

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN
BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berfin Aybike KÖRÜKCÜ

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

EYLÜL 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN
BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Berfin Aybike KÖRÜKCÜ
(523201004)**

Bilişim Anabilim Dalı

Mimari Tasarımda Bilişim Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER

EYLÜL 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE
ENGINEERING AND TECHNOLOGY

**A FRAMEWORK PROPOSAL FOR NATURAL STONE PROCESSING
WITH ROBOTIC ARM**

M. Sc. THESIS

Berfin Aybike KÖRÜKCÜ
(523201004)

Department of Informatics

Architectural Design Computing Program

Thesis Advisor: Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER

SEPTEMBER 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 523201004 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Berfin Aybike KÖRÜKCÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Sema ALAÇAM**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Ü. A. Kumsal ŞEN BAYRAM

Maltepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Eylül 2023

Savunma Tarihi : 20 Eylül 2023

Dedeme,

ÖNSÖZ

Öncelikle, lisans hayatımdan başlayarak yüksek lisans ve tez sürecimde yol göstericiliği ve değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Sinan Mert ŞENER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Yalnızca akademik hayatımdaki ilham veren fikirleri ve sonsuz desteği için değil, hayat boyu mentorluğu ve dostluğu için Dr. Asena Kumsal ŞEN BAYRAM'a minnettarım. Bu tez onsuz yazılamazdı.

Yüksek lisans ders ve tez sürecim boyunca yapıcı yorumları için değerli jüri üyesi Doç. Dr. Sema ALAÇAM'a ve tezimin mihenk taşı diyebileceğim bilgi birikimini tüm samimiyetleriyle aktaran Gürmas Gürel Makina ailesine ve Ahmet GÜREL'e teşekkür ediyorum.

Verdiğim her kararda arkamda duran annem Ceyda CORUK'a, büyük bir özveri ile bizi yetiştiren anneannem Hatice CORUK'a ve bir kardeşe sahip olmanın en iyi hali olan Deniz KÖRÜKCÜ'ye beni sonsuz sevmelerinden ötürü ben de sonsuz sevgimi iletiyorum.

Son olarak, bu tezi ithaf ettiğim canım dedem Ahmet CORUK'u, müthiş bir insan ve inanılmaz bir baba olmasının yanı sıra bugünkü akademik hayatımın temellerinin atılmasında bitmeyen desteğiyle en büyük etken olmasından dolayı sonsuz sevgi ve özlemlerle anıyorum.

Eylül 2023

Berfin Aybike KÖRÜKCÜ
(Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1.GİRİŞ	1
1.1.Tezin Amacı	4
1.2.Tezin Kapsamı.....	7
1.3.Tezin Yöntemi	9
2.ROBOTİK FABRİKASYON	11
2.1.Dijital Fabrikasyonun Kısa Tarihçesi.....	12
2.2.Mimarlıkta Dijital Fabrikasyon Düşüncesi	17
2.3.Robotik Fabrikasyon.....	21
3.ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME	25
3.1.Doğal Taş İşleme.....	25
3.2.Robot Kol İle Eksiltmeli Üretim.....	30
3.2.1.Simülasyon	31
3.2.2.Robot kol ile doğal taş işleme.....	32
4.ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ .39	
4.1.Araştırma Kurgusu	39
4.2.Alan Çalışması	46
4.2.1.Alan çalışması I: geometrik detay odaklı	46
4.2.2.Alan çalışması II: operasyon odaklı	53
4.3.Alan Çalışması Bulgularının Değerlendirilmesi	59
5.SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	75

KISALTMALAR

CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
CNC	: Computer Numeric Control
NC	: Numeric Control

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Marmara beyazı ve dolomit malzemelerin sertlik ve yoğunluk farkına göre işleme hızı değişimleri.	41
Çizelge 4.2: Simülasyon girdileri.	47
Çizelge 4.3: Simülasyon bulguları.	49
Çizelge 4.4: Yüzey alanı ve detay seviyesinin süre ile korelasyon değerleri.	50
Çizelge 4.5: A4 ve A3' geometrilerinin yüksek değer karşılaştırması.	52
Çizelge 4.6: A4 ve A1' geometrilerinin yüksek değer karşılaştırması.	52
Çizelge 4.7: Alan Çalışması II'de elde edilen değerler.	55

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Sağ, Gemi Endüstrisi. RMS Olympic, 1911 (URL-5). Sol, Tekstil. Pacific Mills. Barber-Colman Yüksek Hızlı Çözümlü Makinesi, 1937 (URL-6)	12
Şekil 2.1: Sol üst, Delikli kart (URL-7). Sağ üst, Jakarlı dokuma tezgahında kullanılan delikli kartlar (URL-8). Sol alt, James Watt Buhar Makinesi (URL-9). Sağ alt, John Wilkinson Büküm Makinesi(URL-10)	13
Şekil 2.2: CNC tezgahı ile üretilen alüminyum kül tablası, MIT Servo Mekanizma Laboratuvarı, 1959 (URL-12)	14
Şekil 2.3: Sol, Ivan Sutherland Sketchpad kullanımı (URL-13). Sağ, ışıklı kalem ile Sketchpad kullanımı (URL-14)	15
Şekil 2.4: Sol, ilk SLA 3boyutlu yazıcı teknolojisi (URL-15). Sağ, üretilen ilk parçalardan biri (URL-16)	16
Şekil 2.5: Sol CNC frezeleme, orta 3B yazıcı, sağ CNC büküm	16
Şekil 2.6: Disney Konser Salonu, Frank Gehry, 1989. (URL-17)	19
Şekil 2.7: Sol, DFAB HOUSE gece görünüşü. Fotoğraf, Roman Keller. Sağ, DFAB HOUSE iç mekan, serbest biçimli kalıp duvarlar akıllı döşemeyi destekliyor. Fotoğraf, Roman Keller. (URL-18)	20
Şekil 2. 8: Sol, 6-eksenli robot kol sistemi. Orta, taşıyıcı bant üzerine yerleştirilmiş robot kol. Sağ, döner tabla kullanımı.	22
Şekil 3.1 : Sol Partenon, Atina Yunanistan, MÖ 5. Yüzyıl (URL-19). Sağ Rodia Stone House, Nikos Smyrli Architects, (URL-20)	26
Şekil 3.2 : Sol, Delas Frères Şarap Evi, New Stone Agent şovunda gösterildi. Svenstedt Architect, Fotoğraf: Carl Fredrik (URL-21). Sağ, Stone House / Malik Architecture (URL-22)	27
Şekil 3.3: Sol, taş yüzeyinde çizilen yol boyunca parçalar koparılarak eksiltilmesi. (URL-23). Sağ, kaba işleme için kullanılan araçlar (URL-24)	28
Şekil 3.4: Günümüzde kullanılan aletler (URL-25)	29
Şekil 3.5 : Döner tablaya sabitlenmiş mermer parçanın işlenmesi	31
Şekil 3.6: Karmaşık kubbe geometrisi için stereotomik çalışma (Rippmann, M., & Block, P., 2011)	33
Şekil 3.7: Üst, 7 eksenli robot ile işleme süreci. Alt, işlenmiş parçalar ve prototip (Fernando ve diğ. 2019)	34

