mekanizma, düz bir yüzeyi X ve/veya Y yönünde gererek, daraltarak veya XY yönünde keserek çift eğrilikli bir yüzeye dönüştürür (H. R. Schipper & Eigenraam,

2016). Yüzey yarıçapları, yüzeyi daha küçük alt parçalara bölerek hesaplanır. Yama (patch) adı verilen bu parçaların eğriliği ne kadar azalırsa, kesme açısı o kadar keskinleşir ve yüzey yüksek eğriliğe sahip olur.

Çizelge 2.3 : Pim tabanlı araçlar.

Yazar	Mekanizma özellikleri	Yüzey malzemesi	Kontrol mekanizması	Malzeme ve biçim
Kelkar ve diğ. (2005)	Yeniden-yapılandırılabilir kalıp üretimi	Yok	N/A	N/A Serbest-biçimli yüzey
Koc ve Thangaswamy (2011)	Y. yapılandırılabilir kalıp Pim yatağı 25(5x5) Pim matrisi (19x127 mm)	Yok	Nümerik kontrol 3-akslı	Poliüretan Serbest-biçimli yüzey
Raun ve Kirkegaard (2012)	Yeniden-yapılandırılabilir kalıp 1.2x1.2x0.3 m	Membran (belirtilmemiş)	Nümerik kontrol Eyleyiciler ve sabitleme kolları	Beton Çift-eğrilikli yüzey
Oesterle ve diğ. (2012)	Yerinde döküm için kalıp Balmumu pim yatağı 1x1m	Bir plastik köpük tabakası, silikon	Nümerik kontrol CNC eyleyici	Beton Çift-eğrilikli yüzey
Schipper ve Janssen (2011) Eigenraam (2013) Kok (2013)	Düz bir panelden kavisli bir panel oluşturmak için aparat Pim yatağı (600x600mm ²)	Çentikli plastik şeritler	Manuel kontrol	Beton Çift-eğrilikli yüzey
Bell ve diğ. (2014)	Yeniden yapılandırılabilir bir yüzey P1: 48" x32" 16"x16" paneller P2: 12"x12" paneller	P I: çift taraflı üretilen P II: 3B yazıcı ile basılmış tek taraflı kalıp	Nümerik kontrol Arduino	P I: Çift-eğrilikli P II: Çift-eğrilikli kompozit fiberglas
Ku ve Chung (2015)	Ayarlanabilir kalıp	Nitinol örgü desenleri (SMA)	Nümerik kontrol eyleyici	Fiber kompozit Çift-eğrilikli yüzey
Bechthold (2016)	Yeniden yapılandırılabilir pim kalıbı üzerinde kil	Yok	Nümerik kontrol 6-akslı robot kolu	Kil Tek-eğrilikli yüzey
Lee ve diğ. (2017)	Kompozit faz değişimli malzeme kalıbı 80x150 mm	Silikon şekillendirme plakası ve ahşap	Nümerik kontrol CNC	Beton Tek-eğrilikli yüzey
Asut ve diğ. (2018)	Kapsayıcı araç Pim yatağı 160x160 cm, Yüzey alanı 124x124 cm	Yüksek yoğunluklu polietilen	Nümerik kontrol lineer eyleyiciler, potansiyometreler	N/A Çift-eğrilikli yüzey
Kalantar ve Borhani (2018)	Dönüştürücü kalıp Pim yatağı 32"x 18"	Kerfing ile deforme olmuş kontrplak levha	Manuel kontrol	Beton-Fiberglas Çift-eğrilikli yüzey
Ku ve Gurjar (2018)	Ayarlanabilir kalıp Pim matrisi 5x8	Silikon membran	Nümerik kontrol Arduino	Tekstil kompozitleri Çift-eğrilikli yüzey
Borg Costanzi ve diğ. (2018)	Pim yatağı (1x1m) 3B robot kolu ile beton uygulaması	Silikon	4 DOF yazıcı Manuel kontrol	Beton Çift-eğrilikli yüzey
Charak ve Sinha (2019)	Açılı bağlantı sistemi	Yok	Nümerik kontrol eyleyici piston	Beton Çift-eğrilikli yüzey
Loh ve diğ. (2019)	Robot kolu için CNC fikstürü Pim yatağı 500x500 mm	-	Nümerik kontrol CNC, robot kolu	Beton Çift-eğrilikli yüzey

Pim tabanlı mekanizmaların bileşenlerini haritalamak için literatürden 17 örnek seçilerek incelenmiştir (Çizelge 2.3). Eigenraam (2013), ADAPA'da elde edilen 1,5 metrelik yüzey eğrilğine kıyasla eğrilik yarıçapını minimum eğrilik yönünde 0,6 metreye düşürmeyi başarmıştır (Raun & Kirkegaard, 2012). Kalıp yüzeyinin boyutu, maksimum 124 x 124 cm (Aşut ve diğ., 2018) ve minimum 30 x 30 cm'dir (Bell ve diğ., 2014). Pim yatağını kaplamak için kullanılan yüzey malzemeleri genellikle silikon esastır.

Pim tabanlı sistemler, pimlerin hareketinden sorumlu farklı kontrol mekanizmalarına sahiptir. Örnek çalışmalarda, Arduino kontrollü (Raun & Kirkegaard, 2012), TU Delft'te devam eden bir araştırma projesi olarak manuel kontrollü (Eigenraam, 2013; Kok, 2013; R. Schipper & Janssen, 2011), 3-eksenli CNC kontrollü pim yatakları ile (Koc & Thangaswamy, 2011) eyleyicilerin konumlarını tespit etmek için yerleşik potansiyometreye sahip doğrusal eyleyici kontrollü (Aşut ve diğ., 2018) mekanizmalara rastlanmıştır. Pimleri hareket ettirmek için solenoid eyleyiciler (Ku & Chung, 2015) ve robot kolu (Bechthold, 2016) da kullanılmıştır. Borg Costanzi ve diğ. (2018), desenli ve çift eğrilikli paneller imal etmek için hareketli pim yatağını 3B beton baskı teknolojisiyle birleştirmiştir. Pim hareketleri genellikle kalıbın alt yüzeyinde olmasına rağmen Kelkar ve diğ. (2005), kalıbın tüm yüzeylerinde pimler kullanarak 3B serbest biçimli nesneler üreten yeniden-yapılandırılabilir bir kalıp sistemi geliştirmişlerdir. Bu model, 3B serbest biçimli nesnelerin ısıyla şekillendirilmesi için üretilmiş ve test edilmiştir (Koc & Thangaswamy, 2011).

Bu tür araçlarda araştırma süreci, genellikle deneysel yöntem ile başlar; yüzey doğruluğunun ve küçük eğrilik yarıçaplarının optimizasyonu ile sonuçlanır. Üretilen biçimlerin değerlendirilme süreci, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) (Borg Costanzi ve diğ., 2018; Kleespies & Crawford, 1998; Koc & Thangaswamy, 2011) veya prototiplerin laboratuvar ortamında test edildiği deneysel yöntemle gerçekleştirilir. Dijital ve fiziksel çıktı arasındaki doğruluk ve hassasiyet, 3B tarayıcılar aracılığıyla da test edilebilir (Eigenraam, 2013; Ku & Gurjar, 2018). Pim tabanlı sistemlerde, NURBS yüzeylerin sayısal modeliyle fiziksel çıktıları karşılaştırılarak yüzey sapma değerleri tespit edilir.

İncelenen pim tabanlı sistemler, üretilen biçimlerdeki yüzey doğruluğunu arttırmak ve küçük eğrilik yarıçaplarını optimize etmek amacıyla geliştirilmektedirler. Bu sistemlerin kısıtları, pim boyutuna bağlı yüzey geometrisinin doğruluğu, kenar

durumuna bağı kalıbın sızdırmazlığı, pim sayısına ve aralarındaki mesafelere bağı yüzey yarıçapları, dijital ortam ile fiziksel ortam arasındaki yüzey sapma değeridir. Bu araçlar ile, yalnızca çift-eğrilikli yüzeyler üretilebilmektedir. 3B pim tabanlı araçlar sadece beton dökümü için geliştirilmiş ve henüz uygulanmamıştır. Ku ve Chung (2015) ile Charak ve Sinha'nın (2019) geliştirdiği mekanizmalar hariç, tüm pim tabanlı sistemlerde, manuel veya eyleyici kontrollü pimler ile kilitleme elemanlarından oluşan hareketli mekanizmaların yapısı hemen hemen aynıdır. Serbest biçimli yüzeylerin büyük ölçekli uygulamaları henüz gerçekleştirilmemiştir. Ancak ADAPA, Kuveyt Havalimanı Terminal Genişletme Projesi için 85 adet yeniden-yapılandırılabilir kalıp ile 40.000 beton panel üretmeyi planlamaktadır (URL-5).

2.4.1.2 Bileşen tabanlı araçlar

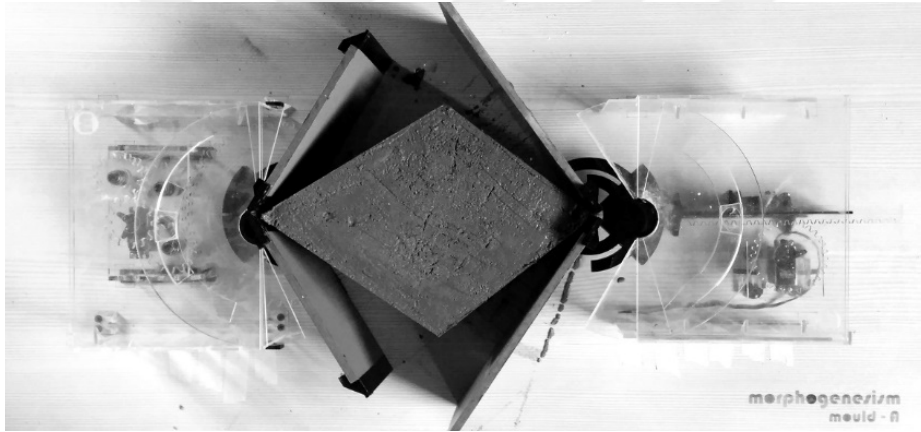
Bileşen tabanlı araçlarla üretilen biçimler, tuğla gibi küçük boyutlu yapı elemanlarından köprü boyutundaki elemanlara kadar çeşitlilik göstermektedir. Bu sistemler, mekanik olarak pim tabanlı sistemlere benzer şekilde hareket ederler, ancak pimlerden ziyade düzlemsel bileşenlerden oluşurlar. Kalıp bileşenleri esas olarak yatay olan XY düzleminde hareket etmektedirler. Literatürdeki beş çalışma ayrıntılı olarak incelenerek bu mekanizmaların özellikleri Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Bileşen tabanlı araçlar.

Yazar	Mekanizma özellikleri	Yüzey malzemesi	Kontrol mekanizması	Malzeme ve biçim
Shaffer (2011, 2017)	Yerinde dijital olarak yapılandırılabilen mekanik kalıp	Fenolik reçine ile lamine edilmiş kağıt-Garolite	Nümerik kontrol uygulama ile kontrol edilen servo motor	Plastik inşaat malzemeleri Birimlere ayrılmış biçimler
Lloret ve diğ. (2015)	Robot ile slip şekillendirme işlemi 3350x430 mm	Eliptik kalıp (125x80 mm)	Nümerik kontrol 6-akslı robot kolu	Beton Eliptik kesitli sütunlar (1800 mm)
Khabazi ve Budig (2016)	Özel tasarlanmış ayarlanabilir dijital kalıp	Açı ve mesafe kontrolü için ayarlanabilir kalıp plakaları	Nümerik kontrol Arduino	Beton Değişken dikdörtgen prizmalar
Kim ve diğ. (2016)	Çok-fonksiyonlu kalıp 40m uzunluğunda	Çelik levhalar ve çerçeveler	Silindirlerin manuel kontrolü	Beton Köprüler için PSC kavisli kiriş
de Azambuja Varela and Sousa (2016)	Açılı yüzeyler için y. kullanılabilir k. 500x500 mm taban	Alüminyum çubuklar (5x20mm, 100mm2)	Manuel kontrol + Freze deliklerinin konumunun sayısal kontrolü	Alçı Kemer tuğlası

Şantiyelerdeki beton döküm uygulamaları için Shaffer (2011, 2017) ile Kim ve diğ. (2016) tarafından mekanik olarak hareketli kalıplar geliştirilmiştir.

Mekanizmalar, yerinde manuel olarak veya bir arayüz ile ayarlanabilen hareketli bağlantılara sahiptir. Mekanizmaların düzlemsel kısımları istenilen konuma ayarlandıktan sonra malzeme kalıba dökülür. Akıllı dinamik döküm adı verilen ekstrüzyona dayalı eklemeli imalat örneği, Lloret ve diğerleri tarafından bir strüktürel döküm uygulaması olarak önerilmiştir (2015). Konvansiyonel slip döküm (slip-casting) işleminden esinlenen bu yapım sürecinde, eliptik bir kalıp robot kolu ile Z ekseninde hareket ettirilerek sütunlar üretilmiştir. Bileşen tabanlı araçların prototipleme aşamasında kullanılan küçük ölçekli uygulamaları da mevcuttur. Khabazi ve Budig (2016) tarafından üretilen Arduino kontrollü ayarlanabilir kalıp ile bir duvar sistemi için özelleştirilmiş bileşenler üretilmiştir (Şekil 2.7). De Azambuja Varela ve Sousa (2016), slip dökümde kullanılan geleneksel kalıp levhalarından uyarlanan ve kemer oluşturmada kullanılan farklı yüzey açılarına sahip birimler için bir iş akışı geliştirmişlerdir.



Şekil 2.7 : Uyarlanabilir bileşenlere sahip mekanizma (Khabazi & Budig, 2016).

Bileşen tabanlı araçlar, genellikle konvansiyonel kalıp uygulamalarından uyarlanmışlardır. Yaygın olarak kullanılan malzeme betondur. Her üç kontrol mekanizması da bu araçlarda kullanılmaktadır. Ancak, yerinde yapımda robot kolun maliyeti ve ağırlık limiti sebebiyle manuel kontrol tercih edilmektedir. Kalıp yüzleri çelik ve ahşap gibi plakalardan yapılmıştır. Ön gerilmeli kumaş kalıpların aksine, sınırlı deformasyon kapasitesine sahip düzlemsel kalıp yüzeyleri nedeniyle bu araçlarla dik açılı bileşenler üretilmektedir. Lloret ve diğerlerinin (2015) yenilikçi uygulaması dışında, kullanılan kalıp yüzeyleri yalnızca XY düzleminde hareket etmektedirler. Bileşen tabanlı araçlar, büyük ölçekli yapısal bileşenlerin yerinde üretimlerinde de kullanılabilirler.

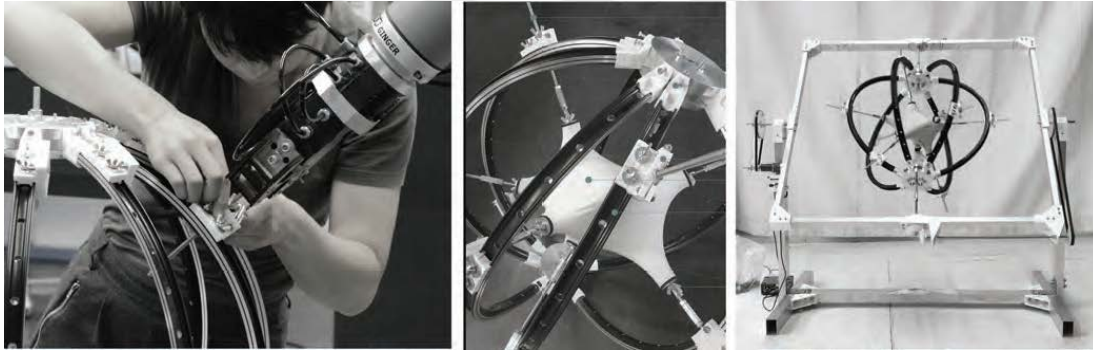
2.4.1.3 Polimer ve kumaş tabanlı araçlar

Polimer ve kumaş tabanlı araçlarda, ilk çalışmalar 3B yazıcılar veya robot kolu ile basılmış kalıplara ait olanakların keşfedilmesine odaklanmıştır. Daha sonraki uygulamalarda, yüksek maliyet ve görece yavaş üretim süreci nedeniyle kalıp üretimi için ayarlanabilir bir mekanizma tarafından kontrol edilen ve malzemenin esnekliğinden faydalanan araçlar geliştirilmiştir. Bu tür bir mekanizma, pim tabanlı sistemlere kıyasla hem birim hem bütün açısından daha fazla çeşitlilik sunar. Literatürdeki örnekler; kalıp mekanizmasına, kalıp malzemesine, kontrol türüne, döküm malzemesine ve üretilen biçime göre analiz edilmiştir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 : Polimer ve kumaş tabanlı araçlar.

Yazar	Mekanizma özellikleri	Yüzey malzemesi	Kontrol mekanizması	Malzeme ve biçim
Al-Haddad (2008)	Polimer tabanlı	PETG şekillendirilebilir levhalar	Hareketli indeksleme levhaları ile manuel kontrol	Beton Y-şeklinde birim elemanlar
Khan (2008)	Polimer tabanlı 3B yazıcı boyutunda	Gerilmiş kauçuk kalıp	Manuel kontrol	Beton Konik biçimler
Kudless (2011)	Kumaş tabanlı 45x76 cm	Ahşap levha ve elastik kumaş	Nümerik kontrol 6-akslı robot kolu	Alçı Panel
Peters (2014)	Esnek Kalıp Polimer tabanlı 3B yazıcı boyutunda	3B yazıcı ile basılmış şekillendirilebilir polimerler	Nümerik kontrol 6-akslı robot kolu-3B yazıcı	Geçmeli bloklar ve duvar panelleri Harç karışımı
Culver ve diğ. (2016)	Kumaş tabanlı	Likra	Nümerik kontrol 6-akslı robot kolu	Alçı, harç, beton Y-şeklinde birim elemanlar
Sarafian ve diğ. (2017)				
Kontovourkis ve diğ. (2019)	Kumaş tabanlı 0.68x0.36 m	Sürgülü kapı sistemine bağlı membran, MDF levhalar	Manuel kontrol	Alçı, beton Y-şeklinde birim elemanlar (5x6.5m)
Tessmann ve Mehdizadeh (2019)	Rotofoming mekanizması 180 mm yarıçap, 7 mm kabuk kalınlığı	Küresel bir strüktür Ön gerilimli lateks	Nümerik kontrol eyleyici-6-akslı robot kolu	Beton Düzenli olmayan uzay-kafes strüktürler için bileşenler
Baghi ve diğ. (2019)	Kısmi küresel konumlandırma mekanizması -53 cm	İnce fiber tabakası ve alüminyum	Nümerik kontrol eyleyici	Beton Izgara birleşim noktaları
Engholt ve Pigram (2019)	Kumaş tabanlı vakumlu tabla (1200x2400 mm, 400x400mm)	ABS ile yazdırılmış Truchet yüzey kaplaması Likra kumaş üzerine kaplanmış folyo	Robotik 3B yazıcı Nümerik kontrol 7-akslı robot kolu	Beton Dikdörtgen paneller
Kostova ve diğ. (2019)	Kumaş tabanlı biçim-bulma	Polipropilen kumaş	Manuel kontrol	Beton Standart olmayan biçimler
Yang ve diğ. (2019)	Kumaş tabanlı	95% polyester 5% Dikişli likra kumaş Çubuklar 300x900 mm	Manuel ve nümerik kontrol 6-akslı robot kolu	Alçı, alüminyum çubuk Çift-eğrilikli yüzey

Kumaştan oluşan mekanizmalarda esneme tipine bağlı olarak likra, lateks, elyaf gibi elastik kumaşlar kullanılmaktadır. Lateks iki yönlü esneme özelliğine sahipken, likra, üretilen biçimlerde daha fazla uzunluk ve biçimsel değişkenlik sağlayan dört yönlü bir esneme özelliğine sahiptir. Lateks esas olarak üç kollu birim elamanların üretilmesinde kullanılır (Culver ve diğ., 2016; Sarafian ve diğ., 2017; Tessmann & Mehdizadeh, 2019). Ön gerilmeli kumaş kalıplar, döküm esnasında oluşan hidrostatik basıncı düşürme özelliğinden dolayı tercih edilmektedir. Kabuk strüktürlerdeki köşe birleşimlerinde kullanılan birim elemanları üretebilmek için Şekil 2.8’de gösterilen, tam dönme (Tessmann & Mehdizadeh, 2019) ve yarım dönme (Bagdi ve diğ., 2019) kapasitesine sahip mekanizmalar geliştirilmiştir. Dönen mekanizma kullanılarak, kumaşın çekme noktalarının sayısına ve konumuna bağlı olarak 3B bileşenler üretilmektedir. Kumaşın çekme noktaları, kullanılacak robot kolu sayısına göre sabit ve hareketli olarak ayrılmalıdır (Bagdi ve diğ., 2019; Yang ve diğ., 2019). Aksi takdirde, kalıbın uç noktalarını kontrol etmek için ek bir eyleyici mekanizma kullanmak gerekmektedir (Tessmann & Mehdizadeh, 2019).



Şekil 2.8 : Robot kolu ile kontrol edilen Rotoforming mekanizması (Tessmann & Mehdizadeh, 2019).

Kudless (2011), elastik kumaşla kaplı çubuklardan oluşan hareketli bir kalıp mekanizması önermiştir. Pim tabanlı sistemlerde olduğu gibi yüzeyde istenen deformasyonu gerçekleştirmek için kullanılan çubukların sayısı ve aralıkları önemlidir. Bir başka çalışmada, üretilen panel üzerinde Truchet desenini elde etmek için, likra kumaş üzerine ABS ile bu desen yazdırılmıştır (Engholt & Pigram, 2019). Yang ve diğerleri tarafından farklı en ve boyda hiperbolik parabolit yüzeyler oluşturmak için benzer bir mekanizma geliştirilmiştir (2019).

Malzeme esnekliği araştırması, tek bir mekanizmadan değişken biçimler oluşturmak için şekillendirilebilir polimerlere ve esnek kumaşların kullanılmasına dayanır. Bu

sistemler, pim tabanlı sistemlerle karşılaştırıldığında üretilen bileşenlerin doğruluk oranı düşüktür. 3B yazıcı ile üretilmiş elemanların doğruluğu, döküm ile karşılaştırıldığında daha yüksek olmasına rağmen, yapısal açıdan bu şekilde üretilen beton ve kil elemanların dayanıklılığı sorgulanmaktadır. Bileşenlerin biçimleri, uzay-kafes sistemlerinde kullanılan içi boşluklu, dikdörtgen veya çift eğrilikli panellerdir. Biçimsel çeşitlilik görece yüksektir. Örnek çalışmalarda deneysel yöntemi takiben malzeme davranışı simüle edilmiştir. Kumaş davranışı, kabuk strüktürlerin biçim-bulma çalışmalarında yaygın olarak kullanılan parçacık yay modeli (particle-spring model) ile simüle edilmektedir. Rhinoceros ve Grasshopper, kumaş davranışını simüle etmek için Kangaroo ve strüktürel analiz için Karamba3D gibi eklentilerinden faydalanan yaygın simülasyon yazılımlarıdır. Ayrıca, kalıp bileşenlerinin konumunu ayarlamak (Bagdi ve diğ., 2019; Yang ve diğ., 2019) veya robot kolunun araç yolunu tanımlamak için (Engholt & Pigram, 2019; Peters, 2014) farklı eklentiler kullanılarak robot kolu hareketleri de simüle edilebilmektedir. Önerilen fabrikasyon sisteminin doğrulanması için kullanılan 3B tarama teknolojisi, fiziksel çıktı ve dijital modeli karşılaşmada kullanılan en yaygın yöntemdir (Culver ve diğ., 2016; Engholt & Pigram, 2019; Tessmann & Mehdizadeh, 2019; Yang ve diğ., 2019).

2.4.1.4 Gelecek çalışmaları ve araştırma açığı

Gerçekleştirilen sistematik haritalama çalışması sonucu, bu araçlardaki gelecek çalışmalarına yön verebilecek araştırma alanları ortaya konmuştur.

Yeniden-yapılandırılabilir mekanizmaların tasarımı

Pim tabanlı sistemlerde gelecek çalışmaları, Charak ve Sinha'nın (2019) açılı bağlantı mekanizması gibi yeni eyleyici mekanizmaları geliştirilerek pimler arasındaki mesafenin azaltılmasına odaklanabilir. Ayrıca her bir pimin ayrı ayrı hareket ettirilmesi gerekliliği, eyleyici mekanizmasının çoklu pim hareketi kontrolüne imkân vermesiyle aşılabılır. Bileşen tabanlı araçlarda yenilikçi iş akışları genellikle şeyleri nasıl inşa ettiğimize ilişkin konvansiyonel yöntemlerin uyarlanmasıyla geliştirilmektedir. El ile ayarlanabilen somun ve cıvatalardan oluşan bu mekanizmalar, büyük ölçekli köprü ve kemer inşasında kullanılmak üzere tasarlanmaktadır (Kim ve diğ., 2016). Büyük ölçekli uygulamalarda fiziksel çıktının doğruluğunun görece düşük olması, bu sistemlerin uygulanabilirliğinin ana sınırlaması olarak karşımıza çıkmaktadır. Schmitz'in belirttiği gibi, araştırma ve endüstri

arasındaki iş birliği eksikliğinden dolayı, ahşap ve metal kalıpların yerini kumaş tabanlı kalıplar alamamıştır. Bu yenilikçi araştırmalar endüstriye transfer edilene kadar, doğal kaynak israfını azaltmak amacıyla bu araçların, mevcut kalıp sistemlerine ek olarak kullanılabileceği öngörülmektedir (2020).

Bu araçlar, yapıların üretiminde kullanılan birim elemanların üretilmesi için geliştirilseler de Aşut ve diğerleri tarafından geliştirilen prototipte olduğu gibi tasarım eğitimi ortamında da kullanılabilirler (2018). Dijital fabrikasyondaki dosyadan fabrikaya iş akışlarından farklı olarak açık kaynaklı ve el ile de kontrol edilebilen bu araçlar, malzeme ile deney yapmayı da mümkün kılar. Malzeme esnekliği çalışmaları, malzemelerin öngörülemeyen davranışları nedeniyle deneme yanılma yoluyla keşfe açıktır. Malzemeye etkileşim, araçla etkileşim kurmanın yaratıcı bir yolu olarak tanımlanır. Böylece, Lopez ve diğerleri tarafından önerildiği gibi önceden iyi tasarlanmış detaylı bir simülasyona sahip olmaya çalışmak yerine, bir geri besleme döngüsü ile yüzey sapması gibi hata oranları tasarım sürecine dahil edilebilir (2016). Makine ile imalat mühendisliği gibi diğer disiplinlerde esnek bileşenlerin simülasyonu için yenilikçi tasarım ortamları geliştirilse de (Raffaeli ve diğ., 2010), mimarlar ve tasarımcılar tarafından kullanılabilecek yazılımlara ihtiyaç vardır. Bu ortamlar, araç bileşenlerini ve işlevlerini tanımlayarak tasarımdan imalata, bu tür mekanizmaları simüle etmek ve kontrol etmek için kullanılabilir.

Hibrit yeniden-yapılandırılabilir sistemler

Hibrit yeniden-yapılandırılabilir sistemler, birden fazla eyleyicinin bir arada kullanıldığı sistemlerdir. Biçim üretiminde tek bir eyleyicinin yeterli olmadığı durumlarda, ek kılavuzlar ve mekanizmalar kuruluma dahil edilebilmektedir. Bu tür mekanizmalara örnek olarak Loh ve diğerleri (2019) tarafından geliştirilen bütünleşik sistem verilebilir. Bu sistemde, hem CNC fikstür ile pim yatağı ayarlanır hem de üretilen biçimin hatalı kenarları robot kolu yardımıyla düzeltilir. Pim yatağına sahip başka bir hibrit sistem, beton yazıcı ile homojen bir yüzey kalınlığı elde etmek için Borg Costanzi ve diğerleri (2018) ile Lim ve diğerleri (2020) tarafından önerilmiştir. Kumaş üzerine yüzey deseni oluşturmak için 3B baskı teknolojisinin kullanılması bu alandaki yenilikçi bir çalışmadır (Engholt & Pigram, 2019).

Eklemeli üretim ile bütünleşik olarak geliştirilen kalıplama süreçleri, insan-makine etkileşimiyle birlikte yeni olanaklar sunmaktadır. Bu tür araçlar, Lopez ve diğerleri

tarafından geliştirilen el tipi ekstrüzyon aracı gibi, imalat sürecine insan sezgisini dahil ederek yenilikçi süreçler tasarlamaya imkân vermektedir (2016). Bu çalışmada, sayısal aracın doğruluğu ile sezgiyi melezleştirerek insan hatasını fabrikasyon sürecine dahil etmişlerdir. Aşut ve diğerlerinin (2018), gerçek zamanlı üretim verilerini projeksiyon aracılığıyla dijital ortama aktardığı yeniden-yapılandırılabilir sistemden hareketle, gerçek zamanlı algılamanın, tasarımdan fabrikasyona geri bildirim döngüleri oluşturmak için bu tür araçlarda kullanılabilecek olası bir gelişme olduğu tespit edilmiştir.

Son teknoloji malzemelerin yeniden-yapılandırılabilir sistemlere entegrasyonu

Polimer ve kumaş tabanlı araçlarda, malzemenin elastikiyetinin veya işlenebilirliğinin bozulması nedeniyle kalıbın yeniden kullanılabilirliği veya geri dönüşümü zordur (Peters, 2014). Bu nedenle kalıp malzemesi olarak kullanılabilecek yeni malzemeler önerilmiştir. Lee ve diğerlerinin geliştirdiği prototipte olduğu gibi, kalıplamadaki atığı azaltmak için biçim ve faz değiştiren malzemeler (Shape Changing Materials: SCM, Phase Changing Materials: PCM) kalıp malzemesi olarak kullanılabilir (2017). Ayrıca, Şekil Hafızalı Alaşımlarla (Shape Memory Alloys: SMA) birleştirilen kumaşlar kullanılarak farklı voltaj değerleri altında değişken kalıp yüzeyleri oluşturulabilir. Ku ve Chung'un (2015) önerdiği nitinol örgü örüntüsünün eğimli yüzeyler için yeterli eğriliği oluşturamamasına rağmen bu yaklaşım geliştirilmeye açık yenilikçi bir iş akışı sunmaktadır. Kalantar ve Borhani (2018) kontrplak yüzeyine kesikler uygulayarak Eigenraam'ın çalışmasına (2013) benzer bir esnek kalıp yüzeyi geliştirmişlerdir. Çift eğrilikli panellerin kafes strüktürlerini imal etmek için robot kolu tarafından şekillendirilen yeniden kullanılabilir ve yapılandırılabilir çakıldan oluşan kalıp yüzeyini takiben (Battaglia ve diğ., 2019), diğer agregaların da kalıp malzemesi olarak kullanımı araştırılmaya açık bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu literatür araştırması, esnek ve yeniden-yapılandırılabilir araçların, kavram kanıtının (proof-of-concept) laboratuvarında ve prototip düzeyinde geliştirildiği malzeme çözümü analizi aşamasında olduğunu göstermektedir. Dijital fabrikasyon araçlarına kıyasla sundukları özelleşmiş esneklik nedeniyle, yeniden-yapılandırılabilir araçların yapı sektöründe yaygın kullanımı sorgulanmaktadır. Ancak bu araçlar rijit kalıplama uygulamalarına alternatif olabilecek potansiyele sahiptirler. Ayrıca, dijital fabrikasyon araçlarının belirtilen kısıtları ile bu yöntemlerin çoğunda kullanılan karmaşık iş akışları, gelişmekte olan ülkeler için uygun olmayabilir (Hawkins ve diğ., 2016). Bu

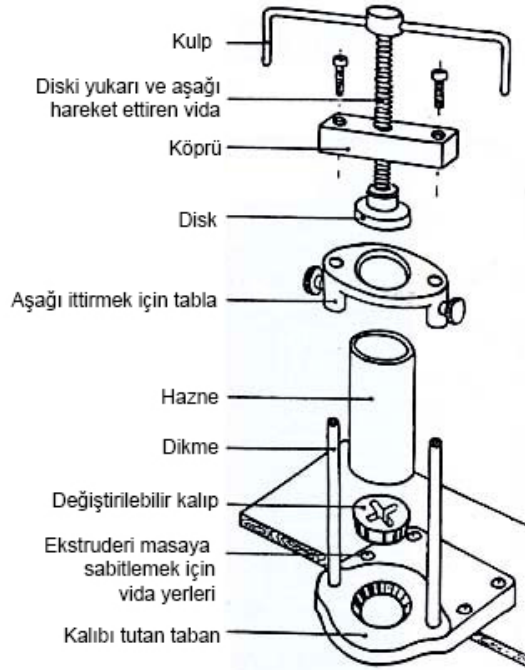
nedenle, esnek araçlar "görece düşük teknoloji" (R. Schipper ve diğ., 2014), mevcut araç ve tekniklerin özelleştirilmesiyle geliştirildikleri için değişken biçimlerin üretiminde kullanılabilirler.