Şekil 3.8 : İşlenen geometri, dijital ve fiziksel takımyolu (Shaked ve diğ. 2020)	35
Şekil 3.9 : Taranarak yüzey geometrisi oluşturulan model(sol), işlenmiş malzeme(sağ) (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).....	35
Şekil 3.10 : Dijital Taş Projesi dijital model (sol), işlenmiş parça (sağ) (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).....	36
Şekil 4.1: Araştırma kurgusu akışı.	40
Şekil 4.2: Solda: Gürmal Gürel üretimi Marmara beyazı mukarnas; Sağ üst: Marmara beyazı mermer; Sağ alt: Beyaz dolomit.....	41
Şekil 4.3: Kuka KR210 ve döner tabla ile 7 eksenli üretim kurulumu.	42
Şekil 4.4: Modelin döner tablaya yerleştirilme aşamaları.....	43
Şekil 4.6: Uç seçme aşamaları.....	44
Şekil 4.7: Hatasız hesaplanan operasyonların simülasyonu.....	45
Şekil 4.8: Alan çalışmaları akış ve kapsamı. K1 ve 2 kaba işleme operasyonlarını, I 1- 2-3 ince işleme operasyonları ifade etmektedir.	45
Şekil 4.9: Alan çalışmaları araştırma odakları.	46
Şekil 4.10: Deney geometrilerinin ilişkisi.....	46
Şekil 4.11: Sol üst: 7 eksenli döner tablalı işleme kurgusu; Sağ üst: Kaba su yolu işleme aşamaları; Alt: işleme aşamaları.	48
Şekil 4.12: Sabit yüzey alanında yüzey adedi (detay seviyesi) -süre ilişkisi.	49
Şekil 4.13: Değişken yüzey alanında yüzey adedi-süre ilişkisi.	50
Şekil 4.14: Üst: Yüzey alanı-süre ilişkisini gösteren grafik; Alt: Detay seviyesi-süre ilişkisini gösteren grafik.	51
Şekil 4.15: Sinüs eğrileri ile oluşturulan B1-2-3 geometrileri.	53
Şekil 4.16: Alan çalışması II kapsamında tercih edilen operasyonlar (URL-26).....	54
Şekil 4.17: B1-2 ve 3 geometrilerinin farklı taşlar ve operasyonlara göre analizi.....	56
Şekil 4.18: B1-2 ve 3 geometrilerinin farklı operasyonlara göre analizi.	57

ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ

ÖZET

Tez çalışması, robot kol ile taş işlemede endüstriyel örtük bilgidен destek alan bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır. Robot kol ile doğal taş işleme süreci gerçek zamanlı bir programlama ortamında simüle edilerek, malzeme, form ve operasyonların karmaşık etkileşimlerini sanal olarak prototipleye bilmek hedeflenmiştir. Sonuç olarak, bu tez çalışması, robot kol ile doğal taş malzemenin işleme sürecini araştırarak tasarımcıların, bu alanda yetkinlik kazanmalarını desteklemeyi ve mimari tasarımda doğal taş malzeme kullanımına dair yeni fırsatları keşfetmelerini amaçlamaktadır.

Tezin ilk bölümünde çalışmanın konusu, amacı, kapsamı ve yöntemi detaylı olarak açıklanmıştır. Özellikle dijital fabrikasyon araçlarının ve düşüncesinin mimari tasarım ve üretim süreçlerini kökten değiştirmiş olduğunun üzerinde durularak, 3 eksenli sac ayağı (malzeme-yazılım-donanım) kurgusuna uygun olacak şekilde, odaklanılacak malzeme olarak seçilen doğal taş malzeme ve uygulama alanı olan mimari tasarım çözümlenmesine dair sorular bu bölümde cevaplanmıştır.

İkinci bölümde, dijital fabrikasyon araçlarının tarihi gelişiminden başlayan ve bu gelişimi mimari tasarım alanındaki hesaplamalı tasarım düşüncesiyle birleştiren bir anlatım yer almaktadır. Bu kurguyu destekleyen nitelikte mimari tasarım alanındaki dijital fabrikasyon örneklerinden bahsedilmiştir. Ardından anlatımın araştırmanın konusu olan robotik fabrikasyona doğru genişlemesiyle, robot kolların bu gelişim sürecindeki yeri ve mimarlık ile olan ilişkisi belirlenmiş, çalışma mekanizmaları, yetenekleri ve kapasiteleri incelenmiştir.

Araştırmanın üçüncü bölümü, araştırma konusunu desteklemek amacıyla doğal taş işleme ile başlamıştır. Araştırma yöntemini oluşturan simülasyon aracından bahsedilmiştir. Ardından robotik fabrikasyona dair gelişmelerin taş işleme ile kesiştiği örnekler incelenmiş ve çalışmanın literatürdeki yerini vurgulayan bir derleme sunulmuştur. Çalışmaların genelinde, doğal taş malzeme ile robotik işleme tekniklerini sistematik olarak sınıflandıran ve yapı sökümüne uğratan hesaplamalı araştırma sayısının oldukça az olduğu keşfedilmiştir.