2.4.2 Kil biçimlendirme araçları

Kil malzemenin plastik şekillendirilmesi iki yöntemle gerçekleşir. Bu yöntemler fitil ve turnet tekniğidir. Fitil tekniğinde malzeme el ile yuvarlanarak fitil denilen uzun silindirik biçimler elde edilir. Daha sonra bu silindirler üst üste yığılarak biçim oluşturulur. Katman çizgilerinin belli olmaması için dış yüzeyi el veya kil biçimlendirme araçlarıyla şekillendirilir. Turnet tekniğinde ise kilin tornada şekillendirilmesi el ile veya kalıp şablonla yapılabilir. Kilin kalıplama ile şekillendirilmesinde; pres kalıplama, döküm ve ekstrüzyon olmak üzere üç yöntem kullanılır. Pres kalıplama yönteminde üretilecek birim elemanın negatif kısmı kil, alçı veya ahşaptan üretilir. Kil malzeme basınç uygulanarak bu kalıp içine doğru itilir ve sıkıştırılır. Kilin içerisindeki su miktarı ne kadar yüksek ise uygulanan basınç o kadar düşük olur. Kil kuruduktan sonra, üretilen biçimin geometrisine uygun kalıplama yapıldıysa, biçim kolayca kalıptan çıkarılabilir. Döküm yönteminde (slip-casting), döküm çamuru (slip) kuru ve nem emiciliği yüksek bir alçı kalıba dökülerek kurumaya bırakılır. Daha sonra döküm çamuru pozitif kısım negatif kısımdan dikkatlice ayrılarak kalıptan çıkarılır. Pres kalıplamadan (ram press) farklı olarak, dökümde kalıp yapımı, üretimde doğruluk elde etmek amacıyla birden fazla adımı anlamak açısından karmaşık ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu yöntemde, tasarlanan tek bir birimden birden fazla kopya oluşturmak için kalıplardaki doğruluk değerinin yüksek olması gerekir.

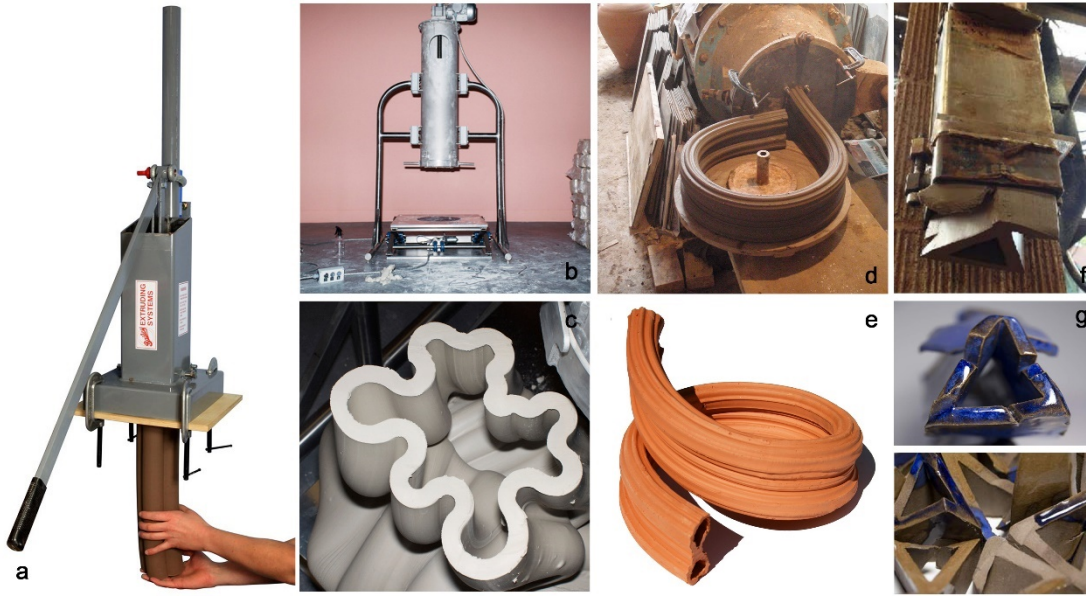
Kil malzemenin kullanıldığı ekstrüzyon tabanlı sistemler, kalıplı ekstrüzyon mekanizmaları ve 3B kil yazıcılardan oluşur. Kalıplı ekstrüzyon mekanizmasının manuel versiyonu seramik atölyelerinde borular, vazolar ve karolar için içi dolu veya boş kesitler üretmek amacıyla kullanılır. Manuel ekstrüzyon aracı, çevirme kolu, vida-disk bileşeni ve mekanizması ile malzemenin içine konulduğu hazne, kalıp, kalıbın sabitlendiği bileşenden oluşur (Şekil 2.9). Kil blok bu hazneye konulur ve kalıp mekanizmanın en ucuna yerleştirilir. Presleme kolu aşağı çekildiğinde bu kola bağlı bulunan disk, kili kalıptan dışarı doğru iter. Vidalı mekanizmalarda ise, vidanın bağlı olduğu çevirme kolu aracılığıyla diske kuvvet uygulanır. Bu şekilde, vida adımına,

malzemeye ve kalıp açıklığına bağlı olarak malzeme katmanlar halinde ekstrüze edilir. Her iki mekanizmada da kil, tel kesiciyle bütünden ayrılır.



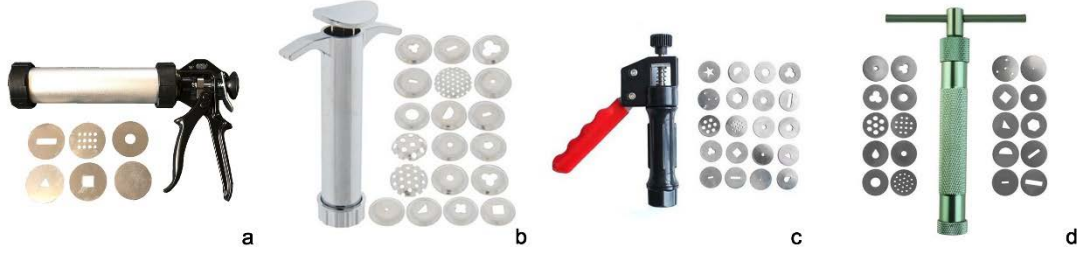
Şekil 2.9 : Manuel ekstrüzyon mekanizması (Mussi, t.y.).

Manuel ekstrüzyon mekanizmasının farklı ölçeklerde biçim üretmeye yarayan birçok çeşidi bulunmaktadır (Şekil 2.10). Bu mekanizmaların manuel kullanılan türleri genellikle dikey kuvvet ile, otomatik kullanılan türleri ise yatay kuvvet altında çalışır. Endüstride bu araçlar, dikdörtgen bir kalıp ile doğrusal bir ekstrüze kesit üretmek için kullanılırlar da atölye ölçeğinde beklenmedik biçimlerin yaratıcı süreçlerde kullanıldığı görülür. Farklı kalıp kesitleriyle yapılan üretimlerin yanı sıra biçimin ekstrüzyon esnasında eğilmesi veya şişmesi gibi biçimsel deformasyonların tasarım sürecine dahil edilmesi söz konusudur. Bu gibi beklenmedik biçimlerin tekrarlı olarak üretilebilmesi için bu araçlarla birlikte kılavuz (jig) denilen yardımcı araçlar geliştirilmiştir. Kılavuzlar, biçim yüksekliğini ayarlamak için ayarlanabilir bir düzlem (b) veya biçim eğilmesini kontrol etmek için turnet şeklinde (d) olabilir.



Şekil 2.10 : Kil biçimlendirmede kullanılan manuel ve otomatik ekstrüder örnekleri. (a) Duvara monte edilen manuel kil ekstrüderi (URL-6) (b)(c) Anton Alvarez'in geliştirdiği otomatik kil ekstrüderi ve üretilen biçim (Alvarez, 2016.) (d)(e) Peter Webb'in tasarladığı kılavuz ve üretilen biçim (URL-7; URL-8) (f)(g) California College of the Arts'da 2012 yılında Architecture and Ceramics departmanında bir stüdyo kapsamında geliştirilen kalıp ve üretilen biçim (Stein & Swaine, 2012).

Sürekli bir kesit üretmeye yarayan mekanizmaların manuel çalışan ve küçük ölçekli biçim üretmeye yarayan çeşitleri de mevcuttur (Şekil 2.11). Bu mekanizmalar vidalı veya düz bir itme mekanizmasına sahip olabilir. Metal çokgen kalıplarla birlikte satılan bu araçlar, obje üretimi, takı tasarımı ve pasta dekorasyonları gibi farklı amaçlar için kullanılabilir. Pleksi ve PVC gibi farklı malzemelerden kalıplar yapılabileceği gibi mekanizmanın kendisi de kendin-yap yöntemiyle üretilerek geliştirilebilir. Müdahaleye açık, değiştirilebilir kalıp ve araç başlığı bileşenleri ve kontrol mekanizmasının manuel veya otomatik olmasına dayanarak bu aracın yapısı gereği yeniden yapılandırmaya açık olduğunu söyleyebiliriz. Bu üretim biçimi 3B baskıdan ve kalıplamadan daha hızlı sonuç verir, ancak ortaya çıkan biçimler tek yönlü kuvvetin tek kesit boyunca uygulanması nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle, el veya kılavuz yardımıyla ek biçimlendirmeler yapılması gerekebilir. Ek bileşenler ile sürekli olarak geliştirilebilen ve kontrol mekanizmasının otomatik hale getirilmesi ile seri üretim yapılabilen ekstrüderler obje ölçeğinden mimari birim eleman ölçeğine kadar farklı ölçeklerde kullanılabilirler.



Şekil 2.11 : El ile kavranabilen kil ekstrüder örnekleri. (a) (b) (c) Düşey presleme mekanizmasına sahip araçlar (URL-9; URL-10) (d) Vidalı presleme mekanizmasına sahip araç (URL-11).

Kil şekillendirmede kullanılan dijital iş akışları, dijital model ile fiziksel prototip arasındaki doğrudan çeviriyi mümkün kılarak yapım sürecini kolaylaştırmaktadır. Bu dijital iş akışları genellikle 3B baskı teknolojisini kullanır. Bir nesnenin 3B olarak basılabilmesi için 3B dijital bir modelinin olması ve bir program aracılığıyla STL formatına çevrilmesi gerekir. Program mevcut biçimi katman yüksekliği, duvar kalınlığı, dolgu yoğunluğu, yazdırma hızı, malzeme sıcaklığı gibi kullanıcının belirlediği parametrelere bağlı olarak ayrı katmanlar halinde tanımlar ve araç yolunu (tool path) üreterek 3B yazıcıya gönderir. Kil malzeme fitil yönteminde olduğu gibi, vida veya kaldıraç aracılığıyla bir nozül den itilerek katmanlar halinde üst üste yığılarak şekillendirilir. Kartezyen ve delta olmak üzere iki tür 3B yazıcı vardır (“3D printing technology – Delta versus Cartesian”, t.y.). Kartezyen yazıcılarda nozül XYZ koordinatlarında doğrusal yönlü hareket ederken, delta yazıcılarda bulunan üç kollu yapı sayesinde nozül, doğrusal hareketin yanı sıra açısall hareket de gerçekleştirebilmektedir. Bu sayede hem araç başlığının ağırlığı azaltılmış hem de daha uzun objeler basılabilir hale gelmiştir. Jokić ve diğerlerinin (2012) robot koluyla ve Lauerma’nın (2014) RepRap 3B yazıcısıyla yaptığı çalışmalar kartezyen yazıcılarla gerçekleştirilen üretime örnek olarak verilebilir. Delta yazıcısı ise Keep (2013) ve van Herpt (2014) tarafından kil bazlı objeler üretmek için kullanılmıştır. Macun bazlı ekstrüzyon ve 3B baskı teknolojisi; eksiltmeli fabrikasyon yöntemlerine kıyasla neredeyse sıfır atık ve düşük maliyetle düşük hacimli üretim gerçekleştirilebilmesi (Hauschild ve diğ., 2011), girdilerin daha iyi kullanılabilirliği, daha ucuz ekipman ve daha kolay bakım (Ruscitti ve diğ., 2020) gibi avantajlardan dolayı tercih edilmektedir.

Özetle, dijital kil çalışmaları, slip döküm (Stein & Swaine, 2012; Weston, 2013), pres kalıplama (Bechthold, 2016; Muslimin, 2010) ve bir eklemeli üretim yöntemi olarak kullanılan fitil yöntemi (Keep, 2013; Lauerma, 2014) gibi konvansiyonel yapım

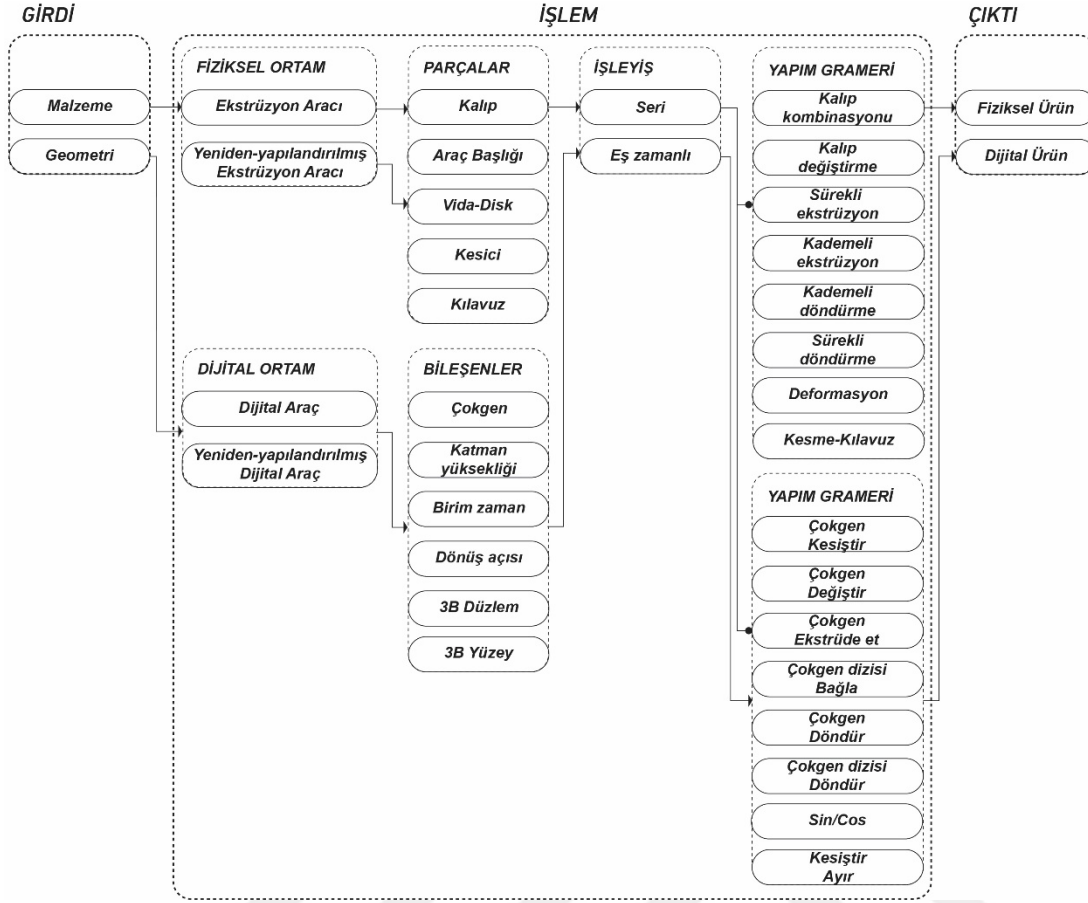
süreçlerin araştırılmasına ve geliştirilmesine odaklanmıştır. Kalıplarla kil ekstrüzyonu, birim eleman üretiminde yaygın bir yöntem olmasına rağmen, bu alandaki çalışmalar dijitalleşme ve inovasyon açısından oldukça sınırlıdır. Ekstrüzyonda kalıp tasarımının bilgisayar destekli tasarım ve üretim araçlarıyla farklı iç boşluklar üretecek biçimde geliştirildiği görülür. Dolayısıyla, dijitalleştirmeye en açık alanlardan biri olarak kil ile biçim üretimi karşımıza çıkmaktadır.

Ekstrüzyonda, nozül yerine profil de denen kalıplar kullanılır ve bu kalıplar sabittir. Biçimin ayrık katmanlarını şekillendiren 3B baskı teknolojisinin aksine ekstrüzyonda malzeme doğrudan şekillendirilir. Macun bazlı ekstrüzyon işlemi, 3B kil baskı ve döküm işleminden çok daha hızlıdır, ancak tekil bir sabit kalıba uygulanan tek yönlü kuvvet nedeniyle biçimsel çeşitlilik oldukça sınırlıdır. Kil şekillendirmenin zanaatla olan doğrudan ilişkisi de düşünüldüğünde, manuel ekstrüzyon aracının yeniden-yapılandırılması, kil ile biçim üretiminde araştırmaya açık bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

3. FİZİKSEL ARAÇ DÖNÜŞÜMÜ: YENİDEN-YAPILANDIRILABİLİR EKSTRÜZYON ARACI (YEA)

Tez kapsamında önerilen kavramsal çerçeve, fiziksel ve dijital ortamda girdi-işlem-çıktı şeklindeki yapıma ait alt bileşenlerin döngüsel olarak birbirini beslediği iki aşamalı bir süreci ve bu sürecin değerlendirmesini içermektedir. Fiziksel ortamda, üretim süresi boyunca fiziksel araç ile işlenerek biçime dönüşen girdi malzemedir. Malzeme ilk önce ekstrüzyon aracının farklı bileşenlerinin fonksiyonlarına ve serbestlik derecelerine bağlı olarak işlenir. Ekstrüzyon aracında fiziksel çıktı, itkiye dayalı olarak ortaya çıkan doğrusal ekstrüzyondur. Bu itki sonsuz vidanın oluşturduğu dairesel hareketin, dönme eksenine dik olan doğrusal harekete dönüşümü sonucu oluşmaktadır. Bu doğrusal hareket malzemenin itilerek aracın başlık kısmına iletilmesini sağlamaktadır. Bu iletim sonucunda rijit ve 2B kesici fonksiyonuna sahip kalıp malzemeyi şekillendirmektedir. Yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracı ise, tüm bu araç bileşenlerinin ardışık deneyler sonucu keşfedilmiş tüm yeni kullanımlarını içerir. Bu yeni kullanımlar, mevcut yapım gramerinde bulunan hem yeni hem de eş zamanlı uygulanan kurallar aracılığıyla biçimin oluşturulmasını sağlar. Bu yeni kullanımların bir ayağını da geliştirilen hibrit araç ile yapılan denemeler oluşturmaktadır.

Dijital ortamda ise işlem süresi boyunca bir dizi kural, seri veya eş zamanlı olarak başlangıç biçimine (initial shape) uygulanır. Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinde bu biçim çokgendir. Bu çokgen, birim zamandaki katman yüksekliği ile belirlenen sürede ve katman sayısında çoğaltılarak bir araya getirilir. Kesici ve kılavuz yüzey biçimlendirmeleri ise farklı 3B düzlem ve yüzeylerle temsil edilir ve bunların ana biçimle kesişimi sonucu yeni biçimler ortaya çıkarılır. Gramer kurallarına göre oluşturulmuş dijital araç, fiziksel ortamda gerçekleştirilen deneyler sonucu geliştirilen YEA'nın yeni kullanımlarını içerek şekilde geliştirilir (Şekil 3.1). Özetle, geliştirilen araç üretilen biçimleri aynı kural setleri ile dijital ortamda yeniden üretme-yapma-ölçme ve tekrar yapma döngüsünün bir parçasıdır. Tüm bu sürecin sonunda fiziksel ve dijital ortamda ürünler elde edilmiştir.



Şekil 3.1 : Dijital ve fiziksel ortamda aracın bileşenlerine bağlı olarak geliştirilmiş sürecin akış şeması.

Fiziksel ve dijital ortamda yapım grameri ile üretilen biçimler birbirleriyle karşılaştırılarak doğruluk açısından belirlenen ölçütlere göre sapma değerleri tespit edilmiştir. Bu sayede, yapım gramerinin fiziksel ortamdaki tutarlılığı farklı üretim senaryoları bağlamında test edilerek, iki aşamalı sürecin dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları tartışılmıştır.

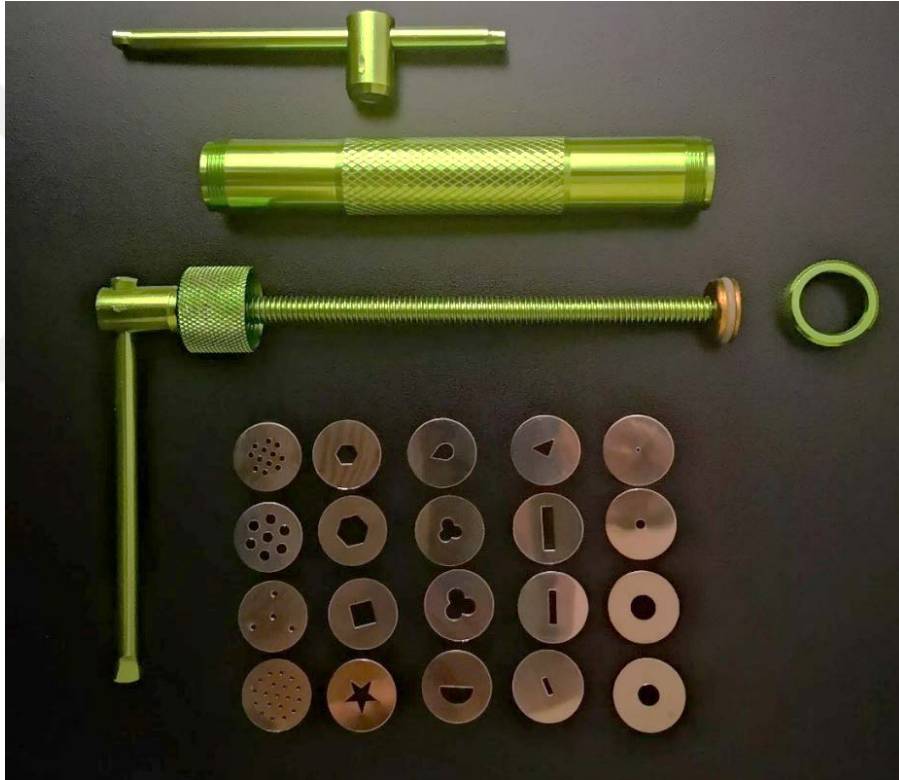
3.1 Ekstrüzyona Dayalı Tasarımda Fiziksel Araçlar

3.1.1 Ekstrüzyon aracı (EA)

Fiziksel ortamdaki yapım gramerini oluşturmak ve geliştirmek için zanaatta kullanılan vidalı presleme mekanizmasına sahip ekstrüzyon aracı (EA) başlangıç aracı olarak seçilmiştir. Bu araç; eklemeli üretim araçlarındandır. Araç haznesi, 42 cm³ bir hacme sahiptir. Mevcut araçla birlikte gönderilen yirmi adet 18 mm çapa sahip metal plakadan üretilmiş kalıp bulunmaktadır. Metal plakaların ortalarında bulunan kalıp açıklığı, en fazla 8 mm çapında bir daire içerisinde kalacak şekilde değişkenlik

göstermektedir. Kalıplar; daire, kare, dikdörtgen, altıgen, yıldız gibi temel biçimler ile yarım daire, 3-daire ve damla gibi türetilmiş simetrik ve asimetrik biçimlerden oluşur. Ayrıca, birden çok daire ile eş zamanlı ve birden fazla ekstrüze kesit üretmeye yarayan kalıplar da araç setinde yer almaktadır. Bu araç, boyutu gereği, polimer kilden küçük ölçekli objeler üretmede kullanılmaktadır.

Seçilen ekstrüzyon aracının bileşenleri; vida-disk bileşeni, hazne, kalıp ve harici kesicidir (Şekil 3.2). Aracın yaygın kullanımı, çevirme kolunun döndürülmesiyle hareket eden diskin, hazne içerisine yerleştirilen malzemeyi kalıptan dışarı itmesi ile doğrusal ekstrüze edilmiş biçimin elde edilmesi şeklindedir. Malzeme haznesi silindirik yapıdadır ve bu sayede malzeme kaybı en aza indirilmiştir.



Şekil 3.2 : Manuel araca ait bileşenler ve kalıplar.

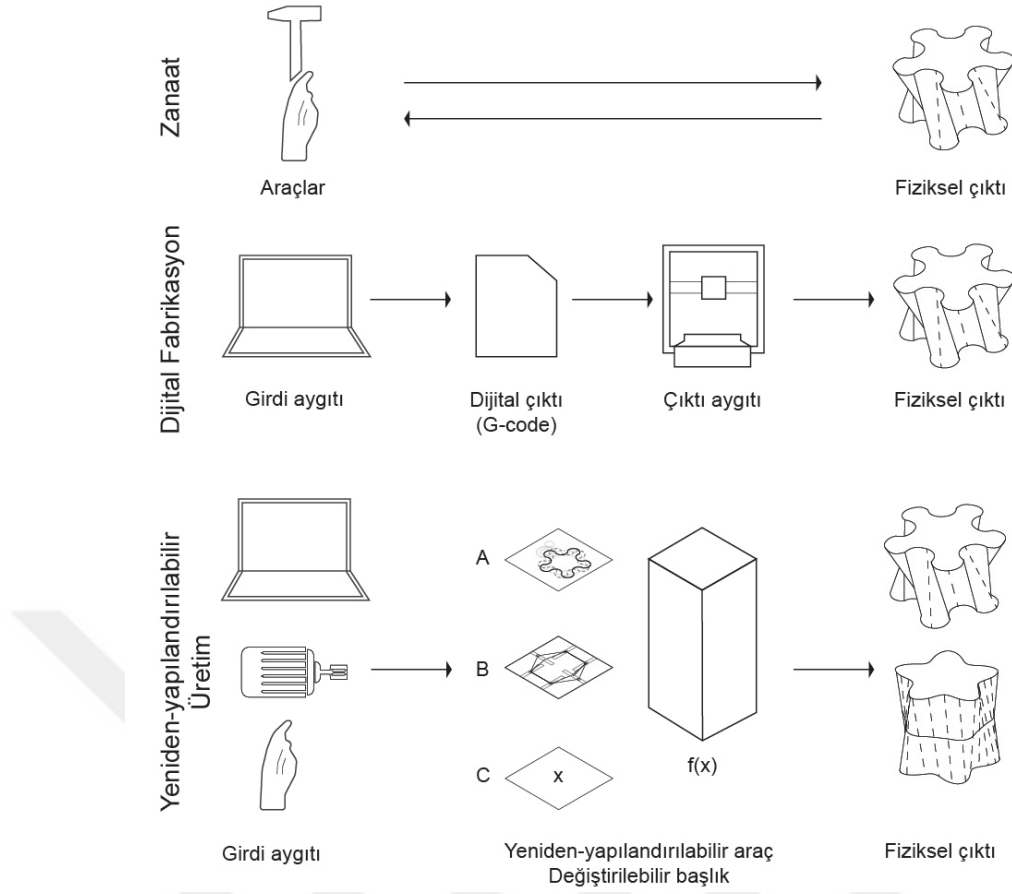
Araç ile biçim üretimi iki aşamalıdır. Araçla biçimlendirme işlemi, malzemenin hazırlanması ile başlar. Hazneye konulacak malzeme hazır olarak satın alınmışsa, yani vakumlu haldeyse malzemenin içerisinde hava bulunmaz. Ancak, malzeme karışımı mevcut malzemelerden bir araya getirildiyse malzemenin içerisinde bir miktar hava bulunabilir. Kil içerisinde bulunan hava, el ile veya yoğurma makinesiyle (pug mill) çıkarılabilir. Mevcutta bu işlevi gerçekleştirecek bir mekanizma yoksa, malzeme hazne içerisine yerleştirilmeden önce el ile şekillendirilerek silindir haline getirilmeli

ve eğer malzemenin sertliği fazla ise bu malzeme yoğurularak yumuşatılmalıdır. Yumuşatılan malzeme, boyutsal olarak hazne içerisine sığacak şekilde kesilmelidir. Malzeme hazırlandıktan sonra hazne içerisine yerleştirilir. Sonrasında, araç başlığı içerisine daire biçimli 1 mm çapında açıklığa sahip bir kalıp yerleştirilir ve vidalı olan kalıp başlığı sıkıştırılarak kalıp sabitlenir. Çevirme kolu aracılığıyla vida döndürülür ve malzeme hazne içerisinde sıkıştırılarak içerisindeki hava çıkarılır. Nokta açıklıklı kalıptan malzeme çıkışı gözlemlendiğinde presleme işlemi sonlandırılarak başlık çevrilir ve açılır. Bu durum malzemenin içindeki havanın boşaldığı anlamına gelmektedir.

Üretimin ikinci aşamasında, üretilecek biçime göre seçilen yeni kalıp, bu başlığın içerisine yerleştirilerek işleme başlanır. Aracın presleme mekanizması vidalı olduğu için vida adımı ve tur sayısı basılan malzemenin katman yüksekliğini belirler. Basılan malzeme kesici yardımıyla ana malzeme gövdesinden ayrılır. Her bir basımdan sonra mekanik bileşenler arasına sıkışan malzeme bir bez yardımıyla temizlenerek süreç en baştan işletilir. Presleme esnasında, sıkışan hava malzemenin hareketini engelleyebilir. Bu noktada çevirme kolu yardımıyla disk bir tur geri çevrilerek sıkışan hava boşaltılır ve işleme devam edilir. Vida sürekli olarak döndürülürse ekstrüze edilen biçim yüzeyi aynı kesitin tekrar etmesinden dolayı sürekli olur. Vida aralıklı olarak döndürülürse yüzeyde yatay çizgiler oluşur. Bu çizgiler, malzemeye uygulanan biçimlendirmenin anlaşılmasında ve temsil edilmesinde kullanılabilir.

3.1.2 Yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracı (YEA)

Fiziksel ortamdaki denemelerin gerçekleştirilebilmesi için seçilen ekstrüzyon aracının yeniden yapılandırılma süreci, literatür örneklerinin detaylı olarak incelenmesi sonucunda tanımlanmıştır. Yeniden-yapılandırılabilir bir araç tasarlamak için araç bileşenlerinin değiştirilebilir, bir araya getirilebilir ve hareket edebilir olması gerekir. Bu araçlarda önemli olan, araca ait bileşen-fonksiyon ilişkilerinin açık bir şekilde tanımlanarak bileşenlerin hareket alanlarının ve serbestlik derecelerin ortaya konulmasıdır. Dolayısıyla, manuel olarak kullanılan bir araç ve üretim adımları parametrik ve kontrollü hale getirilirse bu aracın yeni bileşen-fonksiyon ilişkileri tanımlanarak biçimsel çeşitlilik arttırılabilir (Şekil 3.3). Araç zaman içerisinde hibrit veya otomatik hale getirilerek daha kısa sürede fazla sayıda biçim üretilebilir. Bu sayede, tek bir mekanizma ile araca bağlı çözüm uzayı keşfedilebilir.



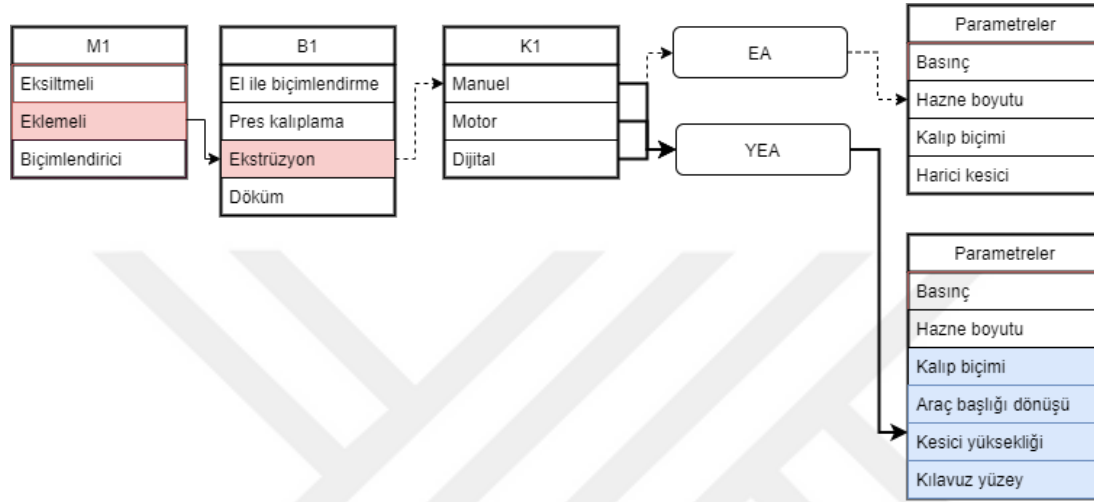
Şekil 3.3 : Yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme.

Yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirmek için takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir:

- Seçilen aracı bileşenlerine ayırarak bu bileşenlerden sabit ve hareketli olanları belirlemek,
- Aracın birbirleriyle kombine edilebilecek bileşenlerini belirlemek,
- Aracın değiştirilebilecek veya yeniden tasarlanarak araca monte edilebilecek bileşenlerine karar vermek,
- Hareketli olabilecek bileşenlerin hareket alanlarını ve serbestlik derecelerini belirlemek,
- Bu adımların sonunda yeniden yapılandırma şemasını ortaya koyarak aracın kaç farklı konfigürasyonda kullanabileceğini belirlemek.