Dördüncü bölümde, araştırmanın amacı olan alan çalışmaları geliştirilmiştir. Simülasyonu merkez alan çerçeveye temel olacak bir veri seti elde etmek için alan çalışması, çıktıları birbiri ile ilişkili olarak yorumlanabilecek iki bölümden kurgulanmıştır. Birinci alan çalışmasında, basit geometride detay artışı ve işlem süresi arasındaki ilişkiye odaklanılırken, ikincide, karmaşık geometrielerde malzeme, operasyon ve işlem süresi ilişkileri araştırılmıştır.

Geleneksel taş işleme süreçlerine benzer olarak robot kol ile taş işlemeciliğinin, hem taşın doğasındaki homojen olmama durumundan kaynaklanan uzmanlık ve deneyim gerektiren bir beceri gerektirmesiyle hem de araştırma alanındaki eksiklikler nedeniyle örtük bilgi şeklinde aktarım olduğu sonucuna varılmasıyla, bu örtük bilginin elde edilmesi için Gürmas Güral firmasının uzmanları ile görüşmeler yapılmıştır. Yapılan görüşmeler sonucu malzeme ve sürece ilişkin araştırma soruları ilave katmanlarla derinleşmiştir. Ayrıca, gerek tezin araştırmaları ve uzman görüşmeleri sırasında sağladıkları geniş imalat olanakları, gerekse uzman bilgilerini test etmek için onların üretim alanının kullanılmasının yöntem olarak doğru olması sebepleriyle, Afyon Gürmas Gürel üretim alanında bulunan 6 eksenli Kuka robot kol ve tezgah düzeni (döner tezgah ve sabit tezgah) araştırmanın kapsamına dahil edilmiştir. Robot hareketini simüle etmek ve robotun çalışması için takım yolunu oluşturmak amacıyla, endüstriyel robot kollarını ve CNC freze makinelerini kontrol etmek üzerine bir program olan SprutCAM programı kullanılmıştır. Çalışmanın malzeme ayağında bahsedilen örtük bilgidен gelen dolomit ve marmara beyazı mermerleri yer almaktadır. Bölüm sonunda bulgular değerlendirilmiştir.

Son bölümde, sonuç ve öneriler üzerine genel bir değerlendirme sunulmuştur. Tez, kapsamı dahilinde geniş bir literatür araştırması ile başlamış olmasına karşın, robotik fabrikasyon süreçlerinin malzeme, yazılım ve donanım ekseninde her bir kriterde ayrı ayrı alt başlıklara ayrılacak geniş bir havuz olduğu unutulmamalıdır. Çalışma hedef ve gizli amaçları ile literatürde genişlemeye müsait ve çok temaslı bir yer tutmaktadır.

A FRAMEWORK PROPOSAL FOR NATURAL STONE PROCESSING WITH ROBOTIC ARM

SUMMARY

The thesis aims to provide a framework for industrial tacit knowledge-supported stone processing with a robotic arm. Real-time programming environment for stone processing with a robotic arm has been simulated to prototype the complex interactions between materials, forms, and operations virtually. This research is expected to expand the existing solution space and contribute to the literature on robotic fabrication in the field. Consequently, this thesis seeks to support designers in gaining competence in stone processing with a robotic arm and exploring new opportunities in architectural design using natural stone materials.

Digital fabrication methods have created a versatile environment for theoretical and applied research, becoming effective in all scales and stages of architectural processes. The precision and adaptability of industrial robotic arms in complex and extensive production lines have made them ideal tools for digital fabrication in architectural design. The advent of industrial robot arms in the field of architectural design and production has brought about various research topics such as automating actions, improving process quality, optimizing operations, and enhancing precision. Robot arms, equipped with specialized end-effectors for processing different materials, offer advantages for both the industry and designers, enabling high precision and repeatability at a speed beyond human capabilities.

The development of digital design and production methods in architecture has also paved the way for the digitalization of natural stone processing applications. Digital Fabrication methods are effective at all scales and stages of architectural processes. Integrating robotic fabrication into traditional areas like stone carving can increase the production scale without compromising geometric complexity. In subtractive methods, which is one of the digital fabrication methods, the material is shaped by subtracting parts from the main whole by cutting or milling. Processing with a robot arm is a subtractive production type, such as traditional stone carving. The process consists of the tool attached to the robot arm moving on the block. Along the path followed by the tool, the material is shaped by subtracting it according to the thickness, shape, step distance, progress speed, adjusted depth, and axis. In general, stone processing consists of two steps: rough processing, which removes the material roughly layer by layer, and fine processing, where the tool precisely processes the remaining part to achieve surface finishing. The initial rough processing cuts to a certain depth from the outside of the surface. This leaves a very rough surface. Subsequent milling is done with smaller tools to mill the remaining stone. The size

of the tools directly influences the depth of cutting, and the machine must move slowly to prevent overloading and breaking the tool.

The design of this production process creates a relationship between time and quality. At this point, simulation can be used to design the process based on the production tool before production and to provide feedback on the produced form by measuring it to the digital model after production. However, limited computational research specifically focused on stone materials, categorizing and simulating robotic processing techniques. The cost of tooling and the risk of breakage when performing intensive milling operations on hard materials like stone are the primary reasons for the focus on softer materials like wood, foam, clay, and concrete. This situation creates a notable research area in the literature. To address the complexity and multidimensionality of this process, it is essential to formulate the solution space with visually definable rules based on combinations of components and functions that the designer has control over during production.

The first section of the thesis extensively discusses the subject, purpose, scope, and methodology of the study. It emphasizes the transformative impact of digital fabrication tools and thinking on architectural design and production processes, focusing on the triad of material-software-hardware. It also addresses questions regarding the selected natural stone material and its application area within this framework.

The second section traces the historical development of digital fabrication tools, merging this development with computational design thinking in the field of architecture. It presents examples of digital fabrication in architecture that support this narrative. The evolution of robotic arms within this context and their relationship with architecture is then identified, with an examination of their mechanisms, capabilities, and capacities.

The third section commences with stone processing to support the research topic. The simulation tool that forms the research method is discussed, followed by an examination of examples where developments in robotic fabrication intersect with stone processing, accompanied by a review of the literature highlighting the research's place within it. Throughout the studies, it is discovered that there is a limited amount of computational research systematically classifying and deconstructing stone processing techniques with robotic arms.

In the fourth section, field studies are conducted to develop the foundation for the research. These studies are structured into two parts that produce a dataset central to the simulation-based framework. The first part focuses on the relationship between detail increase and processing time in simple geometry, while the second explores the relationships between material, operation, and processing time in complex geometries.