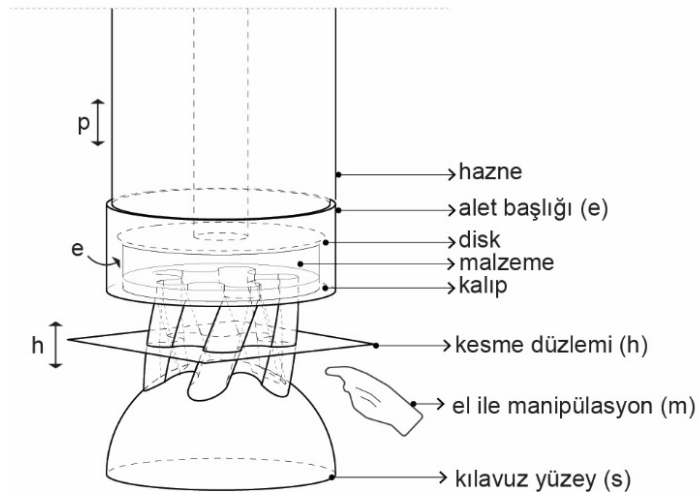
Bu yöntemle gerçekleştirilen ön denemeler sonucunda, araç bileşenlerinden olan kalıpların birbirleriyle üst üste getirilerek birleştirilebileceği, kalıpların değiştirilebileceği ve yeni kalıpların araç bileşenlerine eklenebileceği belirlenmiştir. Ayrıca, araç başlığının vidalı aksamından dolayı merkez aksı üzerinde

döndürülebileceği keşfedilmiştir. Kesici ve kılavuz yüzey gibi ekstrüzyon sonrası gerçekleştirilen ek biçimlendirmelerin de bu araçla üretilcek çözüm uzayını genişlettiği keşfedilerek araç bileşenlerine eklenmişlerdir (Şekil 3.4). Sonuç olarak, ekstrüzyon mekanizması kullanım amacı dışına çıkarılarak mevcut bileşenler yeniden işlevlendirilmiş ve bu bölümün sonunda, aracın sezgisel olarak kontrol edilen işlem adımları açık şekilde tariflenerek birer üretim senaryosu olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.4 : Manuel araçtan uyarlanan ve araca eklenen parametreler.

Aracın bileşenleri, bileşenlerin işlevleri ile el ve aparatlarla uygulanan ek manipülasyonlar Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Rijit araçta sabit olan kalıp, araç başlığı ve kesme teli, el ile yapılan keşifler sonucu hareketli olarak tanımlanmıştır. Ekstrüde biçimi oluşturan XY düzleminde araç başlığı döndürülebilirken, disk Z ekseninde hareket eder. Biçim olarak değişken olabilen kesme teli, bu senaryoda, doğrusal bir teldir. El manipülasyonu, tasarımcının veya zanaatkarın becerisi ve tasarım amacı ile ilgili herhangi bir müdahaleyi içerebilir. Ekstrüde edilmiş biçimin üzerine düştüğü kılavuz yüzey farklılaştırılabilir. Her bir fonksiyonun süresi, zanaatkar veya tasarımcı tarafından uygulanan kuvvete ve ustalığa bağlıdır, ancak bu araçta kullanılan vidalı presleme mekanizması nedeniyle birim zaman sabit bir t'dir ve vidanın bir tur dönüşüne eşittir. Vida adımına bağlı olarak birim zamanda basılan malzemeyi temsil eder.



Şekil 3.5 : Araca ait bileşenler ve hareket yönleri.

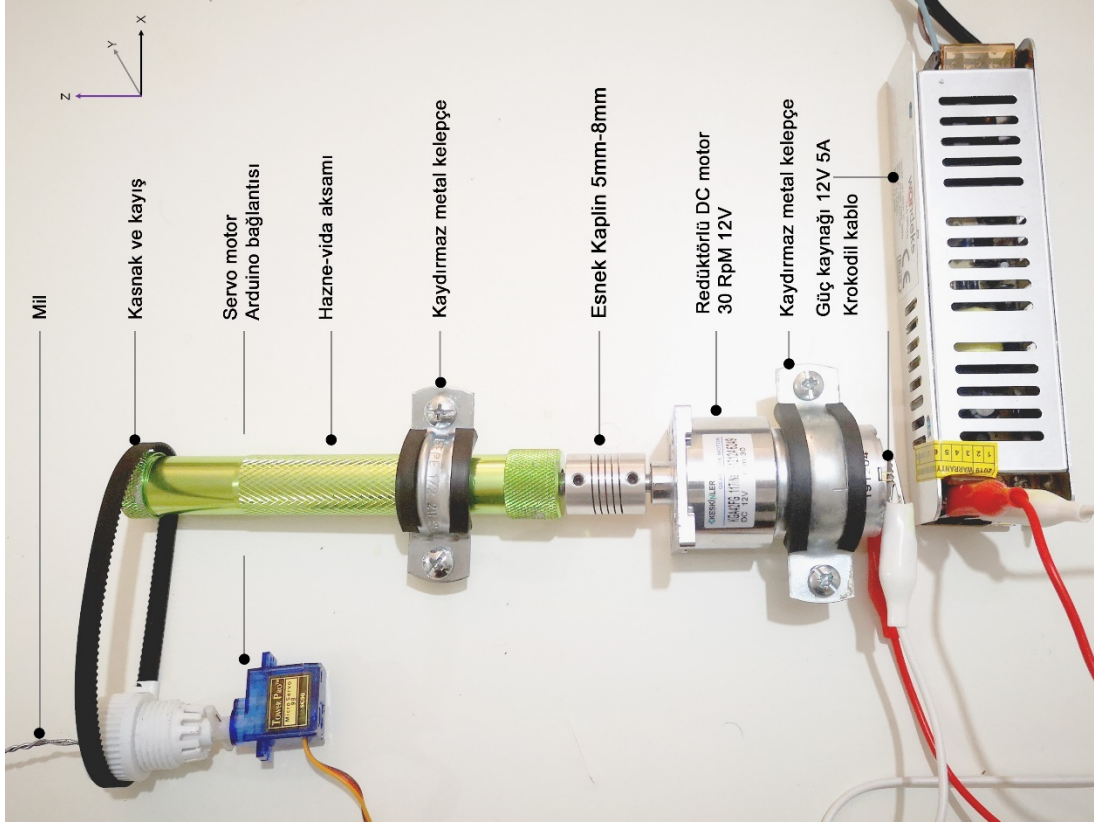
Bu doğrultuda, yeniden yapılandırılan ekstrüzyon aracı ilk aşamada tek ve iki kişinin kontrolüne bağlı olarak manuel olarak kullanılmıştır. Daha sonra operatör değişikliğinin üretilen biçimler ve işlem üzerinde etkisi keşfetmek üzere hareketli olan vida-disk bileşeni ve araç başlığı motorize edilmiştir. Kesici ve kılavuz biçimlendirme işlemleri her iki araçta da el ile uygulanmaktadır. Dolayısıyla, YEA hem manuel hem motor ile kontrol edilebilen hibrit bir araçtır.

Manuel aracın yapılandırma şemasının oluşturulmasını takiben aracın elektro-mekanik hale getirilmesi için takip edilen adımlar aşağıdaki gibidir:

- Belirlenen hareketli bileşenlerin serbestlik derecelerine bağlı olarak motor aktarım elemanları ile istenen aksta veya düzlemde kontrol edilmesi,
- Motorun dakikadaki devir sayısı (rpm) ile hareketli bileşenin işlevi arasındaki korelasyonun ve ilişkinin tanımlanması,
- Güç kaynağının manuel veya otomatik kontrolünün sağlanması,
- Hareketi amaçlanan ek bileşenler var ise, motor gücü sağlanması,
- Araç ve motor bileşenlerinin sabitlenmesi,
- Var ise, fiziksel hesaplama araçlarına bağlanarak (Arduino) araç kontrolünün dijital olarak gerçekleştirilmesidir.

Aracın bileşenlerinin motor gücü ile hareket ettirilmesi için öncelikle, bu araç hazne, vida, araç başlığı ve çevirme kolundan oluşan alt bileşenlerine ayrılmıştır. Bu bileşenlerden malzemeyi ekstrüze etmeye yarayan vida, aracın dikey yerleştirildiği senaryoda diski Z yönünde itmektedir. Vidanın motora bağlanabilmesi için çevirme

kolu çıkarılmıştır. Bu bölüm motora doğrusal olarak bağlanmıştır. Araç başlığı malzemenin biçimlendirilmesiyle ilgili temel fonksiyonları içeren bölümdür. Bu versiyonda kesme ve kılavuz ile şekillendirme manuel olarak gerçekleşirken, dönme ve presleme işlemi motor kontrolündedir. Manuel aracın kontrol bileşenleri ile olan bağlantısı Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Elektro-mekanik aracın bağlantı şeması.

Malzemenin kalıp dışına ilk çıkış anında, motorun maksimum güçte çalışması gerekmektedir. Eğer bu aşamada motor gücü malzemeyi kalıp dışına itecek gücü sağlayamaz ise, motorda yığılma (stalling) meydana gelmiş demektir. Motor adımı malzeme sertliğine göre belirlenmiş olup deneme yapılan mikro step ve servo motor türleriyle istenilen sonuç alınamamış ve redüktörlü DC motor (KGA-42FG) tercih edilmiştir. Motorun bir diğer parametresi ise dakikadaki devir sayısıdır (rpm). Dönüş sayısı ile motor gücü ters orantılı olduğundan deneme yapılan 60 rpm, 30 rpm ve 10 rpm motor türlerinden, dakikada 30 adım dönüş ile ideal güce sahip olan (makinanın düzgün işlerliğini sağlayacak güç) 30 rpm motor türü seçilmiştir. Motorun güç kaynağı olarak Avrupa tipi prizler ile birlikte kullanılabilen 12 Volt ve 5 Amperlik bir güç kaynağı tercih edilmiştir. Bu sayede aracın dönüştürücü olmadan ve sanayi tipi elektriğe ihtiyaç duyulmadan atölyede kullanılması amaçlanmıştır. Esnek kaplin

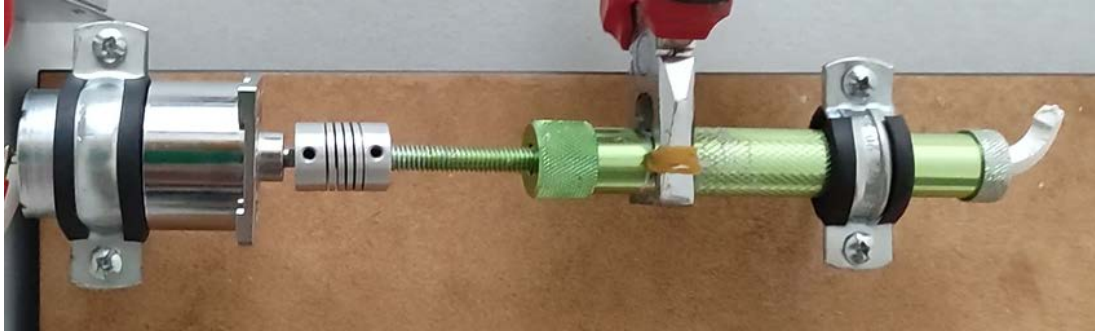
seçilme nedeni ise, hazne içinde malzeme tükendiğinde, diskin geri tepmesini ve motor zorlanmalarının araca zarar vermesini engellemektir. Esnek kaplin, motor ve güç kaynağı bileşenlerinin doğru seçilmesi sayesinde aracın işlerliği sağlanmıştır.

Güç kaynağından gelen enerji motor aracılığıyla kapline aktarılmaktadır. Kaplin hazne-vida aksamındaki vida miline bağlıdır. Bu vida milinin dönmesi haznenin içerisinde bulunan mile bağlı diskin ileri doğru itilmesini ve bu disk yardımıyla da haznedeki dolgu malzemesinin araç başlığına takılı kalıptan geçmesini sağlar. Aslında başlık içindeki kalıp dolgu malzemesinin kenarlarından eksilterek malzemeye şekil vermektedir. Kaplin bir bağlantı elemanı olmasına rağmen haznenin dönmesini de sağlamaktadır. Bu kısmın farklı kullanım amaçları için sabitlenmesi istenirse kaydırmaz metal kelepçe kullanılabilir. Esnek araç başlığının hareketi, mikro servo motorun bir kasnak ve mil aracılığıyla bu başlığa bağlanmasıyla kontrol edilmektedir.

Adaptif kontrol sisteminde motor, torku kendisi ayarlar. Bunu ayarlarken öncelikle düşük torktan yüksek torka çıkar yani rpm'si yüksekte düşüğe iner. Sıkıştırma işleminde, malzeme içindeki havanın tamamı boşaltılır ve silindirik hale gelen malzeme preslemeye hazır hale gelir ve istenen kalıp araç başlığı içerisine yerleştirilerek üretime başlanır. Bu aşama presleme aşamasıdır. Başlık ve kalıp takıldıktan sonra ise malzemenin sertliğine uyum sağlayacak şekilde motor kendi konfigürasyonunu oluşturur ve malzemenin verimli bir biçimde yani optimum hızda basılmasını sağlar. Motorun torku malzemeyi sıkıştırmaya yeterli ise; motor, itme hareketine devam eder. Motor yeterli rpm'yi sağlayamadığı zaman torku yükseltmek için rpm'sini düşürür. Örneğin, motor, 30 rpm ile polimer kili basabilirken, bundan daha sert bir malzemenin kullanılması durumunda, torku 30 rpm'den 10 rpm'ye kadar düşürebilir. Bu sayede hem süreden tasarruf edilir hem de motorun malzemeye ve mekanizmanın kendisine zarar vermesi engellenmiş olur. Aynı zamanda motor yığılmasının önüne geçilerek ekstrüze edilen biçimdeki pürüzlü yüzeylerin azaltılması sağlanır.

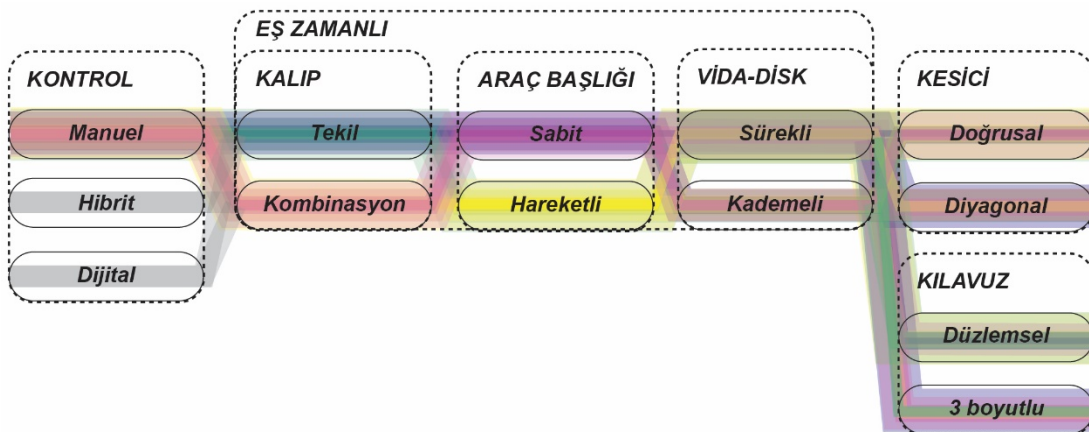
İkinci bir yöntemde ise, tork ayarı güç kaynağı ile yapılabilir. Akım 5 Amperden 10 Ampere çıkartılarak motor torku arttırılır ve çok sert malzemeler de bu şekilde basılabilir. Ekstrüzyon süresince araç başlığı, saat ve saat yönünün tersi yönde, motor rpm'sine karar verilerek servo motor yardımıyla döndürülebilir. İki motor koordineli veya birbirinden bağımsız olarak çalışabilir. İki motorun kontrolü iki şekilde yapılabilir. İlkinde motorlar bir buton aracılığıyla açılıp kapatılarak kontrol edilebilir.

Ana motor aktifken ikinci motor da aktifse, bükülmüş bir ekstrüze biçim ortaya çıkar. Eğer sadece ana motor aktif ise doğrusal ekstrüzyon yapılır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 : YEA ile ekstrüze edilmiş biçim.

Tüm bu yeniden-yapılandırma süreci sonucu Şekil 3.8’de gösterilen aracın konfigürasyonlarını gösteren şema elde edilmiştir. Bu şemaya göre, YEA’da araç kontrol mekanizması, kalıp, araç başlığı, vida-disk, kesici ve kılavuz yüzey bileşenlerine bağlı fonksiyonların kombinasyonlarından ortaya çıkan birçok üretim senaryosu bulunmaktadır. Manuel kullanım aracın el ile kullanımını, hibrit kullanım hem motor hem el ile kullanımını, dijital kullanım ise Arduino aracılığıyla motora gönderilen bir kod dizini ile kullanımını ifade etmektedir. Hibrit kullanım, presleme mekanizmasının motor kontrolünün buton ile sağlandığı senaryodur. Diğer tüm işlemler el ile gerçekleştirilir. Malzemenin biçimlendirildiği aşamada eş zamanlı olarak kural setleri uygulanır. Kesici ve kılavuz şekillendirmeleri ise opsiyonel olup, bu tez kapsamında eş zamanlı biçimlendirme işlemlerine odaklanılmıştır.



Şekil 3.8 : Araca bağlı biçim üretme parametreleri.

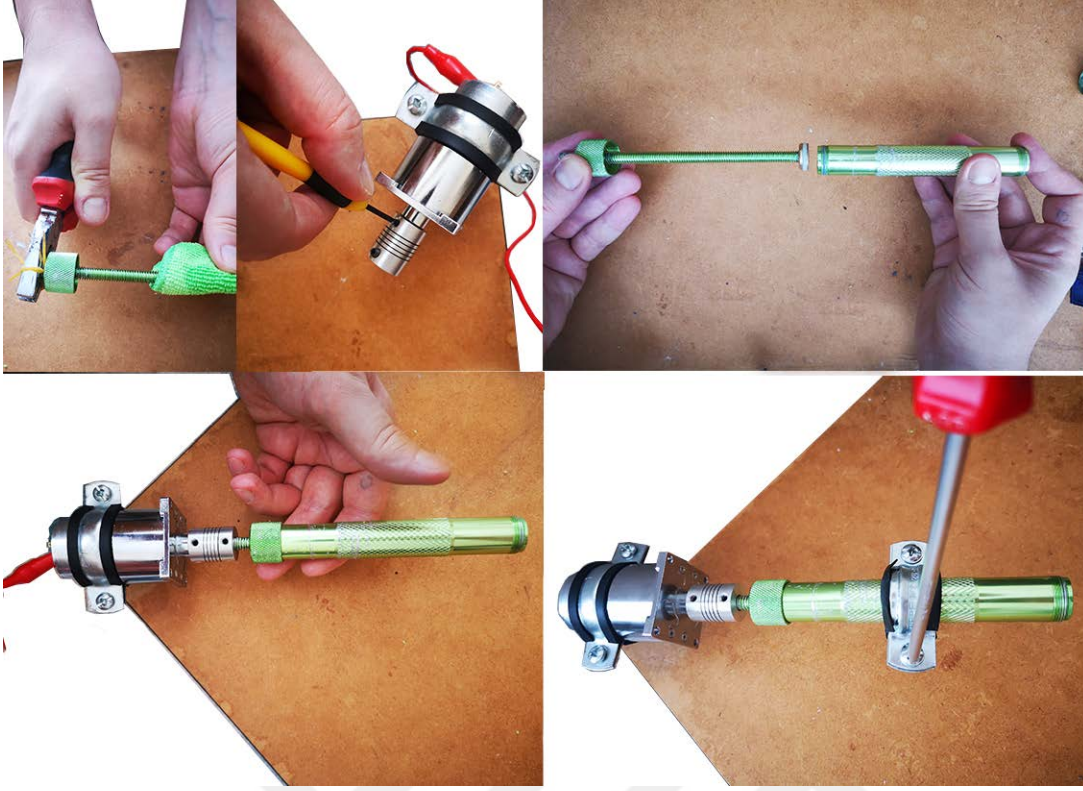
Bu şema kullanılarak, tekrarlı ve kontrollü şekilde biçimsel çeşitliliğin elde edilebilmesi, YEA’nın hem manuel hem de hibrit kullanımında mümkündür. Bu iki

kullanım arasındaki olası farklılıkların araştırılması için belirli kural setleri ile biçimler üretilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2 Ekstrüzyona Dayalı Araç ile Yapılan Denemeler ve Üretilen Biçimler

Geliştirilen YEA ile yapılan denemeler dört aşamadan oluşmaktadır. Bunlar araç ile gerçekleştirilen farklı malzeme denemeleri, farklı araç başlıkları geliştirilmesi ve denenmesi ile araç başlığının hareketine bağlı denemelerdir. Denemelere başlamadan önce, hibrit araç ve malzeme hazır hale getirilir. Hibrit aracın ekstrüzyon esnasında verimli işleyebilmesi için öncelikle mekanik ve hareketli bileşenlerinden olan vida-disk bileşeni ve araç başlığı yağlanır (Şekil 3.9). Sonrasında, araç bileşenlerinin bir yüzey üzerine sabitlenmesi işlemine geçilir. Öncelikle motor sabitlenir ve motorun elektrik bağlantısı yapılır. Daha sonra esnek kaplin bir alyan yardımıyla motora bağlanır. Motorun dönme kuvvetini aktarmaya yarayan kaplin, hazne içerisine yerleştirilmiş vidaya bağlanır. Malzeme, hazneye uygun olarak el ile yoğurularak şekillendirilir. Bu esnada malzeme, basım işlemi kolaylaştırmak için kısmi olarak yumuşatılmış olur. Hazırlanan malzeme hazne içerisine yerleştirildikten sonra araç başlığı takılır. Aracın, vida-disk bileşeni ile birlikte dönmesini engellemek için araç bir levha üzerine vidalanarak sabitlenir. Araç, sabitlendikten sonra dikey veya yatay olarak kullanılabilir. Bu aşamadan sonra aracın elektrik bağlantısı da yapılarak ekstrüzyon işlemine geçilir.

Aracın vida-disk bileşeni saat ve saatin tersi yönde döndürülebilmektedir. Vidanın saatin tersi yönünde döndürülmesi malzemeyi kalıptan itmeye yararken, saat yönünde döndürülmesi disk bileşenini geri çekerek hazneye dolum yapılmasını veya sıkışan havanın boşaltılmasını sağlar. Mekanizma akım kontrollü olarak çalıştırıldığından dolayı vidanın dönme yönü pozitif ve negatif kutupların değiştirilmesi ile bir yönden diğer yöne çevrilebilmektedir. Malzeme denemelerinde polimer kil, oyun hamuru ve hava ile kuruyan kil kullanılmıştır.



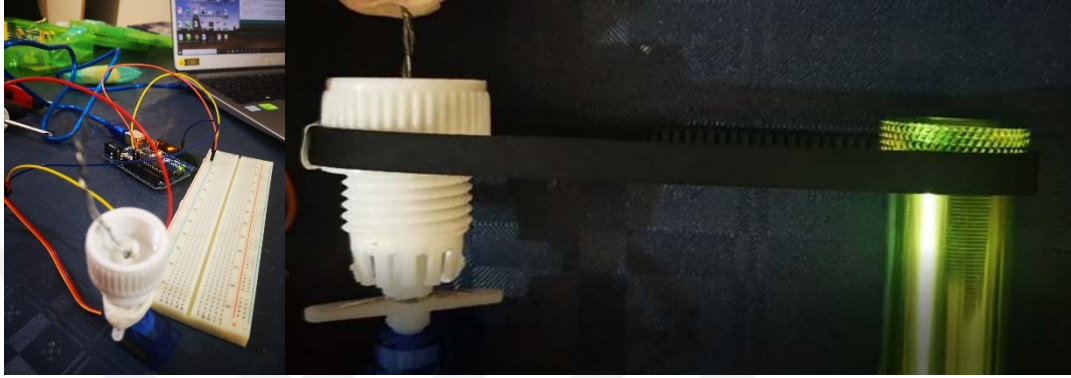
Şekil 3.9: YEA'nın kurulum adımları.

Kalıp ve araç başlığı denemelerine geçmeden önce farklı plastik malzemelerden kalıp başlıkları geliştirilmiştir. Plastik malzeme ile kesici aletler veya lehim makinesi kullanılarak farklı kalıp açıklıkları oluşturulabilmektedir. Ayrıca, mevcut kalıplar da bu başlıklara monte edilebilmektedir (Şekil 3.10). Bu aşamada kalıp serbest olduğundan el ile de döndürülebilmektedir. Ekstrüzyon esnasında, motor ile eş zamanlı insan müdahalesi gerçekleştiğinden hibrit kontrol söz konusudur. El ve motor koordinasyonu ile gerçekleşen presleme ve başlık döndürme işlemleri ile eş zamanlı kural setleri uygulanmış olur.



Şekil 3.10 : El ile üretilen farklı başlık ve kalıplar.

Eş zamanlı olarak yapım kurallarının uygulanabilmesi için geliştirilen ikinci senaryoda ise hem vida-disk bileşeni hem de araç başlığı bir motor aracılığıyla döndürülmektedir. Bu aşama için özel bir kasnak, mil ve kayıştan oluşan yeni bir bileşen geliştirilmiştir. Bu bileşen için kasnak ve kayış dişlerinin birbirine uygun aralıklara sahip olması gerekmektedir. Kasnak ve servo motor bağlantısı mil aracılığıyla yapılır. Kayış, araç başlığı ve kasnağın birlikte ve aynı yönde hareket etmesini sağlar (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Araç başlığını döndürme işlemi için geliştirilen kasnak-mil bileşeni.

Bu bileşenler birbirine bağlandıktan sonra, Arduino bileşenlerinden olan *breadboard* üzerinden servo motorun akım ve topraklama bağlantısı gerçekleştirilir. Motor dönüş sayıları üzerinden tanımlanan kod aracılığıyla araç başlığı saat ve saatin tersi yönünde kontrollü şekilde hareket eder. YEA ile yapılan denemeler aracın kurulum düzeneğinin potansiyellerinin ve kısıtlarının keşfedilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu denemeler sonucunda araç kurulumu tamamlanarak değerlendirme aşamasına geçilmiştir.

3.3 Ön Değerlendirme

Geliştirilen yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracı (YEA), mevcut ekstrüzyon aracı ile, işlem süreci ve üretilen biçimler açısından kıyaslanarak bu aracın dijital zanaat ve üretici kültüründe yaratacağı olası etkiler incelenmiştir. Değerlendirme aşamasında bu iki araçla, seçilen kalıplar ve kurallar ile üretilen biçimler fotogrametri ve yazılan görsel kod aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda, her iki araçla da gerçekleştirilen üretimlerin tekrarlanabilirliği ile doğruluk ve üretim süresi gibi parametrelere dayanarak aracın yeniden-yapılandırılma derecesi, prototipleme ve kurulum sürümleri açısından sonuçlara ulaşılmıştır.

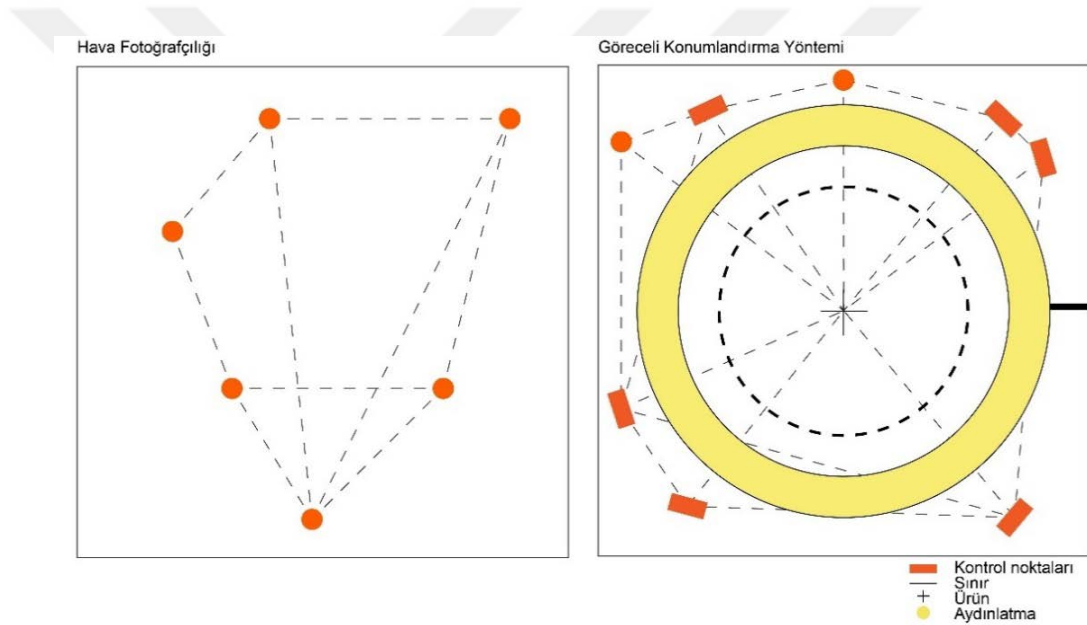
3.3.1 Değerlendirme yöntemi

Doğruluk kontrolü; yüzey sapması, biçim eğilme açısı ve biçimin orta aksından sapma miktarı ölçümleri ile yapılmıştır. Mekanizmanın manuel ve hibrit kullanımı arasındaki farkları belirlemek için ekstrüzyon süresi ve iş gücü açısından kıyaslamalar yapılmıştır.

Üretilen biçimlerin değerlendirilmesi için fiziksel üretimlerin dijitale aktarılması ve analiz edilmesinde sıklıkla faydalanılan fotogrametri yöntemi kullanılmıştır (Culver ve diğ., 2016; Engholt & Pigram, 2019; Tessmann & Mehdizadeh, 2019; Yang ve diğ., 2019). Bu yöntem, fiziksel olarak üretilen biçimlerin 360° etrafında dönerek belirli açılarda fotoğraflanması ve bu fotoğraflardan 3B bir modelinin elde edilmesine dayanır. Çekilen fotoğraflar ilk aşamada 3DF Zephyr programı aracılığıyla birleştirilerek hem *mesh* tabanlı 3B ham (raw) bir model hem de fiziksel nesnenin yüzey dokusunu içeren 3B bir görsel (*render*) elde etmek amaçlanmıştır. Fotogrametri yönteminde ilk olarak 3DF Zephyr programının ücretsiz versiyonu kullanılmıştır. Bu ölçekte yani prototip aşamasında üretilen, simetrik ve yüzeydeki detayların fazla olduğu fiziksel nesnelerin dijital modelinin üretilmesinde sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunların, ücretsiz yazılımın kısıtlı arayüzü, fotoğraf makinesinin özellikleri, ortam ışık değerleri, üretilen biçimin geometrik özellikleri ve boyutu, yüzeydeki girinti ve çıkıntılarının oranı ve boyutu gibi nedenlere bağlı olduğu tespit edilmiştir. 3DF Zephyr Free programı, 50 veya daha az fotoğrafın işlenmesine izin verdiği için üretilen biçimin 7° ve 9° aralığındaki açılarda fotoğrafları çekilebilmiştir. Aynı zamanda, bu yazılım ile *Dense Mesh Model*'i üretilmemekte, dolayısıyla yüzey detayları yeterince gösterilememektedir. Görüntü işleme aşamasındaki standart (default) ayarlar ile, sonrasındaki *mesh smooth* ayarlarına da erişim kısıtlıdır. Üretilen nesnelerin beyaz olması sebebiyle, nesneyi aydınlatan ışığın fazla veya az olması fotoğraflarda yüksek kontrasta neden olmuştur. Yine nesnelerin 24 mm gibi küçük denilebilecek boyutta olması kamera özelliklerinde makro çekim özelliğinin bulunmasını gerektirmektedir. Yüksek kontrastlı ve bulanık fotoğraflar yazılım tarafından algılanamamaktadır.

3B model üretmede karşılaşılan sorunlar sonucu donanımsal eksikliklerin giderilerek özel çekim düzeneği ve fotogrametri uygulama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, çekim düzeneğine yerleştirilen nesnenin topografik görüntü işleme programı tarafından algılanabilmesi için etrafına farklı boyutta, biçimlerde ve konumda başka nesneler yerleştirilmiştir. Hava fotoğrafçılığında kullanılan yöntemlere dayanarak

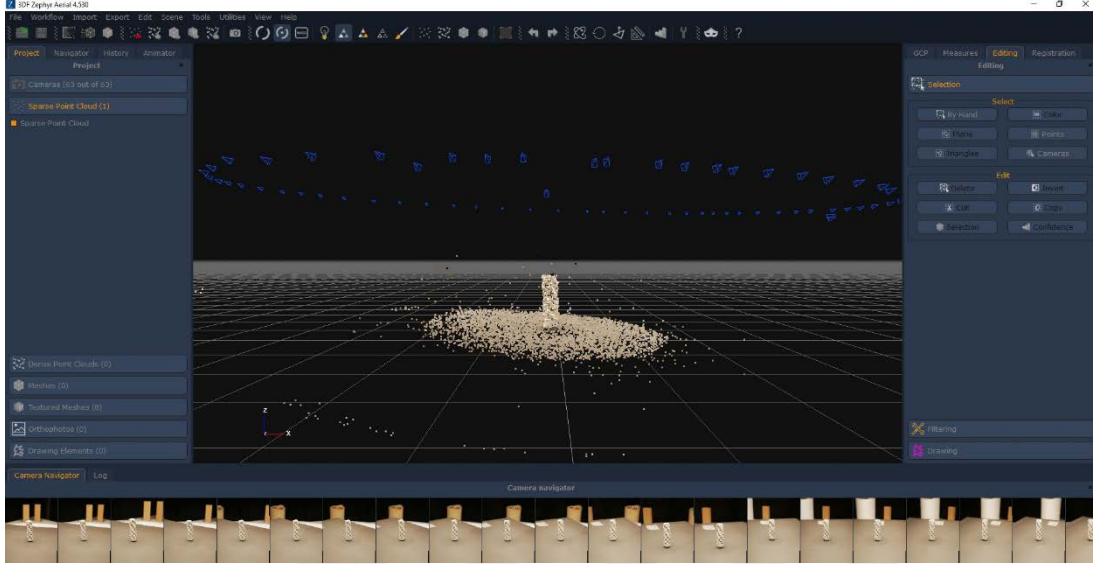
geliştirilen ve üretilen biçimlere göre uyarlanan Göreceli Konumlandırma Yöntemi'nde (*Relative Positioning Method*) nesnenin yazılım tarafından konumlandırılmasına yardımcı olmak için nesnenin etrafında kontrol noktaları oluşturulmuştur (Şekil 3.12). Kontrol noktaları, çekim zemininde önceden belirlenen ve birbirlerine göre göreceli olarak konumlandırılmış noktalardır. Çekilen fotoğraflar, bu kontrol noktaları sınır kabul edilerek analiz edilir. Bu yüzden noktalar, fotoğraf üzerinde kolaylıkla ayırt edilebilecek şekilde belirlenmelidir. Bir fotoğrafta biçimin üzerindeki değişkenlere bağlı olarak minimum 3 veya 4 kontrol noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen fotoğraflama yönteminde kontrol noktalarının oluşturulması, hava fotoğrafçılığında olduğu gibi; ölçeğe, fotoğraf makinesinin kontrolüne ve haritalama yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 3.12 : Göreceli Konumlandırma Yöntemine göre oluşturulan ölçüm düzeneği.

Geliştirilen yönteme paralel olarak, hava fotoğraflarının işlenerek 3B model üretilmesinde kullanılan bir başka görüntü işleme yazılımı olan 3DF Zephyr Aerial'den yararlanılmıştır (Şekil 3.13). Donanımsal eksiklikler de giderilerek; makro çekime sahip kamera, tüm cisim homojen olarak aydınlatmaya yarayan ışık kaynağı ve bu ışığın cismin üzerinde konumlandırılmasına yarayan aparat kullanılmıştır. Özellikle, simetrik ve dönme fonksiyonu kullanılarak üretilen biçimlerde bu düzenek de yeterli olmamış ve bu biçimlerin keskin kenarları farklı renklerde kalemlerle boyanarak görüntü işleme programının farklı renkleri algılama özelliği yardımıyla bu biçimler de başarılı şekilde işlenmiştir. Net ve tüm detayları gösteren 1° ve altında açılarda çekilen 300 ila 400 fotoğraf, 3DF Zephyr Aerial programında 5 aşamalı olarak

işlenmiştir. Bir önceki görüntü işleme sürecinde olduğu gibi, çekilen fotoğrafların kalibrasyonu program tarafından yapılır ve göreceli olarak konumlandırılan çevre nesnelerin yardımıyla fotoğraflar işlenir. Bu aşamada eğer biçimin bazı noktalarını gören kamera açılarının eksikliği fark edilirse sürece en baştan başlanır.



Şekil 3.13 : 3DF Zephyr Aerial yazılımı ile dijital model oluşturma.

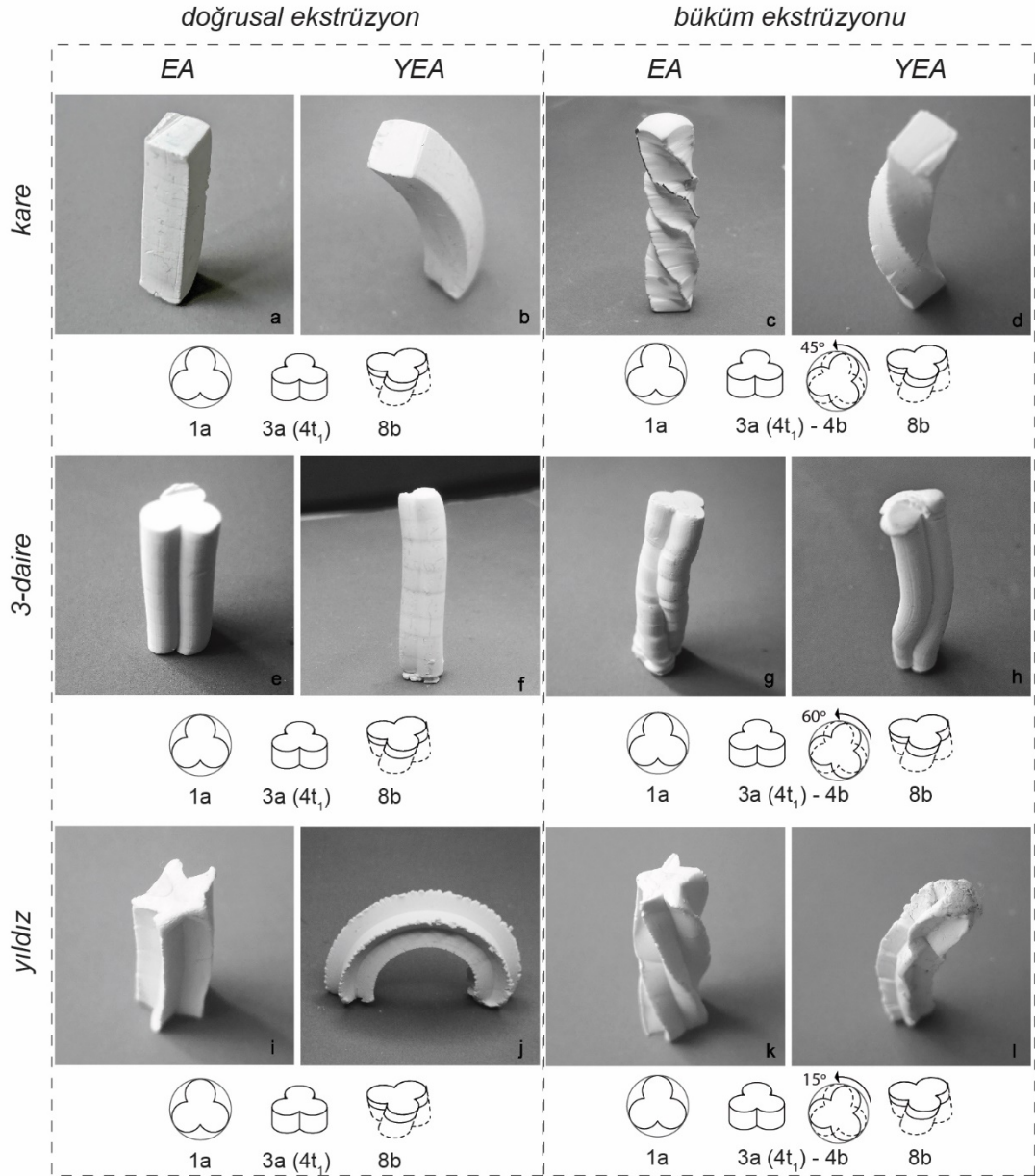
Görüntü tanılama işlemi başarılı olursa bir sonraki aşamaya geçilerek Seyrek Nokta Bulutu üretilir. Yüksek detayda biçim üretmek için, *Yoğun Nokta Bulutu* oluşturulur ve ardından mesh modeli üretilir. Modelde, biçimin konumlandırıldığı yüzey ve etraftaki objeler de bulunur. Bunlar, *editing* araçları ile seçilerek temizlenir. Eğer yüzeyde *naked surface* var ise, *tools>mesh filters>fill holes* komutu ile bu açık yüzeyler kapatılır. Son aşamada, 3B model *render* edilerek yüzey *texture map*'i de elde edilebilir. Elde edilen dijital modelin kalitesi *texture map*'ten anlaşıldığı üzere oldukça detaylıdır.

3.3.2 Üretilen biçimlerin değerlendirilmesi

Öncül deneyleri takiben belirlenen kalıp kesitleri ile manuel araç kullanılarak sistematik denemeler gerçekleştirilmiştir. YEA kullanılarak üretilen biçimlere etki eden parametreler, kalıp kesiti, araç başlığının dönüş açısı ve yönü, malzemenin sertliği, kesici biçimi, kesme yönü ve kılavuz biçimidir.

Bu yöntem ile ilk aşamada; kare, 3-daire ve yıldız kalıp kullanılarak ve polimer kil ile manuel ve hibrit araç ile üretilmiş 24 mm yüksekliğindeki 12 çeşit numune, karşılaştırılarak doğruluk açısından analiz edilmiştir. Bu numunelerin üretiminde seri

ve eş zamanlı olarak uygulanan doğrusal ekstrüzyon ve sürekli döndürme işlemlerini içeren kural setlerinden faydalanılmıştır. EA ve doğrusal ekstrüzyon kural seti ile üretilen biçimler (a, e ve i), YEA ile üretilen biçimler (b, f ve j) Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Yine aynı şekilde, EA ve sürekli döndürme kural seti ile üretilen biçimler (c, g ve k) ile YEA ile üretilen biçimler (d, h ve l) aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Manuel ve hibrit araç ile üretilen biçimler.

Fotogrametri ile oluşturulan *mesh* tabanlı model Rhinoceros'a aktarılarak Grasshopper'da yazılan bir kod aracılığıyla EA ve YEA ile üretilen ve seçilen biçimler birbirleriyle karşılaştırılmıştır (EK-A). Karşılaştırma ölçütleri; kalıp biçimi, üretim

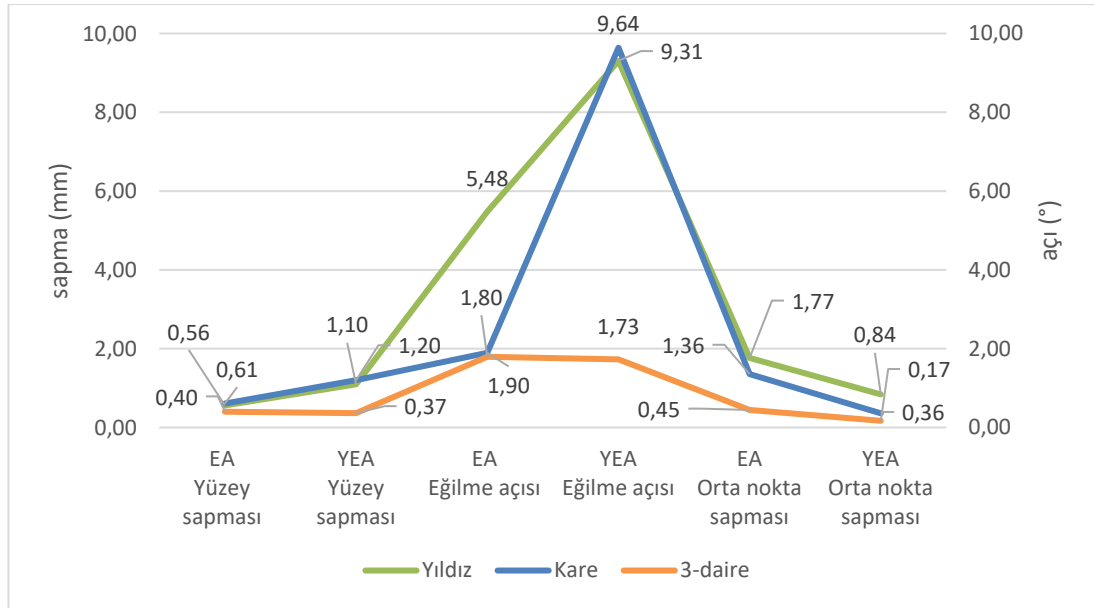
süresi, var ise araç başlığı dönüş açısı, üretilen biçimin yüzey sapması, biçim eğilme açısı ve orta nokta-eksen kayma miktarıdır.

3.3.2.1 Üretim sürelerinin karşılaştırılması

Bu iki araçla yapılan denemelerin değerlendirilmesi sonucu elde edilen verilere dayanarak YEA ile yapılan üretimlerin EA ile yapılan üretimlerden daha hızlı şekilde gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir. Üretim süreleri arasındaki oran, farklı kalıp biçimlerine ve açıklıklarına göre değişse de yaklaşık olarak 2 kattır. Araç başlığını döndürme ve malzemeyi presleme işleminin aynı anda gerçekleştiği sürekli döndürme kural setinin uygulanması esnasında malzeme sıkışması yaşanabileceğinden ek biçimlendirme işlemlerinin üretim süresini arttırdığı gözlemlenmiştir. EA ile üretimde bu 2 saniye gibi küçük bir artışa sebep olurken, YEA ile üretimde dönme esnasında malzeme sıkışırsa motorun durdurularak el ile müdahale edilmesi gerektiğinden üretimde el ile yapıma göre daha fazla gecikme yaşanmaktadır.

3.3.2.2 Kalıpların karşılaştırılması

Kalıp açıklıkları açısından büyükten küçüğe sıralama yaptığımızda en büyük açıklığa sahip kalıp 3-daire, en küçük kalıp ise yıldızdır. Açıklık miktarı ile birim zamanda basılan malzeme arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Dolayısıyla, en büyük açıklığa sahip beşgen ve 3-daire kalıp ile aynı yüksekliğe sahip biçimi üretmek için gerekli süre daha fazladır. El veya motor ile gerçekleştirilen üretimde kalıp açıklıklarının farklılaşması, presleme mekanizmasının vidalı olmasından dolayı bir farklılık yaratmamaktadır. Ancak, daha büyük ölçekli biçimlerin üretilmesinde ve doğrusal preslemeye sahip mekanizmalarda motorların kullanılması, malzemeye daha fazla güç uygulamaya izin verdiğinden daha avantajlıdır. YEA’da motor dönüş sayılarının bilinmesi ile birlikte birim zamanda basılan malzeme yüksekliği ölçümlenebilmiştir. Bu yükseklik; kare kalıpta 3 mm, 3-daire kalıpta 2,22 mm, yıldız kalıpta 3,6 mm olarak hesaplanmıştır.



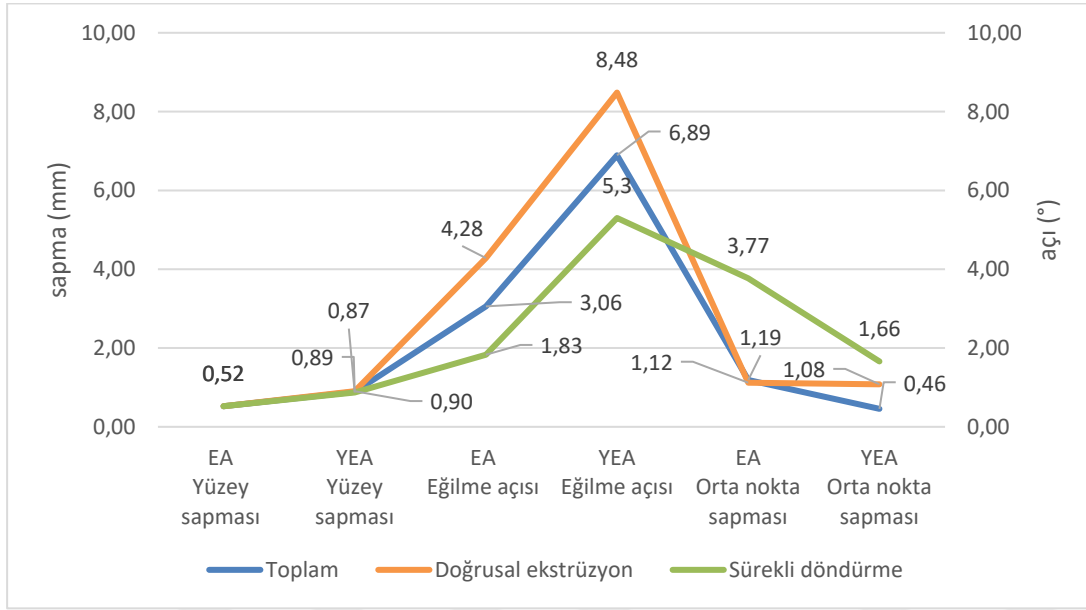
Şekil 3.15 : Kalıpların karşılaştırılması.

Şekil 3.15'e göre, kalıp biçimleri açısından sapma değerleri karşılaştırıldığında, yıldız ve kare gibi 90° ve daha az iç açılara sahip çokgen kalıplarda, YEA ile gerçekleştirilen ve doğrusal ekstrüzyon ile üretilmiş biçimlerde yüzey sapma değeri yaklaşık 2 kat oranında artmaktadır. Ancak, 3-daire kalıp gibi yuvarlak sınırlara sahip kalıplarda ise EA ve YEA arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Aynı şekilde eğilme açısı değerleri, yıldız ve kare kalıplarla ve YEA ile gerçekleştirildiğinde uygulanan kural setinden bağımsız olarak EA ile üretilen biçimlere kıyasla 2 kat oranında artmaktadır. Ancak, 3-daire kalıp ve YEA ile gerçekleştirilen üretimler EA ile gerçekleştirilen üretimlere göre 2 kat daha az biçim eğilmesine sahiptir. Üretilen biçimin tasarlanan biçimin ana eksenine göre ne kadar hata payı ile üretildiğine baktığımızda, YEA'nın tüm kalıp biçimleri için EA'ya göre daha az sapma gösterdiğini görmekteyiz. Bu oran, kare ve yıldız kalıplarda belirgin olmamakla birlikte yine 3-daire kalıpta 12,5 kat oranında daha doğru bir biçim üretildiğini göstermektedir. Eksen kayması, YEA'da görece az olarak ölçülmüştür. Ancak bu oran, ekstrüze edilen biçim yüksekliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

3.3.2.3 Kural setlerinin karşılaştırılması

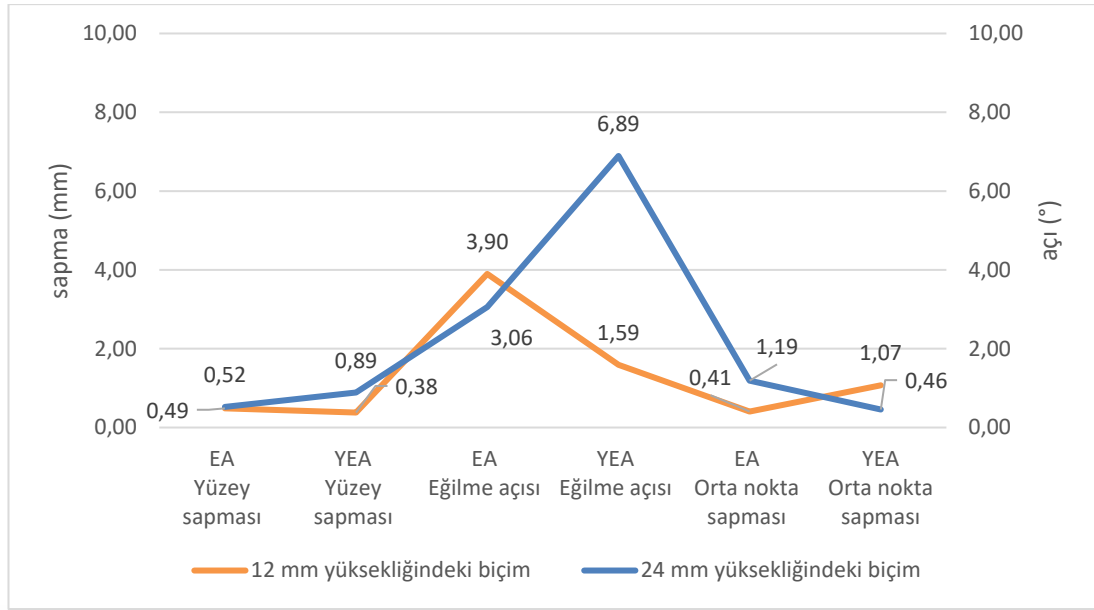
Biçime uygulanan araç başlığının döndürülmesi gibi ek biçimlendirme işlemlerinin yüzey sapması, biçim eğilme açısı ve orta nokta sapması gibi değerleri belirgin şekilde etkilemediği belirlenmiştir (Şekil 3.16). Sürekli döndürme kural setinin uygulanması sonucu oluşan biçimlerde açısal sapma değerleri hesaplandığında ise, kare kalıbın en

yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Sürekli döndürmenin EA ile gerçekleştirildiği senaryoda, başlığın ve presleme mekanizmasının eş zamanlı olarak döndürülmesi gerektiğinden aracın bu kurulumda iki operatöre ihtiyaç vardır. YEA’da ise malzeme sıkışması veya dolumu gibi süreçleri takip etmek için tek bir operatör yeterlidir. Dolayısıyla, YEA, ek biçimlendirme işlemlerinin motor gücü ile kontrolüne imkân verdiği için kullanım açısından daha avantajlıdır.



Şekil 3.16 : Kural setlerinin karşılaştırılması.

Biçimlerin yüksekliğinin sapma değerlerine olan etkisinin araştırılması için 12 mm yüksekliğinde üretilmiş biçimler de aynı ölçütler açısından değerlendirilmiştir (Şekil 3.17). 24 mm yüksekliğindeki biçimlerde, EA’nın toplam yüzey sapma değeri 0,52 mm; YEA’nın ise, 0,89 mm olarak hesaplanmıştır. 12 mm yüksekliğindeki biçimler için EA’nın 0,38 mm ve YEA’nın ise 0,49 mm yüzey sapma değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. YEA’nın haptik duyu eksikliğine bağlı olarak görece kısa biçimler üretmede daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.17 : İki farklı yükseklikteki biçimlerin karşılaştırılması.

Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17' ye göre elde edilen sonuçlar üzerinden YEA'nın potansiyelleri ve kısıtları bir sonraki bölümde tartışılacaktır.

3.3.3 YEA'nın potansiyelleri ve kısıtları

Geliştirilen yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracının hem manuel hem de hibrit kullanımı, prototiplemede kullanılan eklemeli fabrikasyon yöntemlerinden olan 3B yazıcı ile kıyaslanmıştır. Aracın 3B yazıcı ile kıyaslanmasının nedeni, aracın prototipleme aşamasında kullanılmaya uygunluğunun araştırılmasıdır. Değerlendirme ölçütleri doğruluk, birim zamanda üretilen biçim sayısı, çeşitlilik, üretilen biçimin boyutu ve maliyet olarak belirlenmiştir. Aracın yapılandırma derecesi, Koren (2006)'dan uyarlanan modülerlik, özelleştirilebilme, ölçeklenebilme, bütünleştirilebilme, değiştirilebilme, teşhis edilebilme ölçütleri doğrultusunda belirlenmiştir. Koren'in (2006) önerdiği bu ölçütlere ek olarak, YEA'nın sahip olduğu farklı malzemeler kullanabilme ve hibrit kontrole sahip olma ölçütleri de seçilen aracın tasarımcının müdahalesine açık olma özelliğini belirlemek için mevcut ölçütlere eklenmiştir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Araç kurulumlarının 3B yazıcı ile kıyaslanması. (*2020 yılının birim fiyatları esas alınarak hesaplanmıştır.)

Kontrol türü	EA (Manuel)	YEA (Hibrit)	3B yazıcı (Standart)
Doğruluk (24mm)	± 0,52 mm	± 0,89 mm	±0.5 mm (FDM)
Doğruluk (12mm)	± 0,49 mm	± 0,38 mm	-
Hassasiyet	Düşük	Orta	Yüksek
Birim zamanda üretilen biçim	Düşük	Orta/Yüksek	Düşük
Biçimsel çeşitlilik	Orta/Yüksek	Orta	Yüksek
Üretilen birimin maksimum boyutu	6x6x140 mm	6x6x140 mm	200x200x200 mm
Maliyet*	65 TL	1206 TL	2000 TL
Modülerlik	+	+	-
Özelleştirilebilme	-	+	-
Bütünleştirilebilme	-	+	-
Değiştirilebilme	+	+	-
Teşhis edilebilme	-	N/A	+
Ölçeklenebilme	-	N/A	-
Farklı malzemeler	+	+	-
Hibrit kontrol	-	+	-

3.3.3.1 Aracın yeniden-yapılandırılma derecesi

Aracın yeniden yapılandırılma derecesi, Koren (2006) tarafından ortaya koyulan ölçütler üzerinden tanımlanmıştır. Bunlar, özelleştirilebilme, modülerlik, bütünleştirilebilme, dönüştürülebilme, ölçeklenebilme ve teşhis edilebilmedir. Bunlara ek olarak tasarım ve yapım açısından aracın esneklik derecesinin tanımlanması için farklı malzemeler kullanabilme ve kontrol sistemini özelleştirebilme ölçütleri dahil edilmiştir. Yeniden-yapılandırılabilir araçlardaki özelleştirme kavramı belirli bir biçim ailesinin üretilmesi anlamındadır. 3B yazıcı kendi üretim sınırları dahilindeki herhangi bir biçimi basabilirken YEA, farklı yüzey örüntülerine sahip ekstrüze biçimleri üretebilmektedir. Bu durum, özelleşmiş esneklik olarak tanımlanır. Özelleştirilebilme açısından hem manuel hem de hibrit kullanıma imkân veren araç, değiştirilebilen ve yeniden eklenebilen kalıp bileşenleri, hazne boyutunun yeniden boyutlandırılabilmesi, araç başlığının hareket edebilmesi gibi

açılardan 3B yazıcıya göre avantajlıdır. Bu özelleştirilebilme durumu, aracın bileşenlerinin modüler olmasından kaynaklanır. Modüler olma, aracın veya sistemin ana bileşenlerinin değiştirilebilir veya yükseltilebilir olması şeklinde tanımlanır. Bu sayede, aracın kısmi bakımı ve geliştirilmesi, tüm bir sistemi değiştirmeden yapılabilir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu, manuel aracın kalıp biçimine ve miktarına bağlı olan modülerlik derecesinin, kalıp kombinasyonları, ek kalıp tasarımı ve bileşen hareketleri ile genişletilebileceği belirlenmiştir. Tasarımcının 3B yazıcıya müdahalesi sınırlı olabilmektedir. Bütünleştirilebilir olma, yeniden-yapılandırılabilir sistem tasarımı desteklemek için gerekli yapılandırma ve entegrasyon kurallarının varlığıyla ölçülür. Bunun için manuel aracın hem mevcut hem keşfedilen biçim üretme olanakları için başka sistemlerle bütünleştirilebilecek dijital bir model geliştirilmiştir. 3B yazıcının ise simülasyon arayüzü tek bir fonksiyon için tasarlanmıştır. Dönüştürülebilir olma, araçların ek bileşenler ile çözüm kümesinin genişletilebilmesidir. Örneğin, araç haznesi yeniden üretilerek aracın tek seferde daha uzun biçimler üretmesi sağlanabilir. Aynı zamanda motor kapasitesi de arttırılarak daha kısa sürede daha çok biçim üretilebilir. Ayrıca, araç hem dikeyde hem de yatayda sabitlenerek üretim yapabilir, kılavuz ve kesici mekanizmaları da eklenerek araç bileşen-fonksiyon ilişkileri geliştirilebilir. Ölçeklenebilme ADAPA'da (URL-5) olduğu gibi birden fazla biçim üretmek için çoklu araç kullanımdan oluşan bir sistem tasarımı olarak düşünülebilir. YEA'nın bu tez kapsamındaki üretim ölçeği için bu ölçüt kapsam dışı bırakılmıştır. Teşhis edilebilme (diagnosability) araçtaki arızaları tespit etme ve ürünlerdeki kalitenin kontrol edilmesini kapsar. YEA'nın bu tez kapsamındaki kontrolü manuel olarak sağlandığı için sensörlerin eklenmesi ile hata tespit kapasitesi ileriki versiyonlarda geliştirilebilir olarak kabul edilmiştir.

Tasarım ve yapım esnekliği açısından baktığımızda aracın, hava ile kuruyan kil, polimer kil, oyun hamuru ve balmumu gibi farklı malzeme kullanımlarına izin vermesi ve araç bileşenlerinin değiştirilip geliştirilebilmesi yani aracın deneysel olarak kullanılabilmesi yaparak öğrenme açısından avantajlıdır. Aracın hibrit kullanımı, el ile yapma ve keşif süreçlerini de desteklediğinden zanaata özgü tasarlama, yapma, dönüştürme ve onarım gibi süreçlerin de tasarımcının içinde yer almasını sağlar. Tüm bu yapım sürecinde tasarımcı malzeme, araç ve yapım sürecine ait parametreleri açık bir şekilde tanımlayarak manipüle edebilmektedir. Bu sayede, tasarımcı yapımdaki girdi, süreç ve çıktı ilişkilerini anlama ve keşfetme imkânı bulmaktadır.

3.3.3.2 Aracın prototipleme açısından değerlendirilmesi

EA, YEA ve 3B yazıcı karşılaştırılarak elde edilen verilere göre bu araçların prototipleme açısından kullanımına yönelik sonuçlara ulaşılmıştır. YEA’da presleme ve başlık motorize edildiği için aynı biçimi tekrar üretmek mümkündür, dolayısıyla YEA, EA’ya göre orta hassasiyete sahiptir. Biçim eğilme açısının biçimin yüksekliği ile olan ilişkisinin belirlenmesi için numunelerin yarı yüksekliği için de aynı ölçüm tekrarlanmıştır. Bunun sonucunda YEA’nın kısa biçimler üretmede EA’ya göre yaklaşık 2,5 kat daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğu belirlenmiştir.

Fabrikasyon araçlarıyla birlikte veya onlara alternatif olacak şekilde çalışabilecek YEA’yı analiz etmek için hesaplanan toplam hata oranlarını kapsayan yüzey sapma değeri, 3B yazıcı ile karşılaştırılmıştır. Fabrikasyon laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan FDM tipi bir yazıcının doğruluk değeri 0,5 mm’dir. Bu doğruluk değerinin üretilen biçimin boyutuna bağlı olarak ne kadar değiştiği bilinmemekle birlikte, YEA’nın bu yükseklikteki biçimler için doğruluk oranı 3B yazıcıya göre düşük bulunmuştur. Bir diğer yaklaşım ise, tersine mühendislik yoluyla bu sapma değerlerinin dijital arayüze aktararak tasarım öncesinde dijital modelin bir simülasyon aracı olarak kullanılabilmesini sağlamaktır. Üretilen birim boyutu, seçilen aracın 6x6 mm olan kalıp açıklığı ve 140 mm olan hazne boyutuna bağlıdır. Standart bir 3B yazıcı ile kıyaslandığında YEA ile görece küçük ölçekli biçimler üretilmektedir. Ancak, maliyet açısından baktığımızda 3B yazıcılara göre düşük bütçeli olarak satın alınabilmekte ve geliştirilebilmektedir.

Bu sapma değerlerinin nedenleri arasında, yerçekimi, malzeme, eş zamanlı kural setlerinin uygulanması esnasında karşılaşılan zamanlama problemi sayılabilir. Deneyler göz önüne alındığında, yerçekiminden dolayı malzeme kalıptan çıkarken uygulanan kuvvetin de etkisiyle belli bir şişme oranına sahiptir. Biçim eğilmesi ise özellikle yüksekliği en kesitine göre fazla olan biçimlerin üretiminde karşılaşılan bir hatadır. Bu sapma değerleri göz önüne alınarak çeşitli kılavuzlar aracılığıyla aracın ileriki versiyonlarında bu eğilme durumu engellenebilir. Bir diğer sorun ise, araç başlığı döndürülürken basılan malzemenin vida adımları arasına sıkışmasıdır. Araç başlığındaki vida adım sayısının az olması da araç başlığının dönüş tur sayısını sınırlandırmaktadır. Tüm bu sorunlar, araç başlığının dönme işlemi için geliştirilmesi ve kılavuzlar yardımıyla ekstrüze edilen biçimin eğilmesinin engellenmesi yoluyla

azaltılabilir. Yapım gramerine bağı kural setlerinin uygulanması esnasında elde edilen beklenmedik biçimlerin tasarım sürecinin kendisine entegre edilmesi de mümkündür.

3.3.3.3 Aracın kurulum sürümlerinin değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında geliştirilen YEA, motor üzerinden ve akım değişimi yardımıyla kontrol edebilen bir prototiptir. Literatürdeki yeniden-yapılandırılabilir araçlar sınıflandırmasında, bileşen tabanlı araçlar başlığı altında değerlendirilir. Bu tür araçlar, kalıp bileşenlerinin hareketli miller ya da dişliler vasıtasıyla kontrol edilmesine dayanır. Bu sayede, geliştirilen prototipte olduğu gibi yapım sürecinin bileşenlerine bağı farklı yapılandırmalarla farklı biçimler elde edilebilir. Bu yapılandırmalar, farklı üretim senaryoları olarak düşünülebilir.

Yeniden-yapılandırılabilir aracın, atölyede el ile serbest ve el ile kurallı, hibrit olmak üzere üç kullanım sürümü vardır. Bunlardan ilki, bu aracın yeniden-yapılandırılmamış yani rijit halidir (EA) ve bu araç el ile serbest biçimde tekil biçimler elde etmek için kullanılır. Bu kullanımda araç tek fonksiyonludur, el ile malzemenin doğrudan şekillendirilmesine kıyasla kısıtlı biçimler elde edilir. Bu biçimler değiştirilebilen kalıplar aracılığıyla kısmen kontrol edilir. El ile serbest olarak kullanılan bu araç, deneysel sürecin sonunda mevcut kullanımı dışına çıkarılarak yeni bileşen-fonksiyon ilişkilerine sahip olabilir. Yapım sürecinin çözümlenmesi, keşfedilmesi ve dijitalleştirilmesi yoluyla yeniden-yapılandırılabilir ekstrüzyon aracı (YEA) geliştirilir. YEA, manuel, hibrit veya dijital olarak kullanılabilir.