Given that stone processing with a robotic arm, similar to traditional stone processing, requires both expertise and experience due to the non-homogeneous nature of stone, and due to the research field's gaps in knowledge transfer, consultations with experts from Gürmas Gural company were conducted to acquire implicit knowledge. These consultations deepened the research questions related to

materials and processes. Furthermore, the inclusion of Gürmas Gürel's production facility, equipped with a 6-axis Kuka robotic arm and machining setups (rotary and fixed tables), was deemed appropriate for methodological reasons, as they provided extensive manufacturing capabilities and an opportunity to test expert knowledge. The SprutCAM program was used to simulate robot movement and create toolpaths for the robot's operation, controlling industrial robot arms and CNC milling machines. The materials involved in this study, derived from implicit knowledge, include dolomite and Marmara white marble. The section concludes with an evaluation of the findings.

In the final section, a comprehensive assessment is presented on the results and recommendations. Despite starting with an extensive literature review within its scope, the thesis acknowledges that the realm of robotic fabrication processes is vast, with individual criteria for material, software, and hardware that can be further subdivided into subtopics. The study, with its objectives and implicit goals, occupies a versatile and multi-faceted space in the literature.

1.GİRİŞ

Mimarlıktaki sayısal gelişmeler, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren sadece tasarım düşüncesi, araçları ve yöntemlerini etkilemekle kalmayıp, üretim tekniklerinin de dosyadan-üretim bir anlayışla dönüşümünü sağlamıştır (Gershenfeld, 2012; Carpo, 2013). Bu sayısallaşma, bilgisayar destekli tasarım (Computer-Aided Design, CAD) araçları ile sayısal temsil ve tasarımda başlayıp, bilgisayar destekli üretim (Computer- Aided Manufacturing, CAM) araçları ile fiziksel üretimde sonuçlanan bir sürecin mimari tasarıma dahil olmasını ifade etmektedir (Shaked ve diğ, 2020). Dijital fabrikasyon adı verilen bu üretim yöntemleri, teorik ve uygulamalı araştırmalar için çok yönlü ve disiplinlerarası bir ortamın oluşmasını sağlayarak, mimari süreçlerin tüm ölçek ve aşamalarında etkili hale gelmiştir. Çok disiplinli çalışma ve üretme süreçleri, hesaplamalı tasarım kültürünün mimari tasarım alanında kullanımının (Davis ve Peters 2013), mimarlık okullarında sayısal tasarım ve üretim atölyelerinin sayısının (Gramazio ve Kohler 2014), konuya ilişkin konferansların (Brell-Cokcan ve Braumann 2013) ve dijital fabrikasyona özgü araçların bilinirliğinin (Schwartz 2013) artışı sağlamıştır. 3 boyutlu baskı makinaları ve lazer kesiciler bir anlamda demokratikleşerek üretim için herkesin erişebileceği açık kaynak içeriklerle de desteklenen, nesne ve yöntemlere dönüşmüştür. Ancak mimari tasarım ölçeği düşünüldüğünde, bu araçların üretim ölçekleri ve yeterliliklerinin prototipleme boyutlarında kalıyor olması, araştırmacı ve uygulamacıları, daha büyük ölçekte, 1/1 mimari üretimlerin nasıl yapılabileceği konusunda araştırmalara yönlendirmiştir (McGee ve diğ, 2014; URL-1).

Dijital fabrikasyon süreçlerinin yapı elemanından bina ölçeğine değişen bir ölçek aralığında cevap yaratması zorunluluğu, disiplinlerarasılık durumunu da destekler nitelikte, daha çok endüstriyel üretim bantlarında tercih edilen robot kolları, mimari tasarımın konusu haline getirmiştir. Endüstriyel robot kolların, karmaşık ve geniş üretim hatlarında basit modifikasyonlarla yüksek hassasiyet içeren sayısız işleve

adapte olabilmeleri, onları mimari tasarımda dijital fabrikasyon için ideal araçlardan biri yapmaktadır.

Robotik fabrikasyonda, bilgisayar destekli tasarım araçları ile tasarlanmış üründeki sayısal bilginin robot kola aktarımıyla, koldaki imalata özelleşmiş ucun malzeme üzerinde belirli bir yol izlemesi sonucu fiziksel nesne oluşturulmaktadır. Bu tanımlı, sınırlı ve deterministik sayılabilecek düzlem, mimari tasarımın birbiri ardına sıralanmış, lineer bir imalat edimi olarak ele alınamayacak kadar birbiri içine geçmiş/ birbiri içinde kaybolmuş çok katmanlı melanj (Tanyeli, 2008) karakterinin yitirilmesi tehlikesine dair tartışmaların doğmasına sebep olmuştur. Tasarımın çok yönlü mimari kararlarının aktarılacak istenen her detayı ile üretilebilmesi ancak tasarımcının kullanılacak dijital fabrikasyon araçları ve yöntemlerine aşina olmasıyla mümkündür (Schodek, 2005; Scheurer, 2010; Kolareviç 2008; Iwamoto 2009). Böylesi bir farkındalık ise disiplinler arası çalışma pratiğine ek olarak, mimarın kendisinin de gerektiğinde bir malzeme/imalat/makine/bilgisayar/yazılım mühendisi gibi davranarak, önceden belirlenmiş standartları takip etmek yerine bu araçları kullanmanın yeni yollarını keşfetmesi/icat etmesi ile gerçekleşebilir (Aish, 2013).

Mimarlıkta robot kol ile fabrikasyondaki potansiyellere yoğunlaşan güncel araştırmalar (URL-2; URL-3; URL-4) yazılım, donanım(süreç) ve malzeme olmak üzere üçlü bir sacayağı kurgusu barındırmaktadır. Bu parametreler arasında malzeme; seçilecek donanım, ona bağlı gelişecek süreç ve gerekli yazılımı etkilemesi sebebiyle belirleyici niteliktedir. Malzemenin dijital fabrikasyon tekniklerinde bu denli etkili olması, mimari tasarımın da daha önce bahsedilen subjektif yönünü desteklemesi bakımından önemlidir. Mimari tasarım söz konusu olduğunda kullanılacak cihaz veya tariflenmiş yazılım değil, tasarımın ana fikrini yansıtan malzeme ve biçim bir anlamda dijital fabrikasyonun belirleyicisi durumundadır.