İkinci kurulum sürümünde ise YEA deneysel ve keşif amaçlı kullanılabilir. Bir önceki sürüme göre bu araçla üretilebilecek biçimsel çeşitlilik araç bileşenlerinin kombine edilmesi, hareketli hale getirilmesi ve değiştirilmesi sayesinde arttırılmıştır. YEA, yapım sürecinden türetilen gramer aracılığıyla kontrol edilir. Dolayısıyla, elin de belirli açılar, tur sayıları ve sürelerle bağı olarak eğitilmesiyle yapım üzerindeki kontrol arttırılmıştır. Bu kural tabanlı yaklaşım ile biçimsel çeşitlilik ölçülebilir bir doğruluk aralığında ve tekrarlı bir biçimde gerçekleştirilir. YEA'nın üçüncü kullanımı ise, seçilen bir biçimi tekrarlı bir biçimde ve çok sayıda üretmek için aracın hibrit hale getirilmesidir. Bu senaryo, zanaatkar veya tasarımcının hızlı ve kontrollü prototipleme yapmasına imkân veren kurulumudur. Bu kurulum, bu tez kapsamında akım kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon süresi, kullanılan motorun devir sayısına, kalıp

açıklığına ve malzemeye bağlı olarak değişmekle birlikte, hibrit araç manuel araca göre daha hızlı olduğundan hibrit araçla daha fazla sayıda biçim üretilebilir.

Bu kurulumda el ile müdahale en aza indiğinden dolayı üretim esnasında dokunsal duyudan (haptik) en az şekilde faydalanılmaktadır. Bu nedenle, deneyler göz önüne alındığında, özellikle keskin kenarlı kalıplarda, üretilen biçimlerde eğilme miktarı oldukça yüksektir. Ayrıca, YEA’da dokunsal duyunun ortadan kalkması ve malzeme sıkışması gibi sebeplerle araç başlığının dönüşünü engellendiğinden, kademeli döndürme gibi farklı kural setlerinin uygulanması oldukça zordur. Her ne kadar hibrit YEA ile birden fazla biçim daha kısa sürede ve tek operatör ile üretilebilse de bu ölçekte, üretilen biçimlerin doğruluğu (accuracy) el ile üretilen biçimlere oldukça yakındır. Tüm bu analizlerin sonucunda, atölyede ve yapım gramerine bağlı ve kurallı olarak kullanılan araç ile kontrol mekanizmasından bağımsız olarak birbirine çok yakın doğruluk değerleriyle biçim üretilebildiği belirlenmiştir. Ayrıca, YEA ile üretilen biçimlerde meydana gelen biçim eğilme açılarının azaltılabilmesi için araç başlığının dönüş açılarının ayarlanarak geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, EK A’da yer alan Çizelge A.1’de görüldüğü üzere, bu ölçekte, manuel araç ve yapım grameri kullanılarak özellikle uzun biçimlerde, daha kontrollü ve biçimsel olarak çeşitli üretim yapılabildiği tespit edilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda aşağıda belirtilmiş olan ekstrüzyona dayalı yapım gramerinin fiziksel ve dijital ortamda manuel araç ile geliştirilmesine karar verilmiştir.

4. DİJİTAL ARAÇ DÖNÜŞÜMÜ: EKSTRÜZYONA DAYALI YAPIM GRAMERİ (EdYG)

Bir önceki bölümde ekstrüzyona dayalı tasarım için mevcut bir araçtan türetilen ve hibrit kullanıma izin veren yeniden-yapılandırılabilir bir araç geliştirilmiş ve dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları ortaya konulmuştur. Yapılan analizler sonucu manuel ve hibrit araçla üretilen biçimler arasında üretim süresi ve kapasitesi dışında doğruluk açısından belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ayrıca, hızlı ekstrüzyon işlemi sonucu gerçekleşen ve haptik duyu eksikliği nedeniyle kontrol edilemeyen biçim bozulma-eğilme değerlerini azaltmak için aracın teknik açıdan geliştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Önerilen sürecin vaka çalışması olarak ele alınan ve prototip aşamasında olan bu aracın mekanik aksamı yerine, tezin bu bölümünde, yapım sürecinin kontrol türünden bağımsız olarak gramere dayalı ve kurallı hale getirilerek fiziksel ve dijital biçim üretiminde kullanılmasına odaklanılmıştır. Bu sayede ekstrüzyon yönteminin yeniden-yapılandırma şemasına ve yapım gramerine bağlı kural setleri yönüyle ele alınması hedeflenmiştir.

Yapım gramerinin işlevliliğini test etmek için fiziksel ortamda üretilen biçimler, ekstrüzyon adımlarını içeren parametrik model ile karşılaştırılarak yapım grameri kuralları ve biçim arasındaki korelasyon ortaya konmuştur. Bu sayede, sezgisel, yani zanaata dayalı üretimin hesaplamalı hale getirilmesinin belirli bir hassasiyette ve doğrulukta biçim üretebilme açısından potansiyelleri ve kısıtları tartışılmıştır. Ayrıca, bu bölümde değerlendirme parametreleri genişletilerek toplam yüzey sapması (total surface displacement), eğilme açısı (bending angle, local curvature), orta nokta sapması (3D-shift) değerlerinin yanı sıra ideal kalıp kesitinin sapması (ideal deviation angle) ve kalıbın dönme hareketine bağlı oluşan biçimlerde ise kesitin açısal sapma değeri (twist torsion) de analiz edilmiştir. Bu değerlendirme ölçütleri, plastik ve metal ekstrüzyon işlemlerinde de yaygın olarak kullanılan doğruluk değerini belirleme ölçütlerinden uyarlanmıştır (Vollertsen ve diğ., 1999).

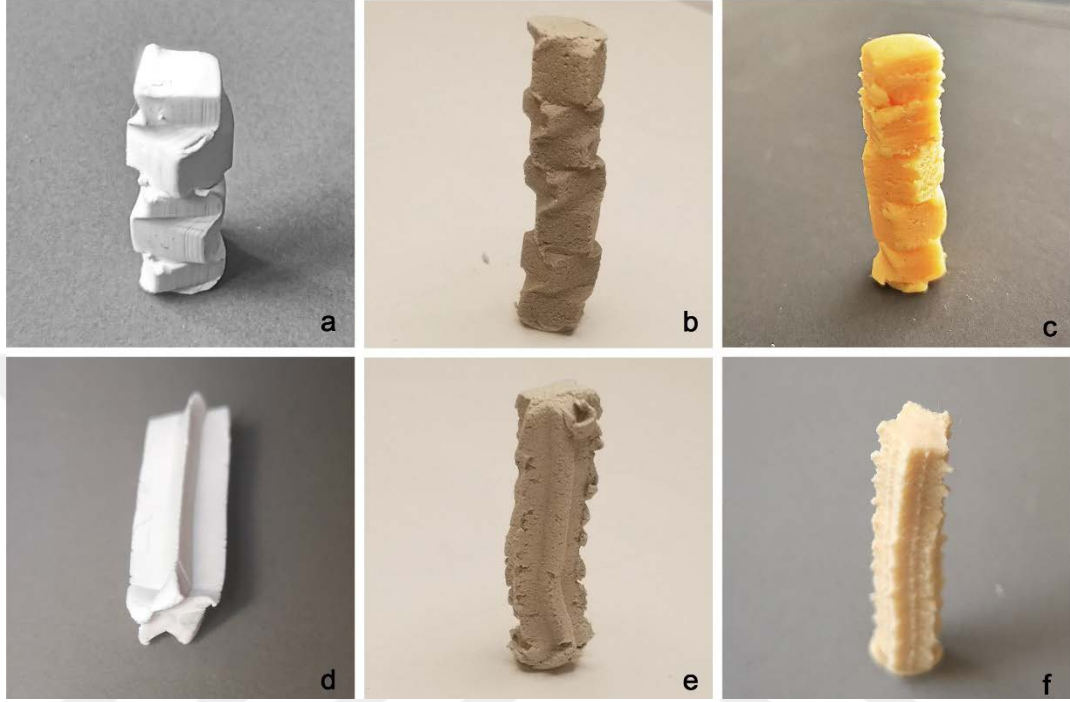
4.1 Ekstrüzyon Aracı ile Fiziksel Denemeler

Manuel araç ile denemelerin yapıldığı bu ön aşamada, rijit aracın çeşitlilik üretebilecek şekilde yapılandırılmasına yönelik araç bileşenleri ve bileşenlerin fonksiyon ilişkileri belirlenmiştir. Bu ilişkiye dayanan parametrelerin biçim üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla aracın her bir bileşenine yönelik özelleşmiş denemeler gerçekleştirilmiş ve gözleme dayalı analizler yapılmıştır. Bu denemeler, malzeme ile araç başlığı-kalıp, presleme mekanizması gibi üretime bağlı araç bileşenleri; kesici ve kılavuz yüzey gibi üretim sonrası ardıl biçimlendirme işlemleri olmak üzere üç alt başlık altında toplanmıştır. Bu denemeler, aracın analiz aşamasında oluşturulan ve aracın konfigürasyonlarını gösteren Şekil 3.8'deki şemaya göre geliştirilmiştir. Bu şema doğrultusunda, yapım grameri oluşturulmuş ve manuel araç ile, farklı kural setleri, kalıplar ve malzemeler kullanılarak biçimler elde edilmiştir. Sonrasında, bu gramer parametrik bir modele dönüştürülerek bir kayıt ve ölçüm aracı olarak kullanılan dijital araç elde edilmiştir. Bu sayede, hem el ile gerçekleştirilen yapım süreci dijital ortama aktarılmış hem de görsel bir gramer olarak ifade edilmiştir. Bu dijital model, fiziksel ortamda üretilen biçimlerin yapım parametrelerine göre analiz edilmesi ve bu biçimlerin dijital ortamda üretilen biçimlerle karşılaştırılması için baz bir model olarak kullanılmıştır.

4.1.1 Malzeme ve biçim ilişkisi

Denemelerin ilk aşamasında girdinin yani malzemenin üretilen biçimler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kullanılan malzemeler macun, farklı özelliklerde oyun hamurları, sert ve yumuşak polimer kil ve hava ile kuruyan kil gibi macun tabanlı malzemelerdir (paste-based materials) (Şekil 4.1). Kare kesitli bir kalıp ile kademeli döndürme kural seti farklı malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılarak yüzeydeki değişimler gözlemlenmiştir (a, b ve c). Polimer kil ve hava ile kuruyan kil ile üretilen biçimlerde döndürme işlemine bağlı olarak köşelerde S biçiminde sürekli çizgiler oluşmuştur (a ve b). Hava ile kuruyan kil daha yumuşak olduğu için S şeklindeki bu devamlı çizgi daha az belirgindir. Oyun hamurunda ise neredeyse hiç gözlemlenmemektedir (c). Yıldız gibi keskin köşeli kalıplar ile gerçekleştirilen denemelerde, görece daha yumuşak olan hava ile kuruyan kil ve oyun hamuru kullanıldığında, ekstrüze edilen kenarlar boyunca malzemenin dağıldığı gözlenmiştir (e ve f). Hava ile kuruyan kilde kuruma esnasında bu bölümler ufalanmıştır (e).

Polimer kilde yüzey, diğer malzemelerle kıyaslandığında daha pürüzsüzdür ve fırınlanmamış halinde dahi biçimini muhafaza etmektedir. Bu sayede, malzeme deneme aşamasında tekrar ve tekrar kullanılabilir. Oyun hamuru ve hava ile kuruyan kilin ise tekrar kullanılması mümkün olmamaktadır.



Şekil 4.1 : Farklı malzemelerdeki yüzey deformasyonları.

Yapılan denemelerde macun ile üretilen biçimlerin mevcut biçimini koruyamadığı, hava ile kuruyan kil ve oyun hamuru ile üretilen biçimlerin ise yüzey detaylarının zamanla kaybolduğu tespit edilmiştir. Oyun hamuru ve hava ile kuruyan kil ile üretilen biçimler açık havada bekletildiğinde nemini kaybederek katılaşmaktadır, polimer kil için ise fırınlama yapılması gerekir. Oyun hamuru kullanılarak yapılan çalışmalarda, malzemenin yumuşak yapısı gereği polimer kile göre daha düşük basınç ile istenilen biçimi elde etmek mümkündür. Ön deneme aşamasında polimer kil ve oyun hamuru birlikte kullanılmış ve üretilen biçimlerin bu malzemelerin özellikleri ile olan ilişkisi gözlemlenmiştir. Ön denemeleri takiben gerçekleştirilen fiziksel üretim, yüzey detaylarını daha iyi gösterdiği ve zamanla bozulmaya uğramadığı için polimer kil ile gerçekleştirilmiştir.

4.1.2 Kalıp-araç başlığı ve biçim ilişkisi

Denemelerin ikinci aşamasında, kalıp-araç başlığı bileşeni incelenmiştir. Araç setinde bulunan kalıplar, ince metal plakalardan kesilmiş içbükey ve dışbükey çokgenlerdir.

Bu denemelerin bir sonucu olarak, rijit kalıp-araç başlığı bileşeninin, mevcut araç kullanımında bulunmayan kalıp kombinasyonları, araç başlığı dönüşü ve kalıp değişimi açısından yeniden yapılandırılabileceği keşfedilmiştir (Şekil 4.2). Bu aşamada, kalıpların birbirinin yerine geçebileceği ve birbiriyle üst üste getirilerek yeni kalıp biçimleri üretilebileceği keşfedilmiştir. Yapım esnasında, seçilen içbükey ve dışbükey kalıplar birleştirilir ve araç başlığına yerleştirilir. Vida adımlarına sahip olan araç başlığı, ekstrüzyon sırasında kalıpları döndürmek için kullanılır. Kalıpların yeniden-yapılandırılabilen üçüncü özelliği ise ekstrüzyon sırasında kalıbın açıklığının alan bazında fazla olması koşuluyla kalıbın değiştirilebilmesidir.



Şekil 4.2 : Kalıp-araç başlığı bileşenine bağlı keşifler.

Denemeler sonucu keşfedilen araç başlığına yönelik işlemleri analiz etmek için bu bileşene yönelik özelleştirilmiş denemeler gerçekleştirilmiştir.

4.1.2.1 Kalıp kombinasyonları

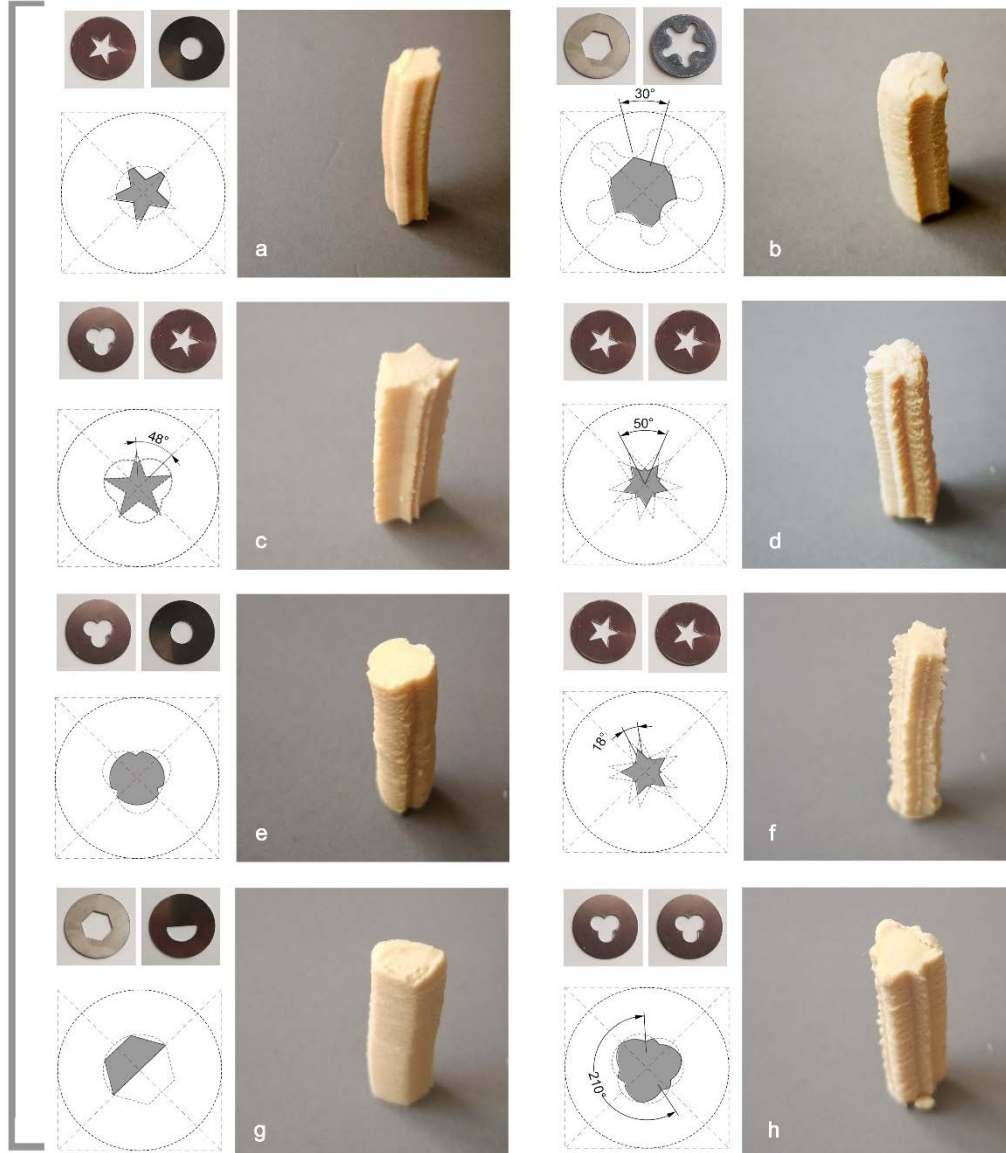
Denemelerin bu aşamasında, yeni kalıp üretimi ve kalıpların kombinasyonları incelenmiştir. Kalıplar el araçları ile de üretilebilen, iki boyutlu kesitlerden oluşmaktadır. Geliştirilen aracın ölçeği gereği, el araçları ile kalıp üretmek zor olacağından kalıplar, 3B yazıcı ile baskı alınmıştır (Şekil 4.3). Farklı pahlı köşelere sahip beşgen şeklinde, farklı kalınlıklarda, farklı açıklıklara sahip ve filament ile üretilen kalıplar ile ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ekstrüzyon esnasında kalıba uygulanan basınç ve kalıp açıklığının mevcut metal kalıplara göre fazla olması sebebiyle, 0,5 mm ve altındaki kalınlığa sahip kalıplar işlem esnasında kırılmıştır. Bu ölçekte ve polimer kil ile yapılan denemeler sonucu kalıp kalınlığının 1 mm'nin üzerinde olması gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 : Tasarlanan ve 3B yazıcı ile üretilen kalıp denemeleri.

Deney aşamasında, yeni üretilen ve mevcut kalıpların kontrollü bir şekilde kombine edilmesi sonucu bir dizi biçim üretilmiştir (Şekil 4.4). Seçilen dışbükey ve içbükey kalıp kombinasyonlarının ekstrüde biçimler üzerindeki etkisini incelemek için bu kalıplar farklı açılarda bir araya getirilmiştir. Yıldızın daire ile kombinasyonu ile, iki kalıbın benzer açıklığa sahip olması sebebiyle yuvarlatılmış köşelere sahip yıldız kesitli ekstrüde edilmiş biçimler üretilmektedir (a). Altıgen ve yuvarlak köşeli beşgen kombinasyonu ile gerçekleştirilen üretimde, beliren (emergent) bir davranış olarak nitelendirilebilecek ekstrüzyon esnasında gerçekleşen kalıp kayması nedeniyle biçimin yalnızca tek yüzeyinde girintiler olduğu görülmektedir (b). 3-daire ve yıldız şeklindeki kalıpların kombinasyonu ile yüzeydeki girinti miktarı artırılmış olur (c). Daire ve yarım daire şeklindeki kalıplar, kalıbın açıklığını azaltarak ekstrüde edilmiş biçimleri küçültmek için kullanışlıdır (e ve g). Farklı açılarda üst üste getirilmiş özdeş kalıpların kombinasyonu sonucu farklı yüzeyler elde edilebilmektedir (d, f ve h). İki yıldız şeklindeki kalıbın 50° ve 18° 'lik açılı kombinasyonu bir dekağram (d ve h) oluşturmaktadır. Bu kombinasyonla üretilmiş biçimler değişken uzunlukta keskin köşelere sahiptir.

Üretim sürecinin aynı şekilde tekrarlanabilmesi için kalıp kombinasyonları görsel bir gramer olarak ifade edilerek Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Simetrik olmayan kalıplar, üretilen biçimi C şeklinde bükerek eğimli ekstrüzyonlar oluşturur (g). Üretilen biçim ne kadar uzun olursa, o kadar fazla eğilme meydana gelir ve bu durum, işlem sırasında el ile düzeltilebilir. Dolayısıyla, işlem sırasında haptik duyunun kullanımı çok önemlidir. Yıldızlar gibi keskin kenarlı çokgenler, 3-daire kalıp gibi yuvarlak köşeli çokgenlere kıyasla üretilen biçimin kenarlarının bozulmasına neden olur.

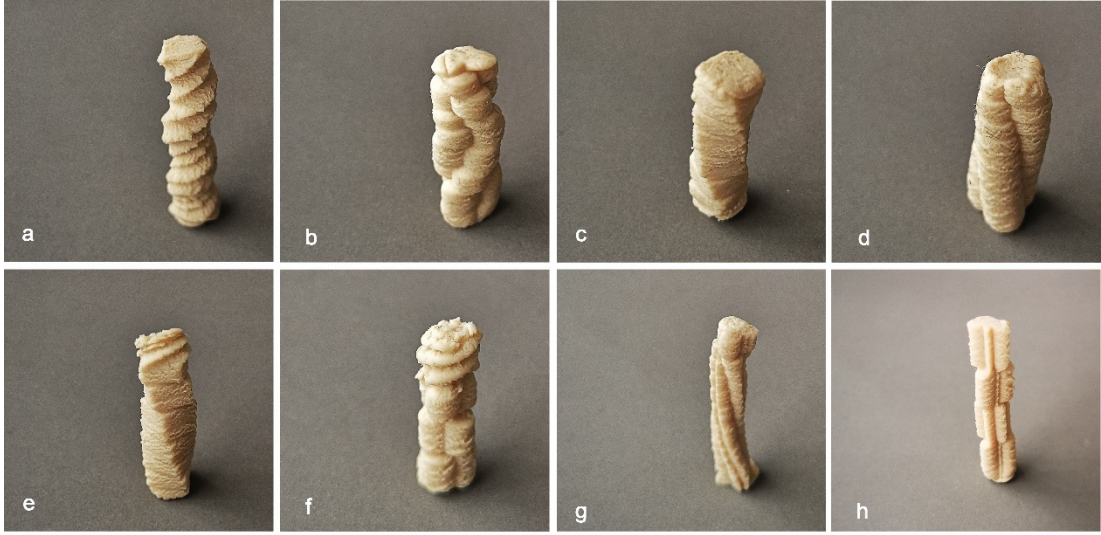


Şekil 4.4 : Kalıp kombinasyonları ile üretilen biçimler.

Üst üste getirilerek araç başlığı içerisine yerleştirilebilen kalıp miktarı, kullanılan kalıbın kalınlığına ve araç başlığının vida adımına bağlıdır. Özetle, başlık içerisine yerleştirilen kalıp miktarı arttırıldığında ve içbükey kalıplar kullanıldığında farklılaşan biçimler elde edilebilmektedir.

4.1.2.2 Kalıp-arac başlığı hareketi ve biçim ilişkisi

Kalıp-arac başlığı bileşeninin potansiyellerini keşfetmek için gerçekleştirilen ikinci denemede kalıp başlığının dönüş hareketine odaklanılmıştır. Şekil 4.5'te gösterilen araç başlığının dönme kabiliyetinden yararlanılarak kare ve 3-daire kalıplar ile denemeler gerçekleştirilmiştir.

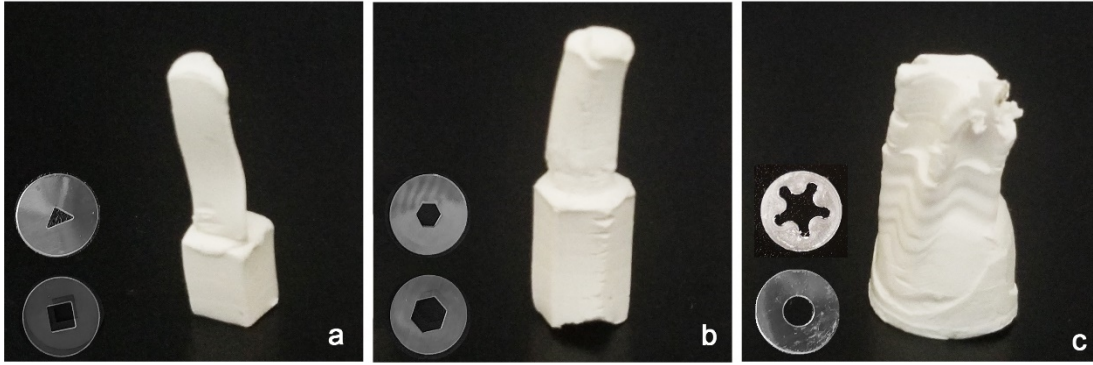


Şekil 4.5 : Tekli ve çoklu kalıplar ve hareketli araç başlığı ile üretilen biçimler.

Doğrusal ekstrüzyonların ardından, presleme, dönme açıları ve kalıp kombinasyonları gibi parametreler manipüle edilerek farklı yüzey özelliklerine sahip büküm (twist) ekstrüzyonları üretilmiştir. Kalıbın oyun hamuru gibi yumuşak yapıdaki malzemeye tutunmasıyla, başlığın döndürülmesine gerek kalmadan sürekli büküm ekstrüzyonu elde edilebilmektedir (a). Malzemeye uygulanan basınçtaki değişimler nedeniyle, ekstrüde biçimin çapı büyükten küçüğe doğru değişkenlik gösterir. Büküm ekstrüzyonu, kalıbın malzemeye sabitlenmesine gerek kalmadan, araç başlığının döndürülmesiyle de oluşturulabilir (c). Değişken dönüş açıları aynı ekstrüzyon işlemi esnasında da kullanılabilir (e ve f). Döndürme ve pres işlemleri arasındaki senkronizasyon, sürekli büküm ekstrüzyonları oluşturmaktadır (c ve d). Art arda pres ve döndürme işlemleri uygulandığında kalıbın yer değiştirmesi yüzeyi deforme etmekte ve bu işlem sonucunda kademeli büküm ekstrüzyonları üretilmektedir (b ve f). Kalıpların kombine edilerek döndürülmesi hem kesitte hem de yüzeyde çeşitlilik yaratmaktadır. 360° araç başlığı dönüşü ile sürekli pres işlemi uygulandığında, yüzeyde değişken girintiler elde edilmektedir (g). Eşit pres süresine sahip kademeli büküm ekstrüzyonu, biçim üzerinde eşit olarak dağıtılmış katmanlar oluşturmaktadır (h). Farklı çokgen kalıplar, farklı presleme ve döndürme kural seti sıralaması ve süreleri kullanılarak biçimsel çeşitlilik artırılabilir.

Kalıp değiştirme işlemi için oyun hamuru ve hava ile kuruyan kil gibi malzemeler yumuşak yapılarından dolayı başarılı sonuçlar vermemiştir. Bu işlemin başarılı olabilmesi için yeni eklenen kalıp kesitinin mevcut kesitten büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle, polimer kil ile üçgen, altıgen ve yuvarlak köşeli beşgen

kalıptan daha büyük açıklığa sahip kare, altıgen ve daire kalıba işlem esnasında geçişler yapılmıştır (Şekil 4.6).



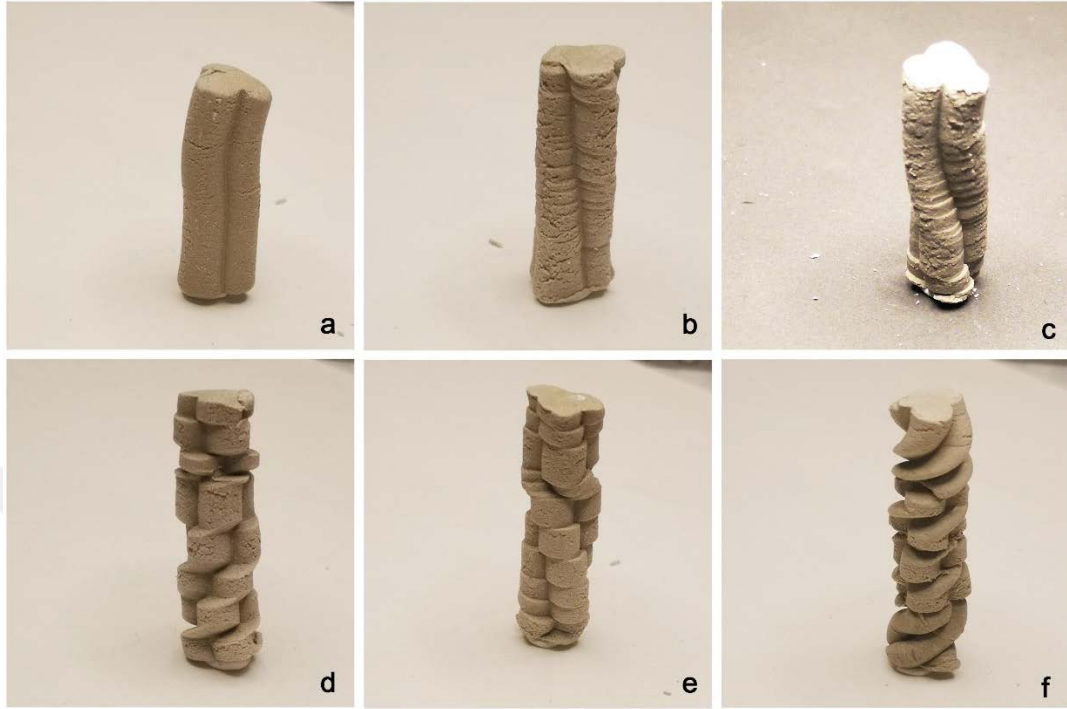
Şekil 4.6 : Kalıp değiştirme kural seti ile ortaya çıkan biçimler.

Bu işlem sayesinde bir biçimden diğerine keskin veya aşamalı geçişler sağlanabilmekte, biçimin kesit alanı azaltılabilmektedir. Ancak kalıp değiştirme esnasında biçim ana malzemeden ayrılabilir. Bu nedenle, yapımdaki risk oldukça yüksek olup, tekrarlı bir biçimde aynı kural setini uygulamak oldukça güçtür.

4.1.2.3 Eş zamanlı kuralların uygulanması ve biçim ilişkisi

Ekstrüzyon esnasında vidalı presleme aparatının sürekli veya kademeli döndürülmesi biçim üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır (Şekil 4.7). Kalıp başlığıyla itme mekanizması eşzamanlı olarak çalıştırılırsa pürüzsüz bir yüzey elde edilir (a, b ve c). Başlığın dönüşüyle pres mekanizmasını aynı anda çalıştırmak için el ile yapımda iki operatör gereklidir ve bu iki operatörün aracı kullanırken belirli bir el yatkınlığı geliştirmiş olmaları beklenir. Yüzey pürüzsüzlüğünün tüm yüzeyde sağlanması mümkün olmayabilir, zaman zaman biçim yüzeyinde kademelenmeler gözlemlenebilir (c). Özellikle araç başlığını döndürürken çevirme kolu da kademeli bir şekilde döndürülürse; ekstrüze edilen katmanlar yüzey üzerinde oluşan yatay çizgiler nedeniyle açık bir biçimde görünür hale gelmektedir (d, e ve f). Dönüş esnasında vida dönüş sayısını artırarak veya azaltarak farklı yüksekliklerde katmanlar oluşturmak da mümkündür. Bu dönüşler şaşırtmalı olarak yapılırsa iki katmanın birleştiği kesitte malzemenin şişme yaptığı görülür (d). Ayrıca, şaşırtmalı döndürme kural setinde vida-disk bileşeni, malzemeye dengeli bir itme kuvveti uyguladığı için eğilme oranı doğrusal ve sürekli döndürme kural setleriyle üretilen biçimlere göre daha düşüktür (d ve e). Manuel kullanımın avantajlarından biri de yüzeyde beklenmedik ve farklı

girintiler elde edebilmektir (f). Manuel üretimde, ekstrüzyon esnasında sürekli döndürme ile kademeli döndürme arasında geçişler sağlanabilir (f).



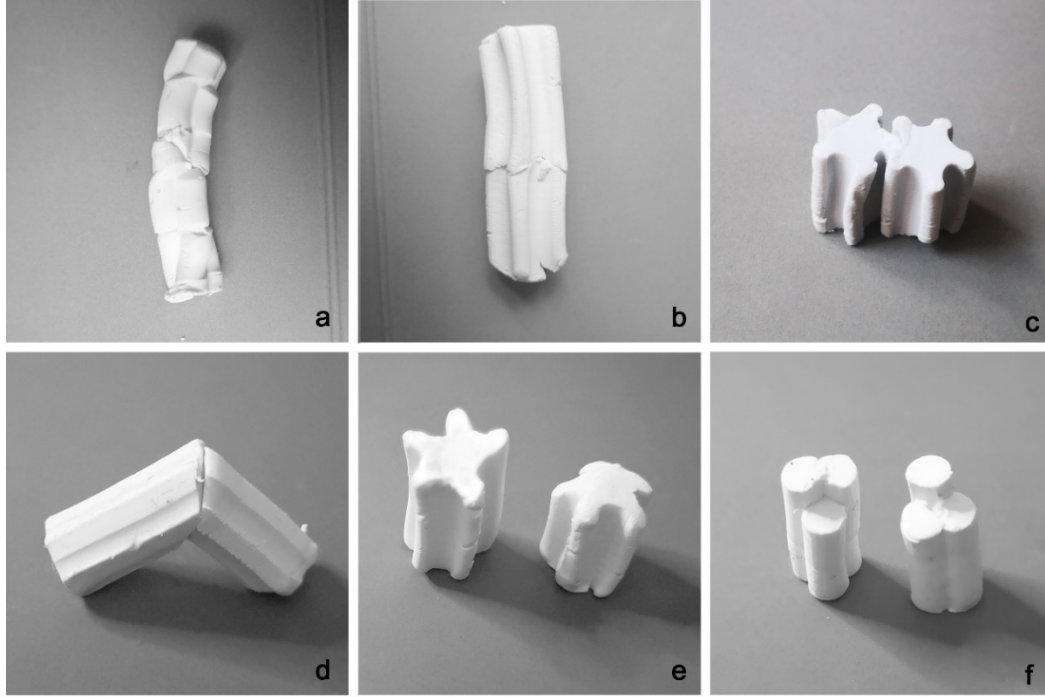
Şekil 4.7 : Farklı presleme ve döndürme kural setlerinin biçime olan etkisi.

Kalıp-araç başlığı bileşenine yönelik gerçekleştirilen denemeler sonucu, yüzeylerin sınırları ile ilgili bulgulara ulaşılmıştır. İçbükey çokgenlerin ekstrüzyonunda keskin köşeler nedeniyle dışbükey çokgenlere göre daha fazla yüzey deformasyonları görülmektedir. Daire ve yarım daire kalıplar, bileşenlerin kesitlerini daraltabilmektedir. Ayrıca, yarım daire gibi simetrik olmayan çokgenler, eşit olmayan presleme nedeniyle üretilen biçimi bükmemektedirler. Eğilme oranı, ekstrüde edilmiş biçimlere uygulanan kural sayısı ile ters orantılı ve biçim yüksekliği ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Araç başlığının dönüşü ve içbükey çokgenlerin farklı açılarda üst üste getirilmesi, yüzeylerde değişken girintiler oluşturur. İşlemlerin kombinasyonu da biçimsel çeşitliliği arttırmaktadır.

4.1.3 Kesici ve kılavuz yüzey ile biçim ilişkisi

Ekstrüzyon işleminde kesicinin kullanımı iki türdür (Şekil 4.8). Bunlardan ilki, ekstrüzyon işlemi tamamlandıktan sonra üretilen biçimin, kesilerek ana malzemedan ayrılmasıdır. Bu işlem genellikle tel bir kesici veya bıçak ile biçime en az zararı verecek şekilde gerçekleştirilir. Kesicinin bir diğer kullanımında, ekstrüde edilen

biçim bütünden ayrıldıktan sonra, eş veya farklı yükseklikte alt biçimlere ayrılabilir. Bu aşamada geçmeli birleşim detayları oluşturmak için farklı biçimlerde kesici tellerden faydalanılabilir.



Şekil 4.8 : Farklı kesim biçimleri ile ortaya çıkan birleşim detayları.

Doğrusal bir tel kesici ile belirli bir açıda kesim yapılabilirken, V kesitli bir tel kesici ile konik bir birleşim detayı elde edilebilmektedir (a ve b). İçbükey kalıplardan pahlı beşgen kalıpta olduğu gibi, kalıp biçimindeki girinti ve çıkıntılar da birleşim detayı olarak kullanılabilir (c). 3-daire kalıpla üretilen biçime, doğrusal tel ile uygulanan L şeklinde kademeli kesme işlemi sonucunda geçmeli bir birleşim detayı elde edilebilmektedir (f).

Kılavuz biçimlendirmesi ise, kil ve oyun hamuru gibi yumuşak malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan ek kesitler ve katı biçimle gerçekleştirilen biçimin sınırlarını değiştirme işlemidir. Kılavuz biçimlendirmesinde, kesiciden farklı olarak ekstrüze edilen malzeme ekstrüzyon esnasında veya sonrasında bir kılavuz biçime doğrusal veya açılı şekilde bastırılarak şekillendirilir. Eğer malzeme, küre benzeri bir yüzeye bastırılırsa içbükey bir birleşim yüzeyi elde edilir (e). Tam tersi şekilde, içbükey bir yüzeye bastırılır ise dışbükey bir yüzey elde edilir. Bu iki biçimin geçmeli bir şekilde bir araya getirilmesini sağlar. Kılavuz kesitler kullanılarak biçimlerin yüzeyinde de farklı eksiltme işlemleri uygulanabilir. Kil biçimlendirme araçları bu

türden işlemler için özelleşmiştir ve farklı büküm derecelerindeki metal tel ve plakalar yardımıyla yüzeylerin dekore edilmesine yarar.

4.2 Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri (EdYG) ile Denemeler

Dijital zanaat kapsamında incelenen ekstrüzyon yönteminde araçların fiziksel dönüşümünü takiben dijital dönüşümünün de gerçekleşeceği öngörülmüştür. Bu dijital dönüşüm, araç kullanımının kontrollü hale getirilmesi için kural tabanlı bir yaklaşım olan biçim gramerine dayanmaktadır. Biçim grameri, şekiller, şeyler veya maddeler yerine, bir aracın bileşenleri ve işlevi ile ilgili bir grameri tanımlamak için o aracı analiz etmekle başlar. Kural tabanlı bir sistem olarak biçim gramerini kullanmanın amacı, üretim aşamalarını malzemenin görsel bir formasyonu ve aracın fonksiyonel bir özelliği olarak eklemeli, eksiltmeli veya biçimlendirici olarak ifade etmektir. Bu süreçte, manuel bir aracın bileşenlerinin hareket kapasiteleri (serbestlik derecesi) ve bu kapasitenin biçimsel karşılığı belirlenir. Bu parametrelere dayalı ilişkisel model, yeni tasarımlar oluşturmak için kullanılabilir. Böylece, tekil tasarımlar üreten manuel bir araç kontrollü bir şekilde hem çok sayıda hem özelleştirilebilir tasarımlar oluşturabilir. Geliştirilen görsel gramer kuralları, araçla üretebilecek biçim ailesini ön görmeye yarayan ve dijital araç olarak isimlendirilen parametrik modelin de temelini oluşturur.

Araca özgü bir yapım grameri geliştirme adımları aşağıda açıklanmıştır;

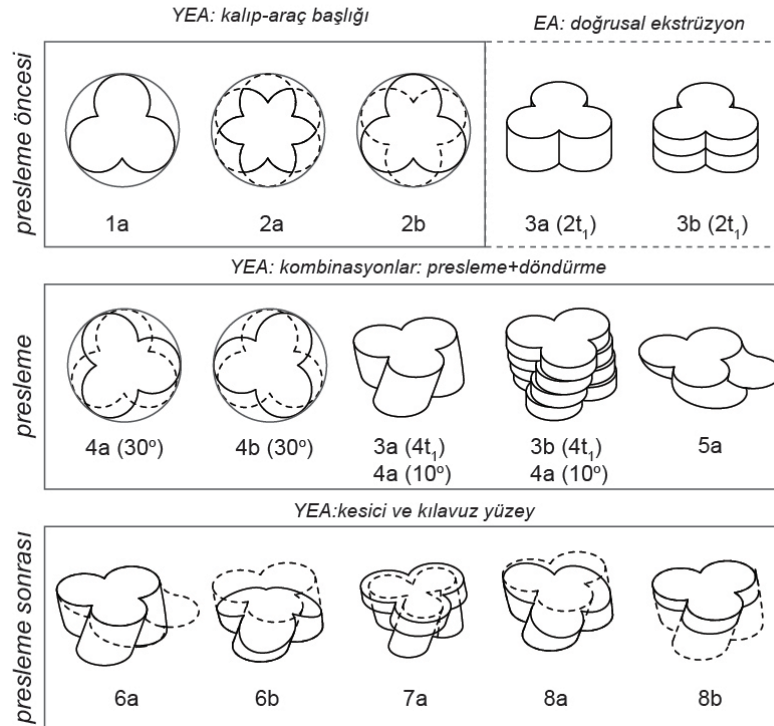
- Hareketli veya sabit bileşenleri belirlemek için manuel aracın analizi,
- Tanımlanan düzlemlerde veya eksenlerde hareket etme, döndürme, kesme veya şekillendirme gibi işlemlere bağlı olarak bileşenlerin serbestlik derecesine (DOF) karar verme,
- Şekillendirme veya kesme gibi üretim esnasında veya sonrasında uygulanan ek işlemlerin tanımlanması,
- Biçimi bir kural seti yardımıyla oluşturmak için fonksiyonları, bu fonksiyonların süresi ile eşleme,
- Biçimsel çeşitlilik sağlamak için kural kombinasyonları oluşturma.

Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinin (EdYG) işlem aşamaları; presleme öncesi, presleme ve presleme sonrası olmak üzere üçe ayrılmıştır (Şekil 4.9). Kural seti,

manuel bir hazne ve sonsuz vidadan oluşan araç ile yapılan deneylerin ardından belirlenmiştir. İş akışı, kalıbın araç başlığının içine yerleştirilmesiyle başlar (Kural 1a). Kalıp, içi boş ekstrüde edilmiş bir biçim oluşturmak için mevcut kalıp ortasına ekleme yapılarak değiştirilebilir veya belirlenen bileşenler araç başlığından çıkarılabilir. Bu noktada kalıbın da üretken şekilde tasarlanması söz konusudur. Pres aşamasında, sürekli veya aralıklı kuvvet, eşit veya eşit olmayan kuvvet gibi birkaç pres seçeneği uygulanabilir. Araç tarafından şekillendirilen biçim, presin sürekli veya kesintili olma süresinden ve eğer varsa kalıbın dönme süresinden etkilenir. Eşit olmayan presleme ve içbükey çokgen kalıp kullanımı gibi sebeplerle, ekstrüze edilen biçimde bozulma gerçekleşirse (Kural 5a) el ile düzeltilebilir (Kural 6a). Presleme sonrasında, kalıp değiştirilebilir (Kural 7a) veya düzlemsel yüzey yerine 3B bir kılavuz yüzey kullanılabilir (Kural 6b). Presleme işlemi sonunda, kesme telini kullanarak doğrusal veya diyagonal şekilde (Kural 8a ve 8b) ekstrüde edilmiş biçim, malzemeden ayrılabilir. Kesme işlemi tekrarlı olarak uygulanarak tek bir ekstrüde biçimden birden fazla birim elde edilebilir.

Araç kullanımı görsel-fiziksel bir gramer olarak Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ekstrüzyon işlemi görsel gramerde de üç aşamalı olarak ifade edilmiştir. Ekstrüzyon öncesinde kalıbı başlığa yerleştirme (1a), kalıp kombinasyonu oluşturma (1b) ve kalıp eksiltme (1c) işlemleri gösterilmiştir. Kalıp kombinasyonu oluşturma işleminde iki kalıbın birbirlerine göre konumları açısal değerlerle ifade edilmiştir. Vida adımına bağlı olarak belirlenen birim zamanda basılan malzeme t_1 değeri ile gösterilmiştir. Döndürme işlemi saat yönünde ve tersi yönde olmak üzere kesikli çizgi ile ifade edilmiştir (4a ve 4b). Kademeli döndürme ekstrüzyon işlemi, yatay çizgilerle ekstrüde edilmiş biçimle, sürekli döndürme ekstrüzyon işlemi çizgisiz ekstrüde biçimle temsil edilmiştir (3a ve 3b). Biçimde gözlemlenen bozulmalar bükülmüş bir biçimle temsil edilmiştir (5a). Bu bozulmaların el ile kontrolü manuel ekstrüzyon sürecindeki ekstrüzyon sonrası uygulanan işlemlerden biridir (6a). Kılavuz yüzey ile biçimlendirme (6b), kalıp değiştirme (7a) ve farklı kesme işlemleri de (8a ve 8b) yine kesikli çizgi ile gösterilen ana biçim ve sürekli çizgi ile gösterilen final biçimi ile ifade edilmiştir. Yapım grameri kuralları, yapım adımlarının kolayca takip edilmesini ve uygulanmasını sağlamak amacıyla tanımlanmıştır. Bu gramerden türetilen farklı kural setleri vasıtasıyla farklı biçimler üretilebilmektedir. Kural seti hem manuel araçta hem de hibrit araçta kullanılabilir.

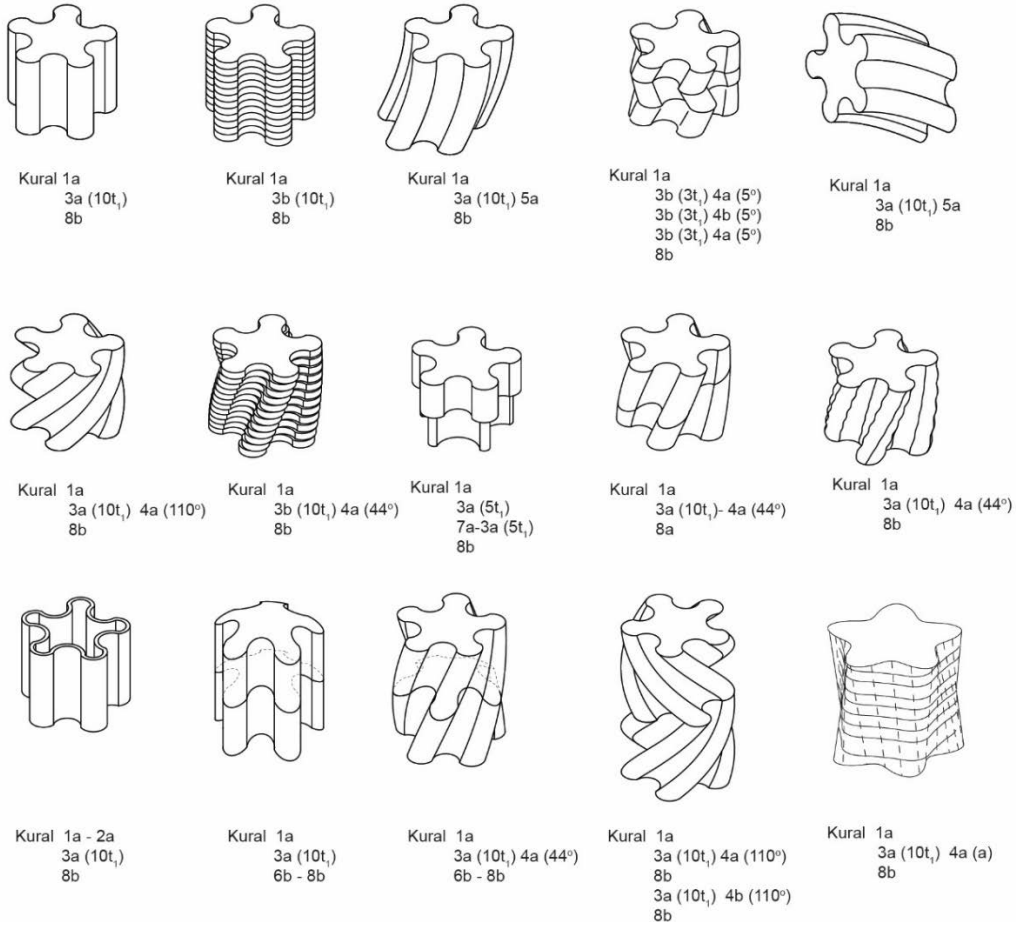
Presleme öncesi	Kural 1a		kalıp yerleştirme
	Kural 2a		kalıba parça ekleme
	Kural 2b		kalıptan parça eksiltme
Presleme	Kural 3a		sürekli pres (t_1)
	Kural 3b		kesikli pres (t_1)
	Kural 4a		döndürme (SY)
	Kural 4b		döndürme (SYT)
	Kural 5a		biçimde bozulma
Presleme sonrası	Kural 6a		el müdahalesi
	Kural 6b		kılavuz yüzey biçimlendirmesi
	Kural 7a		kalıbı değiştirme
	Kural 8a		XY düzleminde diyagonal kesim
	Kural 8b		XY düzleminde doğrusal kesim



Şekil 4.9 : Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri (EdYG).

4.2.1 Dijital ortamda yapım grameri ve baz biçim geliştirilmesi

Görsel-fiziksel yapım grameri, dijitalleştirilerek Rhinoceros Grasshopper’da parametrik bir model oluşturulmuştur. Geliştirilen yapım gramerindeki kural setleri parametrik biçim gramerine çevrilerek değişkenler üzerinden tanımlanmıştır. Parametrik modelin araca bağlı yapım gramerindeki parametreler ve kural setlerini içeren dijital model EK B’de gösterilmiştir. Geliştirilen parametrik modelin parametreleri; kalıp kesiti, kalıp kombinasyonları, içi boşluklu kalıp kalınlığı, birim zamanda üretilen katman yüksekliği, kesme yüksekliği yani birim yüksekliği ve araç başlığı dönüş açısıdır. Aracın hareketli bileşenlerinin biçimi şekillendirmesi t sabit değeri üzerinden ardışık artan değerlerle simüle edilmiştir.



Şekil 4.10 : Tek bir kalıp ve farklı kural setleri aracılığıyla elde edilen biçimler.

Parametrik yapım gramerine dayalı ve tek bir kalıp kullanılarak üretililecek biçimler Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Fiziksel üretimde birim zamanda basılan malzeme, dijital modelde birim zamanda belirli bir kesitin ekstrüze edilmesiyle elde edilen biçim ile temsil edilmiştir. Her bir saniyede üst üste gelen bu katmanlar biçimin bütünü oluşturur. Bütün oluşturma esnasında fiziksel üretimde olduğu gibi belirli işlemler

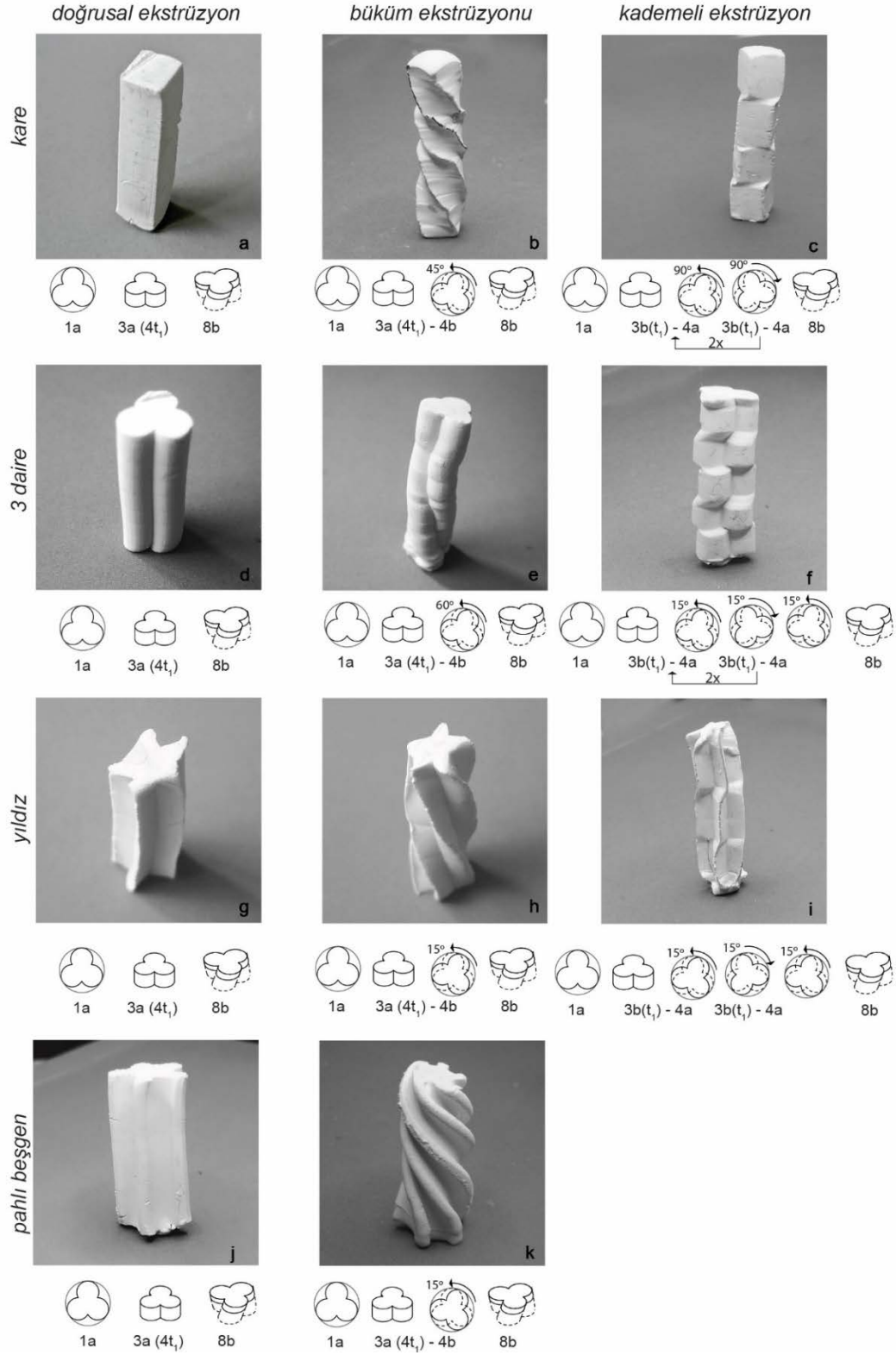
malzemeyi şekillendirmek için uygulanır. Bu sayede kalıbın hareketine bağlı olarak ortaya çıkan biçimler tayin edilebilmektedir. Parametrik modelde, presleme öncesi kalıp kombinasyonları simüle edilebilmektedir. Aynı zamanda, presleme esnasındaki işlemler ile doğrusal, kademeli doğrusal, büküm, kademeli-çok adımlı ve şaşırtmalı ekstrüzyonlar elde edilebilmektedir. Bunlar dışında presleme sonrası el veya aparat kullanılarak yapılan modifikasyonlar da parametrik modele eklenerek kural setinin kombinasyonlarına dayalı birçok biçim elde edilebilmiştir. Aynı zamanda biçimde gerçekleşen bozulmalar da simüle edilmiştir. Bu sayede, fiziksel yapım süreci dijital ortama aktarılmıştır.

4.2.2 Fiziksel ortamda yapım grameri

Öncül deneyleri takiben belirlenen kalıp kesitleri ile manuel araç kullanılarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Yapım gramerinden seçilen kural setleri, ekstrüzyon parametrelerini sistematik olarak manipüle ederek değişken biçimler üretmek için kullanılmıştır.

4.3 Üretilen Biçimlerin Değerlendirilmesi

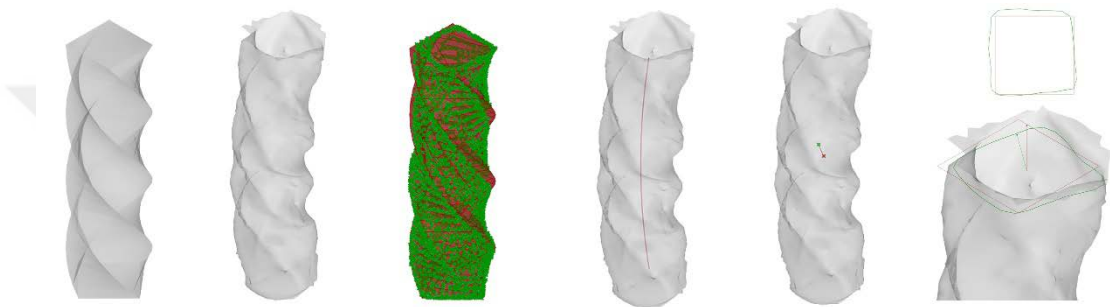
Belirli kural setleri aracılığıyla üretilmiş ve Şekil 4.11’de gösterilen biçimler aynı kural setleri ile dijital ortamda üretilen biçimlerle karşılaştırılmıştır. Bu biçimlerin üretilmesinde araç kütüphanesinde yer alan kare, 3-daire ve yıldız şeklindeki kalıplar ve bunlara ek olarak yeni tasarlanan pahlı beşgen kalıp kullanılmıştır. Her bir kalıp için, doğrusal, büküm ve kademeli ekstrüzyon olmak üzere üç kural seti uygulanmıştır. Bu kalıpların seçilmesinin nedeni araç kütüphanesinde bulunan diğer kalıpların daire ve daire kombinasyonlarından oluşmasıdır. Bu kalıpların çeşitlilik üretmede zayıf olduğu tespit edildiğinden daha köşeli kalıpların kullanımı tercih edilmiştir. Kullanılan kural setleri ise, yapım gramerinin presleme bölümüne odaklanmaktadır. Dolayısıyla, presleme sonrasındaki kesme ve kılavuz biçimlendirme işlemleri değerlendirme aşamasında kapsam dışı bırakılmıştır.



Şekil 4.11 : Final değerlendirmesi için üretilen biçimler.

Üretilen biçimlerin karşılaştırılmasında kullanılan yöntem; beyaz renkli, küçük ölçekli ve simetrik biçimlerin dijital ortama aktarılması için geliştirilen ve tezin 3.3 Ön Değerlendirme bölümünde detaylı olarak açıklanan ‘Göreceli Konumlandırma

Yöntemi'dir. Bu karşılaştırma esnasında, fotogrametri ile oluşturulan *mesh* tabanlı model Rhinoceros'a *import* edilerek Rhinoceros Grasshopper'da yazılan kodlar (script) yardımıyla beş farklı sapma değeri tespit edilmiştir. Bunlar, toplam yüzey sapması, eğilme açısı, orta nokta sapması, ideal kalıp kesitinin sapması ve kalıbın dönme hareketine bağlı oluşan biçimlerde ise kesitin açısal sapma değeridir (Şekil 4.12). Bu değerlendirme ölçütleri, plastik ve metal ekstrüzyon işlemlerinde de yaygın olarak kullanılan doğruluk belirleme ölçütlerinden uyarlanmıştır (Vollertsen ve diğ., 1999). Bu sayede dijital olarak simüle edilen ve fiziksel olarak üretilen biçimler arasındaki korelasyonu belirlemek amaçlanmıştır.



Şekil 4.12 : Dijital ve fiziksel çıktıların karşılaştırılmasında kullanılan ölçütler.

Değerlendirme aşamasında kullanılan Rhinoceros Grasshopper'da yazılmış görsel kod EK B'de gösterilmiştir (Şekil B.2 ve Şekil B.3). İlk aşamada yapım gramerindeki kurallara göre oluşturulmuş fiziksel ile dijital ortamda üretilen biçimler arasındaki toplam yüzey sapma değeri hesaplanır. Bunun için mesh model yüzeyinde bulunan noktalar ile dijital modelin yüzeyindeki noktalar arasındaki uzaklık değerleri hesaplanır ve ortalama bir yüzey sapma değeri elde edilir. İkinci hesaplanan değer, ekstrüzyon esnasında gerçekleşen biçim eğilme değeridir. Bu değer hem dijital hem fiziksel modelin tam orta noktasından geçen eğrinin belirlenmesiyle elde edilir. Dijital modelde bu eğri, biçimin alt ve üst yüzeylerinin orta noktalarından geçen doğrusal bir çizgidir. Fiziksel biçimde ise bu eğri, biçimin alt üst ve orta noktalarından geçen kesitlerin orta noktalarını birbirine bağlayan eğridir. Bu iki eğri arasındaki açı vektörel olarak hesaplanarak açısal sapma değeri olarak ifade edilir. Orta nokta sapması da yine bu doğrusal çizgi ve eğrinin orta noktaları arasındaki mesafenin ölçülmesiyle hesaplanır. Bu değer, planlanan biçim ile fiziksel olarak üretilen biçim arasındaki aksiyel sapma değerini ifade eder. Dijital modelde girdi olarak kullanılan kalıp kesiti ile fiziksel araçta kullanılan kalıp kesitleri aynıdır. Ancak, yapılan ölçümlere dayanarak, fiziksel üretim esnasında malzeme, yer çekimi ve kalıpta gerçekleşen

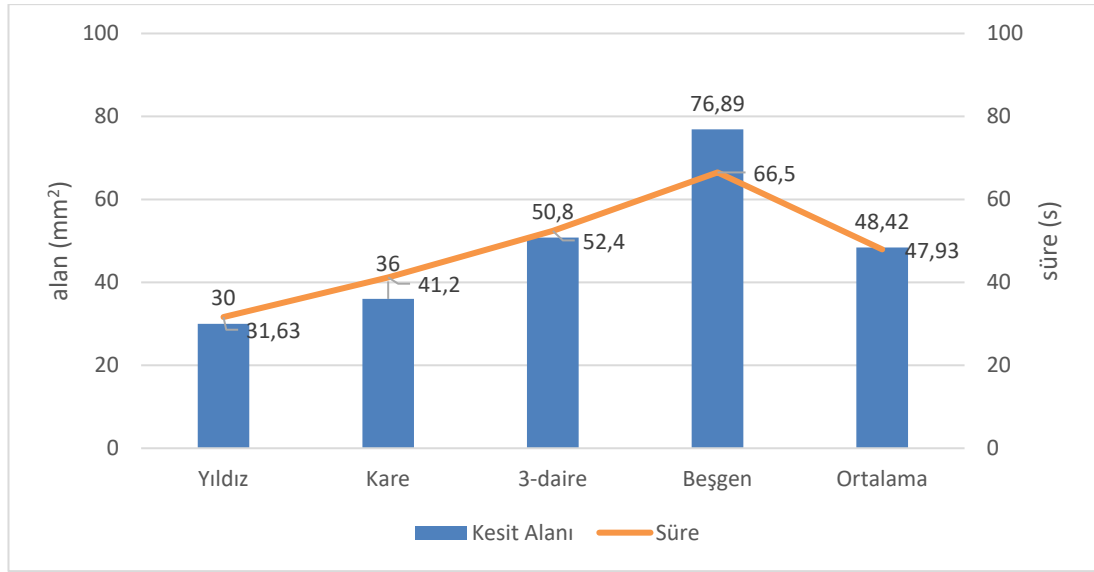
mikro ölçekteki deformasyonlar sebebiyle fiziksel nesneden alınan kesitlerin, başlangıç kalıp kesitinden kısmi olarak farklılaştığı tespit edilmiştir. Bu ölçüm, mesh ve baz modelde aynı yüksekliklerden geçen kesitlerin üst üste karşılaştırılmasıyla elde edilmiştir. Kalıp kenarlarından geçen malzemenin dışa doğru taşmalar yaptığı gözlemlenmiştir. Kalıbın dönmesiyle oluşturulan biçimlerde ise, araç başlığı dönüş açılarının doğruluk oranları yine aynı yöntemle hesaplanarak ortalama bir sapma değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler doğrultusunda EdYG'nin potansiyelleri ve kısıtları ortaya konmuştur.

4.4 EdYG'nin Potansiyelleri ve Kısıtları

Üretilen biçimler, doğrusal ve kademeli büküm ekstrüzyonları ile içbükey kalıp biçimiyle ilişkili değişken yüzey desenlerine sahip yay şeklinde biçimlerdir. Biçimlerin yüzeyindeki girintiler, görsel olarak ilgi çekici veya işlevsel olarak verimli birimler olarak kullanılabilir. Ayrıca, bu girintiler biçimlerin yüzey alanını genişletirler ve gölge alanlar yaratacak şekilde kullanılabilirler. Ekstrüde edilmiş biçimlerin kesilmesi veya kılavuz ile biçimlendirilmesi, birimlerin geçmeli şekilde bir araya getirilmesine imkân vermektedir. El ile denemeler sonucu ortaya çıkan kalıp kombinasyonları, mevcut enine kesitleri kullanarak farklılaşan yüzeyler oluşturmaktadır. Denemeler esnasında malzeme olarak polimer kil kullanılsa da kil ve kerpiç gibi yerel malzemeler de sürdürülebilir bir üretimin parçası olarak ileriki çalışmalarda kullanılabilirler.

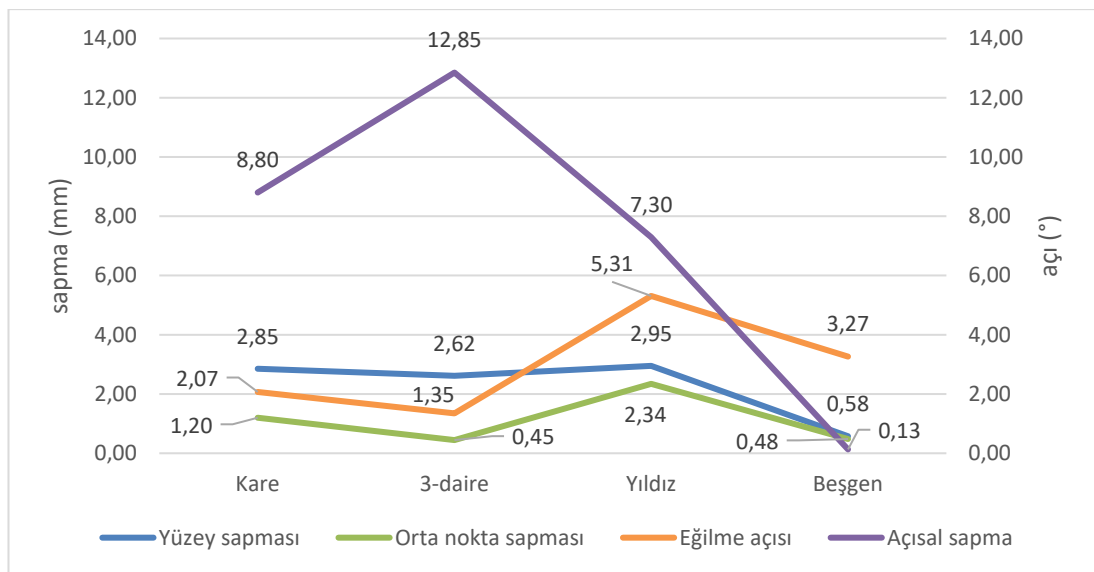
4.4.1 Kalıpların karşılaştırılması

Biçimlendirme esnasında kullanılan kalıpları açıklıklarına göre beşgen, 3-daire, kare ve yıldız olarak büyüktен küçüğe sıralayabiliriz. Yapılan ölçümler sonucu, kalıp açıklık miktarı ile birim zamanda basılan malzeme arasında ters orantı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.13). Birim zamanda basılan malzeme yüksekliği kare kalıpta 3 mm, 3-daire kalıpta 2,22 mm, yıldız kalıpta 3,6 mm ve beşgen kalıpta 1,2 mm'dir. Dolayısıyla, en büyük açıklığa sahip beşgen kalıp ile aynı yüksekliğe sahip biçimleri üretmek için gerekli süre daha fazladır. Farklı kalıplarda aynı yüksekliği elde etmek için vida dönüş sayısı arttırılmalıdır. Kalıp açıklığıyla presleme süresi arasındaki oran hesapladığında 1 mm² malzemeyi basmak için gereken süre ortalama 0,98 saniye olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : Kalıp alanı ve birim zamanda basılan malzeme ilişkisi.