Malzeme özelinde konuya ilişkin literatür incelendiğinde, alternatif ve sürdürülebilir malzeme çalışmaları, mevcut malzemelerin optimizasyonu ile ileri dönüşüm uygulamalarına ilişkin çalışmalar ve yine mevcut malzemelerle farklı inşaat tekniklerine yoğunlaşan çalışmalar dikkat çekmektedir (Şen-Bayram, 2021). Mimarlıkta robotik fabrikasyon çalışmalarının genelinde, doğal taş malzemeyi robotik işleme teknikleri ile ele alarak sistematik olarak sınıflandıran ve yapı

sökümüne uğratan hesaplamalı araştırma sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Araştırmaların ahşap, köpük, kil, beton gibi daha yumuşak malzemelere odaklanmasının en büyük sebeplerinden biri, taş gibi sert bir malzeme üzerinde yoğun frezeleme işlemleri gerçekleştirmek için gerekli olan takımların maliyeti ve bu ekipmanların profesyonel kullanımda dahi kırılabilecek olmasıdır. Buradaki maddi kayıpların önüne geçmek amacıyla konuya ilişkin üretim yapan şirketlerin, üretimlerini hızlandırmak ve rekabet güçlerini korumak için CAD/CAM iş akışlarına ve robotik fabrikasyona yönelmesi (Bubola 2021), taş oymacılığı sektöründe, endüstriyel robotların becerisinden güç alan kendi yeni Rönesans'ını yaratmıştır (Dorfman, 2018). Mimari tasarımda da taş işlemeciliği gibi geleneksel bir alanın otomatize edilmiş bir iş akışına aktarılması, geometrik karmaşıklıkta azalma olmaksızın artan erişim yoluyla üretim ölçeğini artırabileceği düşünülmektedir.

Robot kol ile doğal taş işleme uygulamasında, dijital fabrikasyon yöntemlerinden biri olan eksiltmeli üretim yöntemi ile taş malzeme kesilerek veya işlenerek ana bütünden parçalar eksiltme yoluyla şekillendirilmektedir. Geleneksel taş işleme süreçlerine benzer şekilde işlem, robot kolun başına takılan ucun malzeme üzerinde tanımlanmış bir yol boyunca hareket etmesinden oluşmaktadır. İşleme operasyonunun türüne, takım çapına, takım şekline, takım adım mesafesine, kesme hızına, takım çalışma derinliğine ve tanımlanan çalışma eksenine göre aletin izlediği rota boyunca malzeme eksiltilerek şekil almaktadır. Fabrikasyon süreci içerisinde malzeme sertliği, işleme süresi, yüzey çözünürlüğü ve yüzey kalitesi arasında katmanlı ve karmaşık bir ilişkiler ağı mevcuttur. Bu üretim sürecinin tasarlanması zaman ve kalite arasında bir ilişki oluşturmaktadır. Yazılımlarla oluşturulan simülasyonlar; üretim öncesinde üretim aracına bağlı olarak sürecin tasarlanmasında ve üretim sonrasında üretilen biçimin ölçümlenerek dijital modele geribildirim sağlanmasında kullanılabilir. Bu sayede kontroller sağlanmış ve oluşabilecek olumsuz durumların önüne geçilmiş olurken, zamandan ve maliyetten tasarruf edilmektedir. Bileşenlerin ve işlevlerin kombinasyonlarına dayalı manipülasyonlar içeren çözüm uzayının, görsel olarak tanımlanabilen kurallar ve hesaplamalı modellerle yeniden formüle edilmesi, mimari tasarımda tasarımcının üretime

hakimiyeti için böylesi karmaşık ve çok katmanlı bir süreci kolaylaştıran bir ortam oluşturacağı düşünülmektedir.

Bu tez, robot kol ile taş işlemede endüstriyel örtük bilgiden destek alan bir çerçeveye sunmayı amaçlamaktadır. Simülasyonu merkez alan çerçeveye temel olacak bir veri seti elde etmek için alan çalışması, çıktıları birbiri ile ilişkili olarak yorumlanabilecek iki bölümden kurgulanmıştır. Birinci alan çalışmasında, basit geometride detay artışı ve işlem süresi arasındaki ilişkiye odaklanılırken, ikincide, karmaşık geometrilere malzeme, operasyon ve işlem süresi ilişkileri araştırılmıştır.

Tezin amaç, kapsam ve yönteminin açıklandığı ilk bölümü takip eden ikinci bölümde dijital fabrikasyon araçlarının tarihi gelişiminden başlayan ve bu gelişimi mimari tasarım alanındaki hesaplamalı tasarım düşüncesiyle birleştiren bir anlatım yer almaktadır. Ardından anlatımın araştırmanın konusu olan robotik fabrikasyona doğru genişlemesiyle, çalışmanın literatürdeki yerini vurgulayan bir derleme sunulmuştur. Üçüncü bölümde, geleneksel doğal taş işleme yöntemlerinden kısaca bahsedilmiş, simülasyona dair bulgular derlenmiş, ardından da robot kol ile taş işlemeciliği analiz edilmiş ve alandaki örnekler incelenmiştir. Dördüncü bölümde, araştırmanın kurgusunun anlatılmasıyla başlayan bölüm, geometri, detay, malzeme, operasyon ve süre ilişkilerinin incelendiği iki farklı alan araştırması ile devam etmektedir. Bölüm sonunda elde edilen verilerin yorumlanması ışığında taş işleme için tasarımcılara öneri niteliğinde bir çerçeve geliştirilmiştir. Son bölüm, bulguların değerlendirilmesi, kısıtlar ve gelecek çalışmalardan bahsedilmesi ile bitmektedir. Böyle bir araştırma ile mevcut uygulama alanındaki çözüm uzayının genişletileceği ve alanda araştırma konusu olarak yeni olan robotik fabrikasyona dair literatüre katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

1.1. Tezin Amacı

Geleneksel araç ve yöntemlerle taş ham maddeleri yapı elemanı ve malzemesine dönüştürmek uzun bir geçmişe sahiptir. Taş işleme ustalarının temel yetenekleri, malzemenin doğasındaki belirsizlikten kaynaklanan koşulların üstesinden gelmek için geliştirdikleri yöntemlerde yatmaktadır (Pye 1968). Deneyimle katmanlı şekilde

nesilden nesile aktarılan böylesi bir uzmanlığın, güncel durumu incelendiğinde karşılaşılan problemlerin birkaç temel soruna işaret ettiği görülmektedir:

- Robotik fabrikasyon süreçleri çok tanımlı süreçler olmalarına rağmen, taş işlemede malzemenin doğasından kaynaklanan zorluklar, üretimin standardize olmasını güçleştirmiştir.
- Doğal taş malzemeyi geleneksel yöntemlerle işlemenin zorlu bir işlem olması, emek karşılığı olarak belirlenen fiyatın artmasına sebep olurken, bu fiyat artışı, dijital fabrikasyona adapte olabilmiş diğer malzemelere karşı taşın rekabet gücünü azaltmıştır. Bu durum, nesilden nesile aktarım sürecinde örtük bilginin kaybolması tehlikesini yaratmaktadır.

Malzemenin tahmin edilemez davranışı ve ekonomik sebeplere dayanan bu problemlerin dijital fabrikasyon araçları ile çözülmesi mümkün olmasına rağmen, bu konudaki araştırmalar yine benzer sebeplerle, tepkileri daha tahmin edilebilir malzemelere yönelmiş veya taş malzeme çoğunlukla işleme dışı uygulamalar için araştırma konusu haline gelmiştir. Literatürdeki bu açık, araştırılmaya değer bir alan yaratmasına karşın, konu mimari tasarıma yönelik üretimler özelinde incelendiğinde literatüre olduğu kadar fiziki üretime de fayda sağlayacak bir araştırma çerçevesi oluşturmak için;

- Doğal taş malzemenin robot kollar ile işlenmesi konusunun mimari tasarıma katkısı nedir?
- Disiplinlerarası çalışmaya dayalı güncel mimarlık ortamında mimarın bu araç, yöntem ve malzemelere hakimiyetinin gerekliliği nedir?
- Mimarın böyle bir imalatı yapabilmek için ihtiyaç duyacağı bilgi, beceri ve yetenekler nelerdir?

soruları tartışılmalıdır.

Sayısal tasarım düşüncesi sadece mimari tasarım düşüncesi, tasarım ve temsil araç ve yöntemlerini etkilemekle kalmayıp, dosyadan-üretime bir anlayışla, prototiplemeden 1/1 üretime tüm ölçeklerde, inşaat/imalat tekniklerinin de kökten değişmesine ve dijital fabrikasyon araçlarının mimari tasarımın doğal bir parçası olmasına sebep

olmuştur. Dijital fabrikasyon araçlarının mimari tasarım üzerindeki bu etkisi, tasarım ürününün karmaşık ve çok katmanlı karakterinin kaybolmasına neden olma potansiyeli nedeniyle tartışmalara yol açmaktadır. Bu tartışmalarda, dijital fabrikasyon aracına hakim olmayan bir mimarın, tasarım niyetlerini iletmek için üretim kararlarında imalatçıya bağımlı olması konusu merkezi bir rol oynamaktadır. Tasarımın tam anlamıyla mimarın kararlarına göre üretilebilmesi, ancak tasarımcının dijital fabrikasyon araçlarına ve yöntemlerine aşina olmasıyla mümkün olabilir. Bu farkındalık, disiplinler arası çalışmanın yanı sıra mimarın, malzeme, imalat, makine, bilgisayar, yazılım mühendisi gibi davranarak önceden belirlenmiş standartları takip etmek yerine yeni kullanım yollarını keşfetmesiyle gerçekleşebilir. Söz konusu keşifler, yazılım, donanım ve malzeme eksenli 3 ayaklı bir sistem tarifleyen dijital fabrikasyon süreçlerinde bu ayakların herhangi birine yoğunlaşarak olabileceği gibi, mimarın ilgi alanına göre hepsini de kapsayabilir. Bu bakış açısı mimarın ve mesleki uygulama/araştırma konularının yeni tariflerini yaratması bakımından büyük öneme sahiptir. Yazılım ve donanım bağlamında başka bir mühendislik dalının tüm uzmanlığına sahip olma gerekliliği mesleki olarak gerekli değilken (sadece işleyiş dair genel bir bilgi birikimi yeterli olabilecekken), malzeme mimari tasarımın da konusu olması sebebiyle daha detaylı ele alınabilecek bir konudur. Malzeme odağının belirlenmesi kullanılacak yazılım ve üretim aracının belirleyicisi olmakla birlikte, mimari tasarım ürününün ruhunu yansıtacak en önemli aktörlerden biri olması sebebiyle de önemlidir. Tarih boyunca katmanlaşan yapısı ile doğal taş, malzemenin işlenmemiş hali ile dahi bahsedilen bu ruhu barındırabilen bir yapıdır. Doğal taşın homojen olmayan yapısı ve işlenmesinin maliyet sorunları sebebi ile geniş olarak araştırmalara konu olmamasının yanı sıra, bu malzemenin Anadolu coğrafyasında tarih boyunca önemli bir yapı malzemesi olması da araştırmanın taş malzeme işlemeye yoğunlaşması için önemli bir motivasyon sebebidir.

Gerek taş malzeme, gerekse konunun mimarlık alanına katkısı hakkındaki araştırma sorularına verilen cevaplar doğrultusunda bu tez;

- robot kol ile doğal taş malzemenin işlenmesi süreci üzerine, tasarımcıların rahatlıkla hakim olabilecekleri bir çerçeve oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu çerçeve, tasarımcıların doğal taş malzemenin potansiyelini daha iyi

anlamalarına ve tasarım/üretim süreçlerine malzemeyi entegre edebilmelerine yardımcı olacaktır.

- robotik teknolojinin doğal taş işleme sürecindeki rolünü detaylı bir şekilde incelerken, tasarımcıların bu süreçte ihtiyaç duyacakları bilgi ve becerileri belirlemeyi hedeflemektedir. Bu sayede, tasarımcılar doğal taş malzemenin işlenmesi konusunda bilinçli kararlar verebilecek, tasarım projelerinde doğal taşın estetik, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik gibi özelliklerinden en iyi şekilde yararlanabileceklerdir.
- günümüz mimari ortamında disiplinler arası işbirliğinin önemini vurgulamaktadır. Mimarların dijital fabrikasyon araçlarına ve yöntemlerine hakim olmaları, malzeme bilimine, imalat süreçlerine ve robotik teknolojiye dair temel bilgilere sahip olmaları gerekmektedir. Bu nedenle, tez çalışması, mimarların genel anlamda dijital fabrikasyon süreçlerine ve doğal taş malzemenin işlenmesine ilişkin bilgi birikimlerini arttırmayı hedeflemektedir.