Kalıp şekilleri açısından baktığımızda ise, yüzey sapma değeri 3-daire kalıp için en düşük olsa da kare, yıldız ve 3-daire kalıp için hesaplanan değerler birbirlerine çok yakındır. Ancak, kalıp açıklığının diğer kalıplara göre fazla olduğu beşgen kalıp yaklaşık beşte bir oranında daha az yüzey sapma değerine sahiptir. 3-daire kalıp ile üretilen biçimlerde eğilme açısı en azdır. Yüzey girintilerinin fazla olduğu yıldız ve beşgen kalıplar için eğilme açı değerleri oldukça yüksektir. Yıldız şeklindeki kalıp daha keskin köşelere sahip olduğu için biçim eğilme değeri, pahlı beşgen kalıptan daha fazladır. Eğilme açılarına göre baktığımızda, kavisli ve az girintiye sahip kalıp biçimlerinin daha doğru sonuçlar verdiğini söyleyebiliriz (Şekil 4.14).

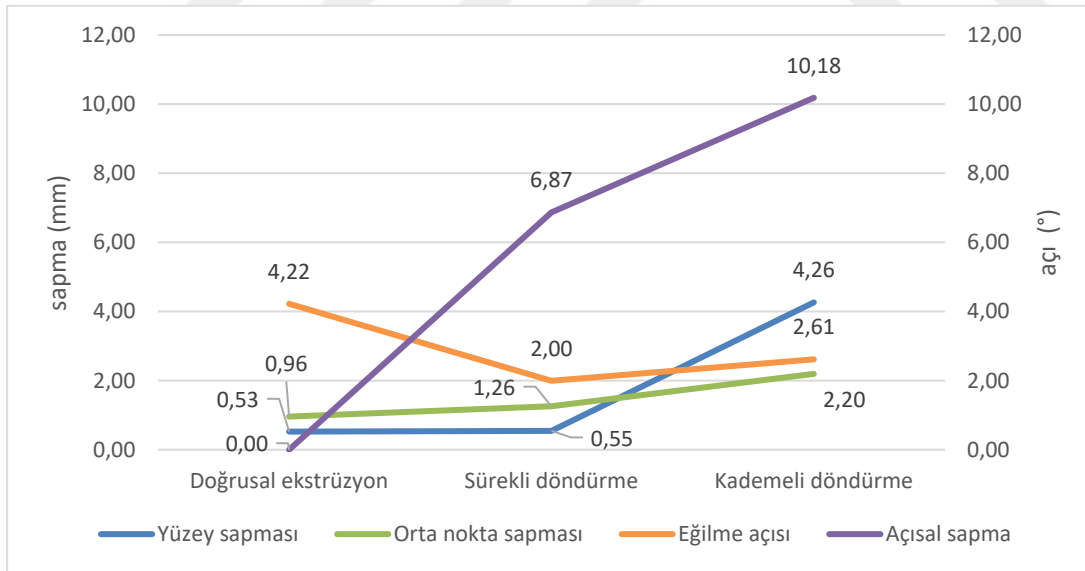


Şekil 4.14 : Kalıpların karşılaştırılması.

3-daire ve beşgen kalıp en düşük orta nokta sapmasına sahip kalıp biçimleri olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, ekstrüzyonda doğrusal biçimler elde edilmek istendiğinde, köşe noktaları pahlı kalıplar kullanılması gerekmektedir. Ancak, yıldız gibi girintili kalıplar ile üretilen biçimler yüksek biçim eğilme değerlerine sahip olduklarından kemer gibi kavisli biçimleri oluşturmak için gerekli alt bileşenleri üretmede kullanılabilir. 3-daire kalıp, yüksek doğruluğa sahip olsa da kalıp döndürme işlemlerinde en düşük doğruluğa sahip olduğu tespit edilmiştir. Tüm bu verilere baktığımızda, kare ve beşgen kalıpların, yüksek doğrulukta biçim üretmede etkili olduğu tespit edilmiştir.

4.4.2 Kural setlerinin karşılaştırılması

Tüm kural setleri için elde edilen verilere baktığımızda; en yüksek hata değerinin açısal sapma değerinde olduğunu görmekteyiz. Farklı kural setleri için bu değerler karşılaştırıldığında, uygulanması en zor olan kural setinin kademeli döndürme işlemi olduğu belirlenmiştir. Bu işlem esnasında, eğilme açısı düşük olsa da yüzey sapma oranı, orta nokta ve açısal sapma değerleri diğer kural setleri ile üretilen biçimlere göre oldukça yüksek olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Kural setlerinin karşılaştırılması.

Yüzey sapma değerlerine baktığımızda; doğrusal ve sürekli döndürme kural setlerinin yakın değerler verdiği belirlenmiştir. Eğilme açısının en yüksek olduğu biçimlendirme doğrusal ekstrüzyondur. Döndürme işlemleri esnasında kalıbın döndürülmesi ve haptik duyu sayesinde üretilen biçimlerin oldukça düzgün olduğu tespit edilmiştir.

Orta nokta sapma değerlerine göre ise, eksene bağlı sapma oranının kademeli döndürmede en yüksek, doğrusal ekstrüzyonda en düşük olduğu görülür. Buna göre kısa biçimlerde doğrusal ekstrüzyonun daha doğru sonuçlar verdiği, daha uzun biçimlerde ise sürekli döndürme işleminin yapım gramerinin de yardımıyla yüksek doğruluk değerine sahip olduğu söylenebilir. Ancak kademeli döndürmede kalıbın ileri ve geri çevrilmesi esnasında el ile kontrol oldukça güçtür.

Elde edilen nicel ve nitel verilere dayanarak dijital aracın gramer kuralları ile gerçekleştirilen fiziksel üretimlerin değerlendirilmesinde kullanılmasıyla araç bileşenlerinin yapım süreci üzerindeki etkilerine yönelik deneme yanılma yoluyla elde edilen örtük bilgiler açık bir şekilde tanımlanmıştır. Bu süreçte, yapım gramerleri açısından beklenmedik şekilde ortaya çıkan biçimler ölçümlenerek parametrelere bağlı olarak ifade edilmiştir.



5. SONUÇ VE TARTIŞMA

5.1 Yeniden-yapılandırılabilir Araç Geliştirme

Tezde, hesaplmalı düşüncenin yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme yöntemleriyle bütünleştirilerek el ile yapma bilgisinin çözümlenmesinde, mevcut araca bağlı tasarım uzayının genişletilmesinde ve üretilen biçimlerin doğruluk açısından değerlendirilmesinde kullanılmak üzere alternatif bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, manuel yapımdaki bilgiyi açık olarak tariflemek, keşfetmek ve kontrol edebilmek için bileşen-fonksiyon ilişkilerinden türeyen iki aşamalı bir süreci içerir. Bu sürecin vaka çalışması olarak ekstrüzyondaki; girdi, süreç ve çıktı aşamaları incelenmiştir.

Tüm bu denemelerin ve bulguların değerlendirilmesi sonucunda, yapım gramerine dayalı biçimlerin üretiminde kullanılan EA'nın ve YEA'nın dijital zanaat açısından potansiyelleri ve kısıtları ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur. Bu çıkarımlar, biçimsel çeşitlilik, belirli bir doğrulukta biçim üretebilme kapasitesi, üretim süresi, yeniden-yapılandırma derecesi gibi değerlendirme ölçütlerine dayanmaktadır. Üretilen biçimler, değişken yüzey desenli doğrusal (straight), büküm (twist) ve çok adımlı-kademeli (multi-step) ekstrüzyonlardır. YEA'nın üretim hızının EA'ya göre yüksek olması sebebiyle daha fazla sayıda biçim üretmek mümkündür. Ancak, YEA'nın keşfe dayalı deneysel kullanımında motor dönüş hızının düşürülerek yapım sürecinin el ile müdahaleye daha fazla imkân verecek şekilde yavaşlatılması gerekmektedir. Ayrıca, YEA'nın yükseklik açısından kısa biçimleri üretmede EA'ya göre daha verimli olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple, üretilen biçimlerde eğilme miktarı düşürülmek istendiğinde haptik duyunun yerine geçebilecek kılavuzlar kullanılmalıdır. Hibrit üretimde ortaya çıkan beklenmedik biçimlerin literatürdeki örneklerde olduğu gibi (Lopez ve diğ., 2016; Alvarez, 2016.) bir tasarım fikri olarak kullanılması da mümkündür.

Üretilen biçimlerin ölçülmesi ve süreç içerisindeki gözlemlere dayanarak, kalıp biçimlerinin ve kombinasyonlarının yüzeyler üzerindeki etkisi ve ekstrüde edilmiş biçimlerin sınırları ile ilgili veriler elde edilmiştir. Birim zamanda basılan katman

yüksekliği, kalıp açıklığıyla ters orantılı olup, farklı kalıplarda aynı yüksekliği elde etmek için vidanın dönüş miktarı arttırılmalıdır. İçbükey çokgen kalıpların keskin kenarları nedeniyle dışbükey olanlara göre üretilen biçimlerdeki deformasyonlar artmaktadır. Kalıp biçimleri, biçimin yüksekliği ve sapma değerleri arasında ölçümlenen ve kurulan bu yeni ilişkilerin, tasarım sürecinin kendisine entegre edilmesi de mümkündür. Aracın sistem tasarımı ve dijital modeli, sezgisel ve haptik duyuya dayalı yapım sürecinin açık hale getirilmesinde kullanılabilecek fiziksel ve dijital ortamdaki ölçüm araçlarıdır. Dolayısıyla, manuel bir aracın mekanize edilmesi hem sürecin dijitalleştirilmesine hem de ölçümlenmesine katkı sağlamıştır.

Geliştirilen YEA, düşük atık ve karmaşık yüzey detayları üretme gibi eklemeli üretimde bulunan benzer avantajlara sahiptir. Bunun yanı sıra, 2B ve kesme işlevi üstlenen kalıplara ve bileşenlere sahip olan YEA ile, çok parçalı ve karmaşık kalıplara kıyasla, bu ölçekte dahi detaylı yüzeyler üretmek mümkün olmuştur. Yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirme adımlarının gerçekleştirildiği deneysel çalışmalara dayanarak; modülerlik, özelleştirilebilme, ölçeklenebilme, bütünleştirilebilme, değiştirilebilme, teşhis edilebilme, farklı malzemeler kullanabilme ile hibrit kontrole sahip ve müdahaleye açık olma ile çeşitlilik, doğruluk, üretim süresi ölçütleri yeniden-yapılandırılabilir bir aracın değerlendirme ilkeleri olarak tanımlanmıştır. Bu sayede, basit bileşenlerin bütünleşik ve çeşitliliğe izin veren çalışma prensiplerinden hareketle, düşük maliyetli başka sistemler ve araçlar üretilebilecektir. Mevcut araç ve tekniklerin özelleştirilmesiyle geliştirildikleri için 'görece düşük teknoloji' (R. Schipper ve diğ., 2014) olarak kabul edilen yeniden-yapılandırılabilir araçlar çeşitli kullanıcılar tarafından ve yaygın şekilde kullanılabilmeye potansiyeline sahiptirler.

5.2 Ekstrüzyona Dayalı Yapım Grameri

Yapılan deneysel çalışmalar göz önüne alındığında ekstrüzyona dayalı yapım gramerinde kullanılan araç ve bileşenlerin, sonuç biçimin oluşturulma işlemine etkileri gözlemlenmiştir. El ile yapım ve keşif süreçleri yapım gramerinin oluşturulmasında etkiliyken araç konfigürasyonlarının oluşturulması da yapım gramerinin geliştirilmesinde etkili olmuştur. Buna göre, yeniden-yapılandırma şeması, yapım grameri ve gramer ile üretilen dijital ve fiziksel biçimler arasında döngüsel bir veri akışı bulunmaktadır. Bu veri akışı, araç ile yapılan ilk denemelerde örtük iken, zaman içerisinde açığa çıkarılmış ve araç kullanım olanakları içerisinde bulunmayan ek

fonksiyonların yeniden-yapılandırma şemasına ve yapım gramerine eklenmesi sonucu görünür hale gelmiştir (Oral & Colakoglu, 2021). Yeniden-yapılandırma şemasının araca bağlı üretim senaryolarını belirlemede faydalı olduğu belirlenmiştir.

Araç başlığı, kalıp kombinasyonları ve presleme mekanizmasının hareketi gibi işlemlerden türeyen gramer kuralları açısal değerlerle doğrudan ilişkilidir. Gözlemlere dayanarak yapımdaki el-göz koordinasyonunu sağlamada kartezyen koordinat sisteminde hareketten çok açısal hareket kontrolünün, referans noktaları ve görsel notasyonlar ile uygulanmasının görece daha kolay olduğunu söyleyebiliriz

Dijital yapım grameri, YEA'nın da yardımıyla, kural setleri aracılığı ile üretilen biçimlerde yapım esnasında sezgisel olan örtük bilgilerin açığa çıkarılmasına yardımcı olmuştur. Bu bilgiler, kalıp açıklığı ve birim zamanda basılan malzeme arasındaki ilişki, kalıp geometrisinin üretilen biçim üzerindeki sapma değerlerine olan etkisi, farklı sapma değerleri ile haptik duyu arasındaki ilişki gibi tariflenmesi zor olan bilgilerdir. Bu açıdan bakıldığında EdYG'nin parametrik modeli sürekli geliştirmeye açık bir hesaplama aracı olarak kullanılabilir.

Biçimsel çeşitlilik açısından baktığımızda, yeni keşfedilen bileşen-fonksiyon ilişkilerinin, özellikle eş zamanlı kural setlerinin uygulanması yoluyla araca bağlı çözüm uzayını genişlettiğini söyleyebiliriz. El ile gerçekleştirilen yapım süreçlerinin formalize edilmesi yoluyla beklenmedik biçimlerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir (Knight, 2018). Denemeler esnasında karşılaşılan yay şeklindeki biçimler bu açıdan değerlendirildiğinde, biçim ve yapım gramerlerindeki belirme (emergence) kavramı, yapımdaki kontrol dışı durumların gelişmesi olarak düşünülebilir. Bu beklenmedik biçimlerin tekrarlanabilirliği, yani hassasiyet oranı oldukça düşüktür ancak yapımdaki ustalıkla birlikte, benzer biçimlerin kural setleri aracılığıyla tekrar ve tekrar üretilmesi mümkün olabilecektir. Geliştirilen gramer, fiziksel ve dijital ortamda gerçekleştirilen yapma, ölçme-karşılaştırma ve buna göre yeniden yapma döngüsünün oluşturulmasında faydalı bulunmuştur. Bu döngü, hedeflenen ölçütlere ulaşana kadar tekrar edilebilmektedir.

5.3 Değerlendirme Yönteminin ve Bulguların Analizi

Değerlendirme sonucunda elde edilen sapma değerleri farklı kalıplara, üretilen biçimlerin yüksekliklerine ve uygulanan kural setlerine bağlı olarak belirli bir aralıkta

değişkenlik göstermektedir. 12 mm yüksekliğindeki biçimler için hesaplanan sapma değerlerinin 0,18 ile 4,48 mm değerleri arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Dijital model ile elde edilen verilerin belirli hassasiyet değerleri içerisinde olması, verilerin tutarlılığını göstermektedir. Literatürdeki yeniden-yapılandırılabilir araçlar ile üretilen biçimlerin doğruluk açısından endüstri standartlarının altında kaldığı tespit edilmiş, ancak sapma değerlerinin belirli bir aralıkta olmasının doğruluk açısından kabul edilebilir bir gösterge olduğu belirtilmiştir (Scherer, 2019; Yang ve diğ., 2019). Hassasiyet değerlerindeki bu tutarlılık, küçük ölçekli biçimlerin ölçülmesi için tez kapsamında geliştirilen Göreceli Konumlandırma Yönteminin fiziksel biçimlerin dijitalleştirilmesinde ve yazılan görsel koda dayalı olarak üretilen biçimlerle karşılaştırmalı olarak analizinde başarılı olduğunu göstermektedir. Görece yüksek sapma değerlerinin ekstrüzyon sürecinde biçimin eğilmesinden kaynaklandığını düşünürsek bu değer, YEA ile üretimde haptik duyunun yerine kullanılacak kılavuzlar yardımıyla azaltılması olasıdır. Sapma değerlerinin belirli bir aralıkta kalması, bu değerlerin birer katsayı veya değer çarpanı olarak dijital modele entegre edilmesini de sağlayabilecektir.

Geliştirilen Göreceli Konumlandırma Yönteminin doğruluk değerinin çekilen fotoğrafların sayısı ve kalitesi, ortam ışığı ve kamera özellikleri ile görüntü işleme programının performansından etkilendiği tespit edilmiştir. Fiziksel biçimlerin dijitale aktarılmasında fotogrametri tekniğinden faydalanıldığında dijitale aktarılan biçimlerdeki sapma değeri 0-0,3 mm arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Global kaydetme hatası (global registration error) olarak adlandırılan bu sapma değeri doğruluk oranları üzerinde etkilidir (Yang ve diğ., 2019). Taranan biçimlerin ölçeklendirmeye dayalı olarak boyutsal olarak küçük olması sebebiyle normalde az kabul edilebilecek ve fotogrametri yönteminden kaynaklanan bu değer, elde edilen doğruluk değer aralığı üzerindeki etkisi görece fazla olmuştur.

Ayrıca, literatürde standart olmayan (non-standard) yüzeylerin üretiminde mevcut doğruluk toleranslarının geçerli olamayacağı ile ilgili bir tartışma bulunmaktadır (Bechthold, 2007; Peters, 2014). Sheil'e göre doğruluk değerinin endüstri için ne ifade ettiğinin uzlaşma yoluyla belirlenmesi gerekmektedir. Tasarlanan ve yapılan arasındaki farklar iş birliği ve yaratıcı katılım için zengin bir kaynak sunmaktadır (2013). Ölçüm sonucu yapımdaki risklerden kaynaklı değişken değerlerin elde edilmesinden dolayı, ölçümlerde net bir doğruluk değerine ulaşamaması da söz

konusu olabilmektedir (Eigenraam, 2013). Yapılan tüm gözlem ve ölçümlere dayanarak, üretimde değerlendirme ölçütleri olarak kullanılan doğruluk ve hassasiyet parametrelerinin dijital zanaat araçları için ustalıklı ilişkili olarak değişkenlik göstereceğini söyleyebiliriz.

5.4 Dijital Zanaat Açısından Geliştirilen Yönteme ait Bulgular

Dijital zanaat açısından geliştirilen yöntem sezgisel olarak kullanılan araçların çözümlenmesi ve üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesi ve ölçülmesi için kullanılabilecektir. Üretilen biçimlerin hassasiyet ve doğruluk oranlarının zaman içerisinde iyileştiği gözlemlenmiştir. Kural setlerinin yinelemeli olarak uygulanması ile zaman içerisinde yapımda belirli bir ustalık kazanılması mümkün olabilecektir.

Herhangi bir üreticinin, bu yapım sürecini tam olarak tatbik edebilmesi için aşağıda belirtilen becerilere sahip olması gerekmektedir;

- Yeniden-yapılandırılacak aracın ve yapım sürecinin deneyim yoluyla kazanılmış örtük bilgisi,
- Yeniden-yapılandırılabilir fiziksel araç geliştirebilmek için sistem tasarımına yönelik temel mekanik ve elektronik bilgisi,
- Dijital ve fiziksel ortamda üretilen biçimlerin karşılaştırmalı ölçümlenebilmesi için gereken kodlama bilgisi,
- Üretilen biçimlerin dijital ortama aktarılabilmesi için fotogrametri yöntemine bağlı olarak görüntü işleme programının çalışma prensibi,
- Yapım sürecini analiz etmek, parametreleri ve ölçütleri belirleyerek dijital ortamda parametrik bir modele dönüştürmek için kural tabanlı tasarım bilgisi.

Yeniden-yapılandırılabilir araç geliştirebilmek için Katterfeldt (2014) tarafından önerilen bilgi türlerinin yanı sıra yapım sürecini ölçmek için hesaplamalı düşünce yaklaşımına ihtiyaç vardır. Bu bilgi türlerine sahip olan dijital zanaatkar:

- Yapım bilgisini çeşitli sanal üretici platformları üzerinden paylaşabilir.
- Geliştirilen süreci ve buna bağlı adımları kullanarak değişen ihtiyaçlara ve tasarım fikirlerine göre başka el araçlarını da özelleştirilebilir.

- Yapım sürecine özgü dijital araç geliştirerek sezgisel yapım süreçlerini daha açık ve dolayısıyla paylaşılabılır hale getirebilir.
- Araç ve yapım sürecinin keşfi ile biçim-bulma çalışmaları gerçekleştirebilir.

Fiziksel ve dijital aracın geliştirilmesinde temel alınan esneklik ve yeniden-yapılandırma kavramlarının tasarım ve üretim açısından farklı şekillerde ele alınması söz konusudur. Üretimde değişken ve standart olmayan biçimleri en az maliyet, atık ve sürede üretmek için yeniden-yapılandırılabilir araç ve yöntemlerden faydalanılmaktadır. Tasarım açısından baktığımızda ise farklı ihtiyaçlara ve tasarım fikirlerine cevap verecek tasarım parametrelerinin değişimi ile çeşitlilik elde etmek esneklik olarak tanımlanmaktadır. Farklı biçimlerin veya mekanların kombinasyonları ile farklı fonksiyonlara cevap vermek olasıdır. Ancak, üretimi doğrudan etkileyecek bu çeşitlilik hedefinin yapım süreçlerinden bağımsız olarak kurgulanabilmesi oldukça güçtür. Bu tez kapsamında, tüm yönleriyle ele alınan yapım sürecinin ve bu süreçteki keşiflerin, tasarım pratiği içerisinde ve endüstriyel üretime transfer etme amacıyla ne kadar geliştirilebileceği bir tartışma konusudur. Bu nedenle, bir ara eleman görevi görerek tasarım ofisleriyle iş birliği içerisinde olabilecek dijital zanaatkâr, insan faktörüne bağlı yaratıcı süreçlerin geliştirilmesinde rol oynayabilecektir.

5.5 Yöntemin Potansiyelleri ve Kısıtları ile Gelecek Senaryoları

Bu tez kapsamında izlenen süreçte; rijit aracın doğrusal ekstrüzyona dayalı üretim süreci, farklı parametrelerin, malzemelerin, araç-bileşen kombinasyonlarının ve ek biçimlendirmelerinin olduğu fiziksel olarak yeniden yapılandırılabilen dijital olarak da yeniden programlanabilen açık bir sürece dönüşmüştür. Yapım gramerinin kurgulanması, zanaat gibi örtük bilginin olduğu ve deneme yanılmaya dayalı bir alanda, yapıma dair bilgiyi açık ve dolayısıyla manipüle edilebilir hale getirmesi açısından önemlidir. Yapım gramerinin programlama bilgisi olmadan ancak kural tabanlı yöntemler ile geliştirilebilmesi, yani bilgisayar olmadan dahi hesaplanabilmesi, dijital okuryazarlığı olmayan zanaatkarların ve tasarımcıların kendi tasarım ve üretim iş akışlarını geliştirebilme olasılığını güçlendirmektedir. Üretilen biçimlerin fotogrametri yöntemiyle dijitale aktarılması Baudisch ve Muller'in (2017) de belirttiği gibi sadece bir kopyalama süreci değil, her bir denemenin yedeğini alma ve bu denemeleri paylaşma imkânı vermektedir. Dijital zanaat açısından baktığımızda bu kaydetme süreci örtük bilginin aktarım kanalları sınırlandığında bu bilginin

kaybolmasını önleyebilecek, yeni teknolojilerin entegrasyonu ile yenilikçi yapım süreçleri kurgulanarak bu bilgiler sayısal araçlara aktarılabilir.

Bu tez kapsamında, yeniden-yapılandırılabilir araçlar için tasarım ve değerlendirme ilkelerini içeren kavramsal bir çerçeve oluşturulmuş ve bu bağlamda YEA bir prototip olarak geliştirilerek analiz edilmiştir. Tüm bu nicel ve nitel değerlendirmelerin sonucunda, geliştirilen fiziksel ve dijital aracın doğruluk açısından geliştirilmesi gerektiği belirlense de yapım süreçlerinin deneyim ve ölçme yoluyla araştırılmasında ve ölçümlemesinde, açık kaynaklı ve yeniden-yapılandırılabilen bir hesaplama aracı olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Vakaya ve probleme özel olarak geliştirilebilecek bu tür araçlar; el ile yapıma dayanmaları, müdahaleye açık olmaları ve gerektiğinde birden fazla biçim üretme imkânı vermeleri açısından kullanışlı bulunmuştur.

YEA'nın elde tutulabilir boyutta ve taşınabilir olması deneysel kullanımını kolaylaştırmaktadır. YEA ile erken tasarım aşamasında bileşen-bütün ilişkisine dayalı, yapıma bağlı çözüm uzayı araştırılabilir ve manuel araca göre daha fazla sayıda birim üretilerek bu birimlerin bir araya getirilmesiyle 3B örüntüler oluşturulabilir. Bu örüntüler zanaatkarın ustalığına, kullanılan yerel malzemenin renk ve doku gibi parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. YEA'nın kısıtları arasında, araç başlığının sınırlı dönme kabiliyeti, hazne boyutu ve üretim esnasındaki hataların teşhis edilememesi sayılabilir. Aracın ileriki sürümlerinde, araç başlığının daha fazla vida adımına sahip olması, haznenin yeniden boyutlandırılması ve araca kılavuzların eklenmesi ile bu kısıtlar aşılabılır. Mevcut versiyonda araçtan dijital modele bir geri bildirim olmadığından, ileriki versiyonlarda sensörler aracılığı ile araç ve dijital model arasında çift yönlü bir veri akışı sağlanabilir.

Aracın mevcutta test edilen iki kullanımı (manuel ve hibrit) dışında aracın 1:1 prototipinin geliştirilmesine dayanan gelecek senaryoları öngörülmüştür. İlk gelecek senaryosunda; bu prototip, farklı birim elemanlar üretmek üzere yerel atölyelerde kullanılabilir. Örneğin; 3B yazıcı ile üretilen beşgen kalıp kullanılarak, ek bağlantı elemanları olmaksızın birbirine geçmeli birimler ile duvar sistemleri oluşturulabilir. Ayrıca, kalıp biçimine ve başlık hareketine bağlı olarak elde edilen girintiler üretilen biçimin yüzey alanını genişletmede ve görsel olarak ilgi çekici yüzey desenleri oluşturmada kullanılabilir. Bu tür bir kullanımda, bu araç Walker'ın da önerdiği (2011), lojistik maliyeti az, yereldeki malzemeyi ve yapma bilgisini kullanan küçük

ölçekli üretimin bir parçası olabilecektir. YEA'nın yerinde yapımda kullanımını içeren bu senaryo, literatürdeki yeniden-yapılandırılabilir araçlarda da tam anlamıyla gelişimi tamamlanmamış bir süreci temsil eder. Dağıtılmış İmalat Sistemleri'nin bir parçası olarak kullanılabilir olan bu araç merkezden uzak ve küçük yerleşimlerde üretimi destekleyebilir. Bu senaryoda, üretim kapasitesini artırabilmek için birden fazla aracın aynı anda kullanılması gerekebilir.

Diğer bir üretim senaryosu ise; bu aracın fabrikada ön üretimli bileşenler üretmek için kullanılmasıdır. Bu kullanımda, bir veya birden fazla yeniden-yapılandırılabilir araç motor ile ekstrüzyon yaparken yine motor ile kontrol edilen başlık mekanizması kontrollü bir çevrede üretim yapabilir. Bu senaryolar yeniden-yapılandırılabilir araçların ölçeklendirilebilir (scalability) özelliğine dayanır ve üretilen biçimin boyut ve miktarı ile kontrol sistemindeki değişikliklere göre aracın uyarlanabilmesine imkân verir. Dijital fabrikasyon araçlarından biri olan robot kolu, farklı uç efektörler aracılığıyla özelleştirilmiş iş akışları gerçekleştirebilir. YEA, literatürdeki çalışmalara dayanarak (Borg Costanzi ve diğ., 2018; Lim ve diğ., 2020) robot koluna entegre edilebilme potansiyeline sahiptir. Araç başlığına entegre edilebilen değiştirilebilir ve birleştirilebilir kalıplar sayesinde eklemeli bir üretim gerçekleştirilebilecektir.

Bu tezde, manuel yapım süreçlerindeki ortamsal ve araçsal dönüşüm ile inovasyonun, zanaat pratiğindeki kademeli gelişimde olduğu gibi mevcut araç ve yöntemlerden türetilerek gerçekleşme olasılığına odaklanılmıştır. Yerel ve küçük üretim mekanizmalarının da bu teknolojilerden faydalanmaları ile yeni ve öncü sistem geliştirme imkânını kaybetmeden daha sürdürülebilir üretimler yapabilmeleri mümkün olabilecektir. Dolayısıyla, geliştirilen sayısal tasarım ve fiziksel yapım süreci ile hesaplamalı tasarım düşüncesinin ve araçlarının yapıma dair bilgiyi dijital zanaat kapsamında dönüştürme potansiyeli ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- 3D printing technology – Delta versus Cartesian.** (t.y.). *Tractus3D*.
<https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/3d-printing-technology-delta-versus-cartesian>
- Adamson, G.** (2007). *Thinking through craft*. Berg.
- Aksnes, D. W., & Sivertsen, G.** (2019). A Criteria-based Assessment of the Coverage of Scopus and Web of Science. *Journal of Data and Information Science*, 4(1), 1-21.
- Al-Haddad, T.** (2008). Parametric Modulations in Masonry. *The 13th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 221-228.
- Allen, R. C.** (1983). Collective invention. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 4(1), 1-24.
- Alvarez, A.** (2016). *The Extruder*. Erişim tarihi 20.04.2021.<http://cargocollective.com/anton Alvarez/The-Extruder>.
- Aşut, S., Eigenraam, P., & Christidi, N.** (2018). Re-flex Responsive Flexible Mold for Computer Aided Intuitive Design and Materialization. *The 36th eCAADe Conference*, 1, 717-726.
- Avcı, E. O.** (2019). *People's Empowerment in Design Process Through Product Personalization for Sustainability* (Doktora tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bagdi, A., Bagdi, A., & Kalantari, S.** (2019). FLEXI-NODE: An Adaptive, Programmable Mould to Digitally Fabricate Grid Structures' Joints. *Proceedings of the 39th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 207-218.
- Battaglia, C. A., Miller, M. F., & Zivkovic, S.** (2019). Sub-Additive 3D Printing of Optimized Double Curved Concrete Lattice Structures. In J. Willmann, P. Block, M. Hutter, K. Byrne, & T. Schork (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* (ss. 242-255). Springer International Publishing.
- Baudisch, P., & Mueller, S.** (2017). Personal Fabrication. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 10(3-4), 165-293.
- Baumers, M., Dickens, P., Tuck, C., & Hague, R.** (2016). The cost of additive manufacturing: Machine productivity, economies of scale and technology-push. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 193-201.
- Bechthold, M.** (2007). Lightweight design—New directions. *Innovative Surface Structures: Technologies and Applications*, 2-15.