Genel anlamıyla bu tez çalışması, robot kol ile doğal taş malzemenin işleme sürecini araştırarak tasarımcıların, bu alanda yetkinlik kazanmalarını desteklemeyi ve mimari tasarım ve üretim süreçlerinde doğal taş malzeme kullanımına olanak tanıyan yeni fırsatları keşfetmelerini sağlamayı amaçlamaktadır.

1.2. Tezin Kapsamı

Robot kollar ile dijital fabrikasyon süreçlerinin sayısız alternatifine sahip olması, kullanıcılarına uzmanlık alanı olmayan bir alanda hakimiyet sağlamayı temel amaç edinen bir araştırmada, dijital fabrikasyonun 3 eksenli sac ayağı (malzeme-yazılım-donanım) kurgusuna uygun olacak şekilde, odaklanılacak malzeme olarak seçilen doğal taş malzeme ve uygulama alanı olan mimari tasarım özelinde çözümlenmesi gereken araştırma sorularının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır:

- Malzeme ekseninde: Doğal taş malzemenin homojen olmayan ve öngörülemeyen fiziki yapısının, bu malzeme ile yapılacak imalatlarda kullanılabilirlik tarifli teknik bilginin üretimde geçersiz olabileceği durumlar oluşturmasının önüne nasıl geçilebilir?

Doğanın bilgisinin dijital fabrikasyon uygulamalarına özel durumlara göre değişebilmesi, geleneksel taş işleme yaklaşımında olduğu gibi, zaman içinde katmanlaşan bir deneyim ve bilgi birikimi gerektirir. Bu sebeple taşların fiziki parametrelerini ifade eden teknik bilgilere ek olarak, robot kollar ile taş işleme üzerine uzmanlaşmış kişilerin malzeme ile ilgili örtük bilgilerini elde edip belgelemek ve araştırmada kullanmak, tanımsız ancak kıymetli bir bilginin doğru üretim sonuçlarına zemin yaratan aktarımını sağlayacaktır. Geleneksel işleme yönteminin bir versiyonu gibi, nesilden nesile aktarılan bu bilgi için, mimarlıkta taş kullanımının yüzyıllara dayanan geçmişinin izlerinin hala sürülebildiği Anadolu coğrafyasını ele almanın, araştırmanın malzeme kapsamı için doğru bir alan tarifleyeceği düşünülmektedir. Doğal taşlara dair örtük bilginin, robot kol ile işleme süreçlerine devam etmekte olan uzmanlardan elde edilmesi düşüncesi ile yapılan araştırmada, Gürmas Güral firmasının yurtiçi ve yurtdışı hizmetlerle alanda aktif olarak hizmet vermeye devam ettiği tespit edilmiş ve uzmanları ile iletişime geçilmiştir. Uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucu malzeme ve sürece ilişkin araştırma soruları ilave katmanlarla derinleşmiştir.

- Yazılım ekseninde: Sayısız parametre içeren bu üretim yönteminde doğal taş işleme uygulamaları için hangi yöntemlerin ve parametrelerin seçilerek optimize edilmesi, robot kol yöntemlerinin, ileri seviye kullanıcılara özelleşmesinin herkesin kullanabileceği hale dönüşmesini sağlar?

Robot kol ile dijital fabrikasyon için özelleşmiş bir çok yazılım ve arayüz olması, uygulamalarda kullanılacak yöntem ve parametrelerin de doğru orantılı çeşitlenmesini sağlamaktadır. Mimarlıkta sayısal tasarım alanında, tasarımcıların bu yazılımlardan Rhino7 3boyutlu modelleme programının Grasshopper arayüzünü sıklıkla kullandığı gözlemlenmiş olsa da, bu arayüzde eklenti olarak kullanılan Kuka PRC aracının, imalata özelleşmemiş olması, çok basit işlemler için bile karmaşık süreçler tariflenmesini gerektirmektedir. Bu sebeple araştırma kapsamında belirlenecek yöntem ve parametrelerin belirlenmesi ve sürecin tanımlanması için, imalata özelleşmiş ve komplike süreçlerin basitçe ifade edilebildiği SprutCAM yazılımı ile çalışma kararı alınarak, bir mühendislik programı ile mimarlık arakesitinde etkileşim yaratan bir çerçeve planlaması yapılmasına karar verilmiştir.

Görüşülen uzmanların tamamının da bu programa hakim olmaları, araştırma kapsamında yapılacak işlemlerde doğru yazılım tercihinin yapıldığını destekler niteliktedir. Kullanılacak yazılım kadar, o arayüzde tariflenecek süreç ve parametrelerin nasıl bir üretim ortamında tariflendiği de kriterler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir:

- Donanım ekseninde: Araştırma kapsamında üretim süreçlerinin tanımlanacağı çalışma alanı nasıl olmalıdır?
- Bu alanda üretilecek sonuçların gerçekliği nasıl tespit edilebilir?

Robotik fabrikasyon ile doğal taş işleme teorik bilginin test edilmemesi durumunda, karar ve parametrelerin geçerliliğinin sorgulanmasına çok açık bir alandır. Bu sebeple, gerek tezin araştırmaları ve uzman görüşmeleri sırasında sağladıkları geniş imalat olanakları, gerekse uzman bilgilerini test etmek için onların üretim alanının kullanılmasının yöntem olarak doğru olması sebepleriyle, Afyon Gürmas Gürel üretim alanında bulunan 6 eksenli robot kol (Kuka, KR210) ve tezgah düzeni (döner tezgah ve sabit tezgah) araştırmanın kapsamına dahil edilmiştir. Tezin yöntemi kısmında araştırma kapsamına dahil edilmesi kararı verilen tüm bu kriterlerin sürece etkisi detaylı şekilde açıklanacaktır.