- Bechthold, M.** (2016). Ceramic prototypes-design, computation, and digital fabrication. *Informes de la Construcción*, 68(544), e167.
- Bell, B., Lab, T., Barnes, N., & Ede, A.** (2014). Casting Non-Repetitive Geometries with Digitally Reconfigurable Surfaces. *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 453-462.
- Bonanni, L., & Parkes, A.** (2010). Virtual Guilds: Collective Intelligence and the Future of Craft. *The Journal of Modern Craft*, 3(2), 179-190.
- Borg Costanzi, C., Ahmed, Z. Y., Schipper, H. R., Bos, F. P., Knaack, U., & Wolfs, R. J. M.** (2018). 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure. *Automation in Construction*, 94, 395-404.
- Bortolini, M., Galizia, F. G., & Mora, C.** (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 93-106.
- Carpo, M.** (2011). *The alphabet and the algorithm*. MIT Press.
- Celani, G.** (2012). Digital fabrication laboratories: Pedagogy and impacts on architectural education. In Williams K. (eds) *Digital Fabrication* (s. 469-482). Birkhäuser, Basel.
- Charak, V., & Sinha, A. K.** (2019). Divergent Linkage Reconfigurable Mould For Rapid Prototyping. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2903-2908.
- Chen, L., He, Y., Yang, Y., Niu, S., & Ren, H.** (2017). The research status and development trend of additive manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9-12), 3651-3660.
- Culver, R., Koerner, J., & Sarafian, J.** (2016). Fabric Forms: The Robotic Positioning of Fabric Formwork. In D. Reinhardt, R. Saunders, & J. Burry (Ed.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (ss. 106-121). Springer International Publishing.
- Çolakoğlu, B.** (2005). Design by Grammar: An Interpretation and Generation of Vernacular Hayat Houses in Contemporary Context. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(1), 141-149.
- D'Aveni, R.** (2015). The 3-D Printing Revolution. *Harvard Business Review*, May 2015. <https://hbr.org/2015/05/the-3-d-printing-revolution>
- de Azambuja Varela, P., & Sousa, J. P.** (2016). Reinforced, Reusable, Reconfigurable Molds for Cast Voussoirs. *Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 767-776.
- Dormer, P.** (1997). *The culture of craft*. Manchester University Press.
- Duarte, J. P.** (2005). Towards the mass customization of housing: The grammar of Siza's houses at Malagueira. *Environment and planning B: Planning and Design*, 32(3), 347-380.
- Echenagucia, T. M., Pigram, D., Liew, A., Van Mele, T., & Block, P.** (2019). A cable-net and fabric formwork system for the construction of concrete

shells: Design, fabrication and construction of a full scale prototype. *Structures*, 18, 72-82.

- Eigenraam, P.** (2013). *Flexible mould for double curved concrete elements*. (Yüksek lisans tezi), Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (CE), Netherlands.
- ElMaraghy, H. A.** (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17(4), 261-276.
- Engholt, J., & Pigram, D.** (2019). Tailored Flexibility. *Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 1, 53-62.
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G.** (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 22(2), 338-342.
- Ferguson, S., Siddiqi, A., Lewis, K., & de Weck, O. L.** (2007). Flexible and Reconfigurable Systems: Nomenclature and Review. *Volume 6: 33rd Design Automation Conference, Parts A and B*, 249-263.
- Frazier, W. E.** (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
- Galizia, F. G., ElMaraghy, W., ElMaraghy, H. A., Bortolini, M., & Mora, C.** (2019). The Evolution of Reconfigurable Molds. *Procedia Manufacturing*, 33, 319-326.
- Gershensfeld, N.** (2012). How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign Aff.*, 91, 43.
- Gibbs, D.** (2005). *Local economic development and the environment*. Routledge.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B.** (2010). Extrusion-Based Systems. In I. Gibson, D. W. Rosen, & B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies* (s. 160-186). Springer US.
- Gürsoy, B., & Özkar, M.** (2015). Visualizing making: Shapes, materials, and actions. *Design Studies*, 41, 29-50.
- Hallaam, E., & Ingold, T.** (2007). Creativity and cultural improvisation: An introduction. In *Creativity and cultural improvisation* (s. 1-24).
- Hauschild, M., Karzel, R., & Hellstern, C.** (2011). *Digital processes: Planning, design, production*. Birkhäuser; Edition Detail: Institut für internationale.
- Hawkins, W. J., Herrmann, M., Ibell, T. J., Kromoser, B., Michaelski, A., Orr, J. J., ... West, M.** (2016). Flexible formwork technologies—A state of the art review. *Structural Concrete*, 17(6), 911-935.
- Heisserman, J. A.** (1990). *Generative geometric design and boundary solid grammars*. Carnegie Mellon University. Engineering Design Research Center.

- Hu, S. J.** (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. *Procedia Cirp*, 7, 3-8.
- Ingold, T.** (2013). *Making: Anthropology, archaeology, art and architecture*. Routledge.
- Iwamoto, L.** (2013). *Digital fabrications: Architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press.
- Jokic, S., Lara, S. N., & Fashami, N.** (2012). *FabClay*. FabClay. <http://www.sasajokic.com/fabclay>
- Kalantar, N., & Borhani, A.** (2018). Informing Deformable Formworks-Parameterizing Deformation Behavior of a Non-Stretchable Membrane via Kerfing. *Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference, Tsinghua University*, 2, 339-348.
- Katterfeldt, E.** (2014). Maker culture, digital tools and exploration support for FabLabs. *FabLab: Of machines, makers and inventors*, 139-147.
- Keep, J.** (2013). *Self build Delta 3D printer*. http://www.keep-art.co.uk/Self_build.html
- Kelkar, A., Nagi, R., & Koc, B.** (2005). Geometric algorithms for rapidly reconfigurable mold manufacturing of free-form objects. *Computer-Aided Design*, 37(1), 1-16.
- Khabazi, Z., & Budig, M.** (2016). Cellular Concrete Casting Using Digital Moulds. *Proceedings of the 34th ECAADe Conference*, 1, 83-92.
- Khan, O.** (2008). Reconfigurable Molds as Architecture Machines. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 286-291.
- Kim, S.-J., Kim, J.-H. J., Yi, S.-T., Md Noor, N. B., & Kim, S.-C.** (2016). Structural Performance Evaluation of a Precast PSC Curved Girder Bridge Constructed Using Multi-Tasking Formwork. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(S3), 1-17.
- Kitchenham, B., & Charters, S.** (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*.
- Kleespies, H. S., & Crawford, R. H.** (1998). Vacuum forming of compound curved surfaces with a variable geometry mold. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(5), 325-337.
- Knight, T.** (2018). Craft, Performance, and Grammars. In J.-H. Lee (Ed.), *Computational Studies on Cultural Variation and Heredity* (s. 205-224). Springer Singapore.
- Knight, T., Sass, L., Griffith, K., & Kamath, A. V.** (2008). Visual-Physical Grammars. *SIGraDi 2008-Proceedings of the 12th Iberoamerican Congress of Digital Graphics*.
- Knight, T., & Stiny, G.** (2015). Making grammars: From computing with shapes to computing with things. *Design Studies*, 41, 8-28.

- Koc, B., & Thangaswamy, S.** (2011). Design and analysis of a reconfigurable discrete pin tooling system for molding of three-dimensional free-form objects. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(2), 335-348.
- Kohler, M., Gramazio, F., & Willmann, J.** (2014). *The robotic touch: How robots change architecture*. Park books Zurich.
- Kok, M.** (2013). *Textile reinforced double curved concrete elements*. (Yüksek lisans tezi), Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences (CE), Netherlands.
- Kolarevic, B.** (2003). Digital Fabrication: From Digital to Material, In Klinger, K., (Ed), Connecting>> The Crossroads of Digital Discourse: *Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, Indianapolis, 54-55.
- Kolarevic, B.** (2008). The (risky) craft of digital making. *Manufacturing material effects: Rethinking design and making in architecture*, 119-128.
- Kolarevic, B.** (2001). Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. *The Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, 268-278.
- Kontovourkis, O., Phocas, M. C., & Katsambas, C.** (2019). Digital to physical development of a reconfigurable modular formwork for concrete casting and assembling of a shell structure. *Automation in Construction*, 106, 102855.
- Koren, Y.** (2006). General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems. In A. I. Dashchenko (Ed.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories* (s. 27-45). Springer Berlin Heidelberg.
- Kostova, K., Ibell, T., Darby, A., & Evernden, M.** (2019). A Practical Approach to Fabric-Formed Concrete. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3.
- Kotsopoulos, S. D.** (2008). From design concepts to design descriptions. *International Journal of Architectural Computing*, 6(3), 335-360.
- Krstic, D.** (2001). Algebras and Grammars for Shapes and their Boundaries. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(1), 151-162.
- Krstic, D.** (2019). Grammars for Making Revisited. In J. S. Gero (Ed.), *Design Computing and Cognition '18* (s. 479-496). Springer International Publishing.
- Ku, K., & Chung, D.** (2015). Digital Fabrication Methods of Composite Architectural Panels for Complex Shaped Buildings. *Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 703-712.
- Ku, K., & Gurjar, S.** (2018). Prototyping Method for Complex-Shaped Textile Composite Panels-Developing a digitally controlled reconfigurable mold. *Proceedings of the 36th ECAADe Conference*, 47-52.
- Kudless, A.** (2011). Bodies in formation: The material evolution of flexible formworks. *Proceedings of the 31st Annual Conference of the*

Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 98-105.

- Lauerman, T.** (2014). *Open Source Shout Out (& my first D.I.Y. 3D printer)*. Tom Lauerman. <https://tomlauerman.com/blog/2014/8/24/first-attempt-diy-printer>
- Lee, D., Lee, S.-G., & Kim, S.** (2017). Composite Phase-Change Material Mold for Cost-Effective Production of Free-Form Concrete Panels. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(6), 04017012.
- Lim, J. H., Weng, Y., & Pham, Q.-C.** (2020). 3D printing of curved concrete surfaces using Adaptable Membrane Formwork. *Construction and Building Materials*, 232, 117075.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S.** (2015). Complex concrete structures. *Computer-Aided Design*, 60, 40-49.
- Loh, P., Leggett, D., & Prohasky, D.** (2019). Robotic Fabrication of Doubly Curved Façade System—Constructing intelligence in the digital fabrication workflow. *Proceedings of the 24th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*, 2, 521-530.
- Lopez, D., Charbel, H., Obuchi, Y., Sato, J., Igarashi, T., Takami, Y., & Kiuchi, T.** (2016). Human Touch in Digital Fabrication. *Proceedings of The 36th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, 383-393.
- Luckman, S.** (2013). The Aura of the Analogue in a Digital Age: Women's Crafts, Creative Markets and Home-Based Labour After Etsy. *Cultural Studies Review*, 19(1).
- MacLachlan, L., & Jowers, I.** (2016). Exploration of multi-material surfaces as weighted shapes. *Graphical Models*, 83, 28-36.
- Made@Eu.** (t.y.). <<http://madeat.eu/>>, erişim tarihi 04.10.2021.
- Martens, B., & Turk, Z.** (1999). Working experiences with a cumulative index on CAD:"CUMINCAD". *Proceedings of 17th ECAADe Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 327-333.
- McCullough, M.** (1996). *Abstracting craft: The practiced digital hand*. MIT Press.
- Miller, V.** (2011). *Understanding Digital Culture*. SAGE.
- Mitchell, W. J.** (2003). Design worlds and fabrication machines. *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis.
- Mitchell, W. J.** (1991). Functional grammars: An introduction. *Reality and Virtual Reality [ACADIA Conference]*, 167-176.
- Muslimin, R.** (2010). Parametric Fabrication for Traditional Ceramics: A Dialectical Integration of Traditional and CAD; CAM Methods in Computational Design. *SIGraDi 2010_Proceedings of the 14th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, Bogotá, Colombia, November 17-19, 2010*, 222-228.

- Mussi, S.** (t.y.). *Ceramic Dictionary—EXTRUDER (2) Manual to form coils for handle and applied decorating*. <<http://ceramicdictionary.com/en/e/252/extruder-a-manual>>, erişim tarihi 03.12.2020.
- Nervous System.** (2007). *Radiolaria App*. projects by Nervous System. <http://n-e-r-v-o-u-s.com/projects/index.php?/tags/algorithm/albums/radiolaria-app/>
- Niedderer, D. K.** (2009). Sustainability of the Crafts as a Discipline? *Making Futures. The Crafts in the Context of Emerging Global Sustainability Agendas (Proceedings)*, 1, 165-174.
- Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A.** (2012). Zero waste free-form formwork. *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, ICFF. CICM and University of Bath, Dept. of Architecture and Civil Engineering*, 30, 52.
- Open manufacturing.** (2020). *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Open_manufacturing&oldid=953303071>, erişim tarihi 03.12.2020.
- Oral, H., & Colakoglu, M. B.** (2020). Flexible tools in mould and formwork making: A review. *J. of Design Research*, 18(3/4), 173-195.
- Oral, H., & Colakoglu, M. B.** (2021). The reconfiguration of tool parameters in clay extruder. *Proceedings of the 39th eCAADe Conference*, 2, 161-170.
- Orr, D. W.** (2002). *The nature of design_ ecology, culture, and human intention*. Oxford University Press.
- Oxman, N.** (2007). Digital Craft Fabrication Based Design in the Age of Digital Production. *Workshop Proceedings for Ubicomp 2007: International Conference on Ubiquitous Computing*, 534-538.
- Oxman, R.** (2017). Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. *Design Studies*, 52, 4-39.
- Peek, N., & Moyer, I.** (2017). Popfab: A Case for Portable Digital Fabrication. *Proceedings of the Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '17*, 325-329.
- Peters, B.** (2014). 3D Printed Flexible Formwork. *The 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 517-522.
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M.** (2008). Systematic mapping studies in software engineering. *Proceedings of the 12th international conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 68-77.
- Pine, B. J., Victor, B., & Boynton, A. C.** (1993). Making mass customization work. *Harvard business review*, 71(5), 108-111.
- Piroozfar, P. A., & Piller, F. T.** (2013). *Mass customisation and personalisation in architecture and construction*. Routledge.
- Polanyi, M.** (1958). *Personal knowledge: Towards a post-critical philosophy*. Routledge.
- Polanyi, M.** (1966). The logic of tacit inference. *Philosophy*, 41(155), 1-18.

- Pye, D.** (1968). *The nature and art of workmanship*. University Press Cambridge.
- Raffaelli, R., Mandolini, M., & Germani, M.** (2010). Automation of flexible components virtual prototyping: Methodology, tools and validation. *J. of Design Research*, 8(3), 272.
- Rauch, E., Dallinger, M., Dallasega, P., & Matt, D. T.** (2015). Sustainability in Manufacturing through Distributed Manufacturing Systems (DMS). *Procedia CIRP*, 29, 544-549.
- Raun, C., & Kirkegaard, P. H.** (2015). Adaptive Mould—A Cost-Effective Mould System Linking Design and Manufacturing of Double-Curved GFRC Panels. *17th international congress of GRCA-GRC, Dubai*.
- Raun, C., & Kirkegaard, P. H.** (2012). Reconfigurable Double-Curved Mould. *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork*, 292-299.
- Resnick, M., Myers, B., Nakakoji, K., Shneiderman, B., Pausch, R., Selker, T., & Eisenberg, M.** (2005). *Design principles for tools to support creative thinking*.
- Roumeliotis, J. D.** (2015). *Mass Customization & Personalization: The Pinnacle of Differentiation and Brand Loyalty* | LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/mass-customization-personalization-pinnacle-brand-roumeliotis/>
- RPBW- Early Works.** (2021). <http://www.rpbw.com/project/early-works>
- Ruscitti, A., Tapia, C., & Rendtorff, N. M.** (2020). A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes. *Cerâmica*, 66(380), 354-366.
- Sabiescu, A., Woolley, M., Cummings, C., & Prins, J.** (2015). Online maker communities: Craft and engagement with cultural heritage. *Conference Communities and Technologies, Limerick, 27-30 June*.
- Sarafian, J., Culver, R., & Lewis, T. S.** (2017). Towards The Creation Of Programmable Matter. *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 522-533.
- Sass, L.** (2006). A Wood Frame Grammar: A Generative System for Digital Fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, 4(1), 51-67.
- Sass, L.** (2008). A physical design grammar: A production system for layered manufacturing machines. *Automation in Construction*, 17(6), 691-704.
- Sass, L.** (2009). Parametric Constructionist Kits: Physical Design and Delivery System for Rapid Prototyping Devices. *International Journal of Architectural Computing*, 7(4), 623-642.
- Scherer, A. L.** (2019). Concrete Form[ing]work: Designing and Simulating Parametrically-Patterned Fabric Formwork for Cast Concrete. *Blucher Design Proceedings*, 759-768.
- Schipper, H. R., & Eigenraam, P.** (2016). Mapping double-curved surfaces for production of precast concrete shell elements. *Heron*, 61(3), 211.

- Schipper, R., Grünewald, S., Eigenraam, P., Raghunath, P., & Kok, M.** (2014). Optimization of The Flexible Mould Process for The Production of Double-Curved Concrete Elements. *CIC 2014: The 1st Concrete Innovation Conference*.
- Schipper, R., & Janssen, B.** (2011). Manufacturing double-curved elements in precast concrete using a flexible mould: First experimental results. *Proceedings FIB Symposium, Concrete Engineering for Excellence and Efficiency*, 12.
- Schmitz, R.** (2014). Fabric-formed concrete: A novel method for forming concrete structures. In K. Mohammadian, K. Goulias, E. Cicek, J.-J. Wang, & C. Maraveas (Ed.), *Civil Engineering and Urban Planning III* (s. 183-189). CRC Press.
- Schmitz, R. P.** (2020). Fabric-Formed Concrete Structures: A Unique Way of Forming Concrete. *Structures Congress 2020*, 370-384.
- Sennett, R.** (2008). *The craftsman*. Yale University Press.
- Shaffer, M.** (2011). *High Tech / Low Tech: Tectonic Machines, Earth-Built Traditions, and Constructing The Exigent City*. 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Seoul, Korea.
- Shaffer, M.** (2017). Developing robotic formwork: Enhancing formwork mobility and variability through mechanization. *Construction Robotics*, 1(1-4), 77-83.
- Sheil, B.** (2013). De-Fabricating Protoarchitecture. In M. Stacey (Ed.) *Prototyping Architecture: The Conference Paper*. (s.372-390). Riverside Architectural Press,
- Singh, V., & Gu, N.** (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design studies*, 33(2), 185-207.
- Stein, J. G., & Swaine, M.** (2012). *Holes in a Line—Componetry and Perforation Advanced Studio*. <http://radical-craft.com/Publication-Holes-In-a-Line-1>.
- Stiny, G.** (1980). Kindergarten grammars: Designing with Froebel's building gifts. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 7(4), 409-462.
- Stiny, G., & Gips, J.** (1971). Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture. *IFIP Congress* (2), 2(3), 125-135.
- Stiny, G., & Mitchell, W. J.** (1978). The Palladian grammar. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 5(1), 5-18.
- Tessmann, O., & Mehdizadeh, S.** (2019). Rotoform: Realization of hollow construction elements through roto-forming with hyper-elastic membrane formwork. *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, 1-7.
- Trumer, P.** (2011). Associative design: From type to population. İçinde *Computational design thinking: Computation design thinking* (ss. 179-194). Wiley AD Reader.

- URL-1** <<https://www.designboom.com/readers/fabclay-robotic-additive-manufacturing-processes/>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-2** <<https://www.lathezone.com/lathe-vs-mill/>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-3** <<http://www.haute-innovation.com/en/magazine/innovativeproduction/incremental-sheet-metal-forming.html>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-4** <<http://acadia.org/papers/FYW2G2>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-5** <<https://adapa.dk.prolinux7.curanetserver.dk/kwi-part-1/>>, erişim tarihi 04.12.2020.
- URL-6** <<https://www.scarva.com/en/Bailey-9-Extruder-Including-Standard-Die-Kit/m-6533.aspx>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-7** <<https://i.pinimg.com/originals/c1/38/3c/c1383c09abb42239c443eb31ead11072.jpg>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-8** <<https://i.pinimg.com/originals/d3/dd/bc/d3ddbccc3600ac7d6dd7426d11d6202e2.jpg>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-9** <<https://potterylabpro.com/best-pottery-sculpey-polymer-clay-extruders-ceramic-review/#it1>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-10** <<https://tiranti.co.uk/products/hand-held-clay-extruder-dies-blanks/>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- URL-11** <<https://www.joom.com/en/products/1516258262002216491-237-1-26193-1500141580>>, erişim tarihi 09.07.2021.
- Väänänen, N., & Pöllänen, S.** (2020). Conceptualizing Sustainable Craft: Concept Analysis of Literature. *The Design Journal*, 23(2), 263-285.
- van Herpt, O.** (2014). *Functional 3D Printed Ceramics*. <https://oliviervanherpt.com/functional-3d-printed-ceramics/>
- Vollertsen, F., Sprenger, A., Kraus, J., & Arnet, H.** (1999). Extrusion, channel, and profile bending: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1), 1-27.
- Von Hippel, E.** (2001). User toolkits for innovation. *Journal of Product Innovation Management: An International Publication Of The Product Development & Management Association*, 18(4), 247-257.
- Walker, S.** (2006). *Sustainable by design: Explorations in theory and practice*. Routledge.
- Walker, S.** (2011). *The spirit of design: Objects, environment and meaning* (Sayı 1). Earthscan publications.
- Walter-Herrmann, J., & Buching, B.** (2014). Notes on fablabs. *FabLab: of Machines, Makers and Inventors*. Transcript Verlag, Bielefeld, 9-23.
- Warburton, A.** (2016). *Innovation through craft: Opportunities for growth*. 49.
- Weston, M.** (2013). CNC Sponge-Forming and Parametric Slip Casting: Experiments in the hybridization of computation and traditional craft for architectural ceramics, *ACADIA 13: Adaptive Architecture*, 455-456.
- Woodbury, R.** (2010). *Elements of parametric design*. Routledge.

- Woolley, M.** (2011). Beyond control: Rethinking industry and craft dynamics. *Craft Research*, 2(1), 11-36.
- Yabanigül, M. N., & Yazar, T.** (2021). Production of Gyroid-like modular systems with non-linear robotic hotwire cutting. *Automation in Construction*, 126, 103671.
- Yang, X., Loh, P., & Leggett, D.** (2019). Robotic variable fabric formwork. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 404-413.
- Yin, Y., Stecke, K. E., & Li, D.** (2018). The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 848-861.





EKLER

EK A: Üretilen biçimlerin değerlendirilmesi.

EK B: Ekstrüzyona dayalı biçim grameri ve değerlendirme için yazılmış GH kodu.



EK A: El ve makine ile üretilen biçimlerin karşılaştırılması.**Çizelge A.1 : EA ve YEA ile üretilen biçimlerin karşılaştırılması.**

	Kontrol türü ve kurallar		Kalıp ve kesit alanı (mm ²)	Süre (s)	Açı (°)	Yüzey sapması (mm)	Eğilme açısı (°)	Orta nokta sapması (mm)
(a)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	Kare: 36	32		0,74	2,97 °	1,12
(b)	Hibrit	Doğrusal ekstrüzyon	Kare: 36	8		1,41	9,57 °	0,30
(c)	Manuel	Sürekli döndürme	Kare: 36	34,4	45 °	0,48	0,82 °	1,59
(d)	Hibrit	Sürekli döndürme	Kare: 36	12,7	45 °	0,99	9,71 °	0,42
(e)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	3-daire: 50,8	44		0,28	2,38 °	0,23
(f)	Hibrit	Doğrusal ekstrüzyon	3-daire: 50,8	10,8		0,24	1,45 °	0,18
(g)	Manuel	Sürekli döndürme	3-daire: 50,8	47,2	60 °	0,52	1,21°	0,66
(h)	Hibrit	Sürekli döndürme	3-daire: 50,8	13,6	60 °	0,49	2,01 °	0,16
(i)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	Yıldız: 30	26,6		0,55	7,5 °	2,01
(j)	Hibrit	Doğrusal ekstrüzyon	Yıldız: 30	6,7		1,06	14,43°	0,6
(k)	Manuel	Sürekli döndürme	Yıldız: 30	28,7	15 °	0,57	3,46°	1,52
(l)	Hibrit	Sürekli döndürme	Yıldız: 30	11,3	15 °	1,13	4,18°	1,08

Çizelge A.2 : Ekstrüzyona dayalı yapım gramerinin değerlendirilmesi.

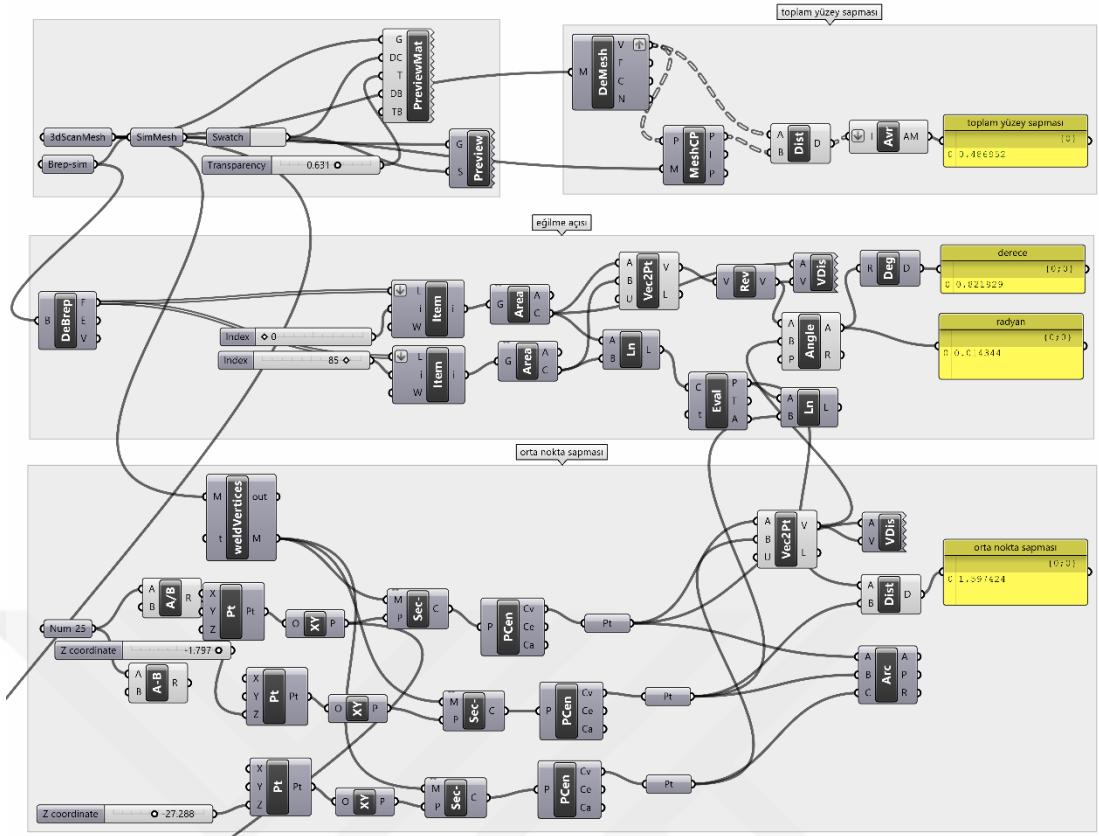
	Kontrol türü ve kurallar		Kalıp ve kesit alanı (mm ²)	Süre (s)	Açı (°)	Yüzey sapması (mm)	Eğilme açısı (°)	Orta nokta sapması (mm)	Açısal sapma (°)
(a)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	Kare: 36	32		0,74	2,97 °	1,12	
(b)	Manuel	Sürekli döndürme	Kare: 36	34,4	45 °	0,48	0,82 °	1,59	1,31 °
(c)	Manuel	Kademeli döndürme	Kare: 36	48	90 °	7,33	2,42 °	0,89	16,29 °
(d)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	3-daire: 50,8	44		0,28	2,38 °	0,23	
(e)	Manuel	Sürekli döndürme	3-daire: 50,8	47,2	60 °	0,52	1,21 °	0,66	15,7 °
(f)	Manuel	Kademeli döndürme	3-daire: 50,8	66	15 °	7,05	0,45 °	0,46	10 °
(g)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	Yıldız: 30	26,6		0,55	7,5 °	2,01	
(h)	Manuel	Sürekli döndürme	Yıldız: 30	28,7	15 °	0,57	3,46 °	1,52	10,33 °
(i)	Manuel	Kademeli döndürme	Yıldız: 30	39,6	15 °	7,73	4,97 °	3,50	4,26 °
(j)	Manuel	Doğrusal ekstrüzyon	Beşgen: 76,89	64		0,533	4,04 °	0,48	
(k)	Manuel	Sürekli döndürme	Beşgen: 76,89	69		0,62	2,49 °	1,51	0,13 °

Çizelge A.3 : Kural seti, kalıp ve sapma değerleri ilişkisi.

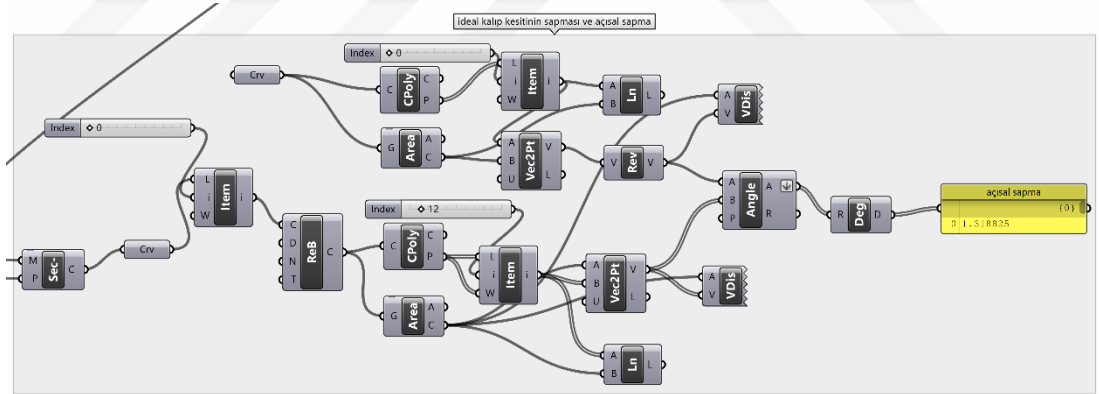
	Yüzey Sapması (mm)	Eğilme Açısı (°)	Orta Nokta Sapması (mm)	Açısal Sapma (°)
Toplam	2,40	2,97	1,33	8,29
Doğrusal Ekstrüzyon	0,53	4,22	0,96	N/A
Sürekli Döndürme	0,55	2,00	1,26	6,87
Kademeli Döndürme	4,26	2,61	2,20	10,18
Kare	2,85	2,07	1,20	8,80
3-daire	2,62	1,35	0,45	12,85
Yıldız	2,95	5,31	2,34	7,30
Beşgen	0,575	3,26	0,48	0,13

121





Şekil B.2 : Toplam yüzey sapması değerinin ve eğilme açısının hesaplanması.



Şekil B.3 : Orta nokta sapması, ideal kalıp kesiti ve açısal sapmanın hesaplanması.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hülya Oral Karakoç

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Programı
- **Doktora** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2015'ten bu yana serbest mimarlık yapmaktadır.
- 2011-2015 yılları arasında çeşitli mimarlık ofislerinde çalışmıştır.
- 2014 yılında 'Ya Sonra' isimli Arkitera Gelecek Hikayeleri Yarışması kapsamında basılan kitapta 'Sınırsız Kent' isimli öyküsü ile yer almıştır.
- 2015 yılında YTONG Fikir yarışmasında Eşdeğer ödül kazanmıştır.
- 2015 yılında X. MSTAS Sempozyumunda 'En İyi Sunum' ödülü kazanmıştır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Oral, H. & Çolakoğlu, M.B.** (2021). The reconfiguration of tool parameters in clay extruder. In *Proceedings of eCAADe 2021: The 39th eCAADe: Towards a new, configurable architecture*. Novi Sad, Serbia, s.161-170.
- **Oral, H. & Çolakoğlu, M.B.** (2020). 'Flexible Tools in Mould and Formwork Making: A Review'. *J. of Design Research* 18 (3/4), s.173-195, Doi:10.1504/JDR.2021.10038074.
- **Oral, H. & Çolakoğlu, M.B.** (2021). The reconfigurable tool design for extrusion-based components in digital craft. (Hakem değerlendirmesinde).

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Karakışla, A., Kadakal, B., Özmen, D., Korkmaz, E., Deniz, İ., Kavaf, S., & **Oral, H.** (2020). MYCO-HILLS: Mycelium-Based Building Blocks. *MATERIART: Art and Science of Materiality in Architectural Design Education*. ISBN: 978-989-658-668-3.

- **Oral, H.** (2019). *Hello Robot: Bilimkurgudan Esinlenen Gerçeklik*. Eds. Karol, E., Manifold Press. <https://manifold.press/hello-robot-bilimkurgudan-esinlenen-gerceklik>.
- Erten, C., & **Oral, H.** (2019). Modular Making in Ceramics: Imitation to Improvisation. *Materiality as a Process*, Lisbon, Portugal, s. 313-324. DOI: 10.30618/978-989-658-557-0.
- Gündüz, G., **Oral, H.**, & Yazar, T. (2018). Integration of Design Geometry with “Computational Making” in Basic Design Studio: A Case Study of Lanterns Project. *36th eCAADe Conference- Volume 2*, s.439-448.
- **Oral H.** (2018). Evrimsel Ağ Sistemleri: Açık Ofis Plan Organizasyonu için Topolojik bir Model Önerisi (Evolutionary Network Systems: A Topological Model for Open Office Plan Organization), *XII. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*, pp.235-246.
- **Oral, H.** & Çağdaş, G. (2017). Body Patterning: A Model for Responsive and Interactive Building Envelope. *17. CAAD Futures Conference*, s.164-179.
- **Oral, H.** & Karakoç E. (2015). Interactive Structures in Nature Inspired Design. *18. Generative Art Conference*, p.48.
- Karakoç E. & **Oral, H.** (2015). *A Creative Code Proposal for Technologic Art: "Computational Artist"*. Poster. Exhibited in Gallery at Bevilacqua La Masa Foundation, Venice, Italy.
- **Oral, H.**, & Karakoç E. (2015). Doğadan Esinli Tasarımda Etkileşimli Strüktürler. *IX. Mimarlıkta Sayısal Tasarım Ulusal Sempozyumu*, s.157-168.
- **Oral, H.** (2014). “Sınırsız Kent”, *Ya Sonra- 17 Gelecek Öyküsü*, Eds. Kılıç, S., Alef Yayınevi, İstanbul, s. 119-127.