1.3. Tezin Yöntemi

Robotik kol ile doğal taş işleme konusu, mimari tasarımda dijital fabrikasyon literatüründe bu araştırma kapsamında ele alındığı biçimi olan eksiltmeli yöntemler ile büyük bir yer bulmamaktadır. Bu eksikliğin tespiti ve çalışmanın literatürdeki yerini belirlemek amacıyla araştırma, dijital fabrikasyondan başlayarak sırasıyla robotik fabrikasyona, robot kollara, robot kol ile işleme yöntemlerine ve bu yöntemlerin doğal taş özelindeki uygulamalarına yoğunlaşan bir literatür araştırması ile başlamıştır. Bu araştırma sonucu, tezin amacının belirlenmesi neticesinde malzeme ve kullanılmasına karar verilen SprutCAM programına özelleşmiş bir çerçeve için yöntemin belirlenmesinde tespit edilen durumlara ilişkin yeni sorular gündeme gelmiştir:

- Aynı işlemlerin aynı sertlikle doğal taşlar kullanılarak üretilecek farklı karmaşıklık seviyesindeki geometriler için uygulanmasında standart parametreler elde edilebilir mi?
- Bu geometrilerdeki karmaşıklık kriteri üretim yöntemine göre nasıl belirlenmelidir?
- Robot kol ile eksiltmeli yöntemler uygulanarak yapılacak doğal taş işlemleri için farklı sertliklerdeki doğal taşlara özel standart parametreler elde edilebilir mi?

Bu soruların altını çizdiği farklılıkların tariflediği kıyaslama gerekliliği sebebi ile bu tezdeki araştırmanın karşılaştırmalı bir analiz yöntemine temellenmesi kararı verilmiştir. İki ana ekseninde gerçekleşecek bu analizler:

1. Basit geometriler için detay artışı ve işlem süresi arasındaki ilişkinin analizi,
2. Karmaşık geometrilerde malzeme, operasyon ve işlem süresi arasındaki ilişkinin analizidir.

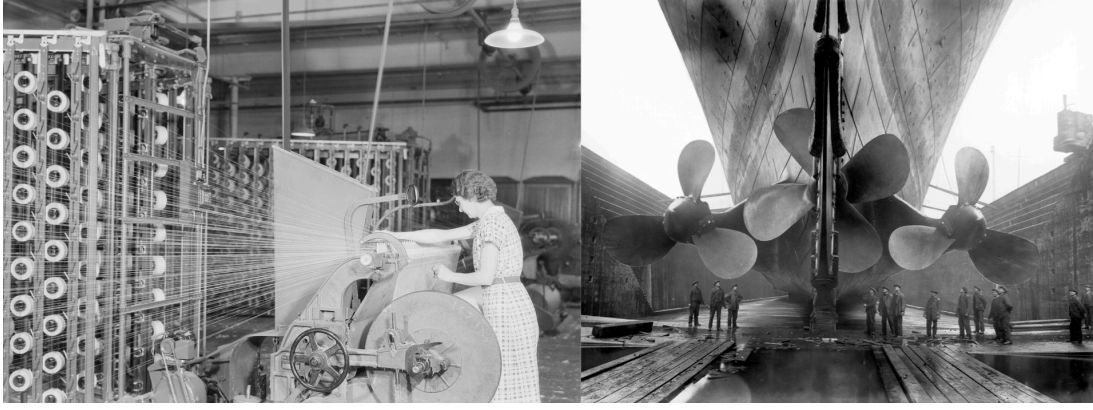
Böyle bir çalışmanın, mimari tasarımda dijital fabrikasyonun ilerlemesine ve daha etkin üretim yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmekte ve robotik kol ile doğal taş işleme konusunda ilgili alanda yeni araştırmalar için ilham kaynağı olması hedeflenmektedir.

2.ROBOTİK FABRİKASYON

Sanayileşmeye bağlantılı olarak mimari tasarım ve üretimde otomatik araçların yükselişi (Giedion 1948, Negroponte 1969 : Kolarevic, 2003'te atıfta bulunduğu gibi), hem tasarım hem de üretim aşamalarında somutlaştırma teknolojilerinin mimar/tasarımcıyla doğrudan ilişkili hale gelmesini sağlamış (Kolarevic, 2003; Klinger & Kolareviç, 2008), böylece karmaşık geometrilerin modellenmesi ve üretilmesi süreci başlamıştır. Dijital bir tasarımın, bir dizi adım veya işlemin otomatik hale getirilmesi ile fiziksel olarak üretilmesi olarak tariflenen dijital fabrikasyon (Mitchell & McCullough 1995), veriler ve ürünler arasındaki iki yönlü dönüştürme yeteneği (Gershenfeld, 2015) ile mimarlık alanında farklı ölçeklerde sonuç üreten süreçleri yeniden tanımlamaktadır (Carpo 2017).

CAD/CAM süreçleri, mühendislik ve endüstriyel tasarım alanlarında uzun süredir varlık göstermelerine rağmen (Şekil 1.1), mimari tasarım alanında daha kısa bir geçmişe sahiptir (Dunn, 2012). Dolayısıyla mimarlıkta yalnızca tasarım araçlarını ve üretim yöntemlerini değil, tasarım düşüncesini değiştiren (Carpo, 2017) bu yöntemlerin günümüzdeki etkilerini daha iyi yorumlayabilmek için, mimarlığın konusu olmasalar dahi, kökeni makineleşmeye, bilgisayar teknolojilerinin gelişimine ve ilk CAD/CAM sistemlerine kadar izlenebilen (Schodek ve diğ, 2005) mevcut dijital fabrikasyon teknolojilerinin gelişimini anlamak gereklidir.

Dolayısıyla bu bölümde, dijital fabrikasyon araçlarının tarihi gelişiminden başlayan ve bu gelişimi mimari tasarım alanındaki hesaplamalı tasarım düşüncesiyle birleştiren bir anlatım yer almaktadır. Bu kurguyu destekleyen nitelikte mimari tasarım alanındaki dijital fabrikasyon örneklerinden bahsedilmiştir. Ardından anlatımın araştırmanın konusu olan robotik fabrikasyona doğru genişlemesiyle, robot kolların bu gelişim sürecindeki yeri ve mimarlık ile olan ilişkisi belirlenmiş, çalışma mekanizmaları, yetenekleri ve kapasiteleri incelenmiştir.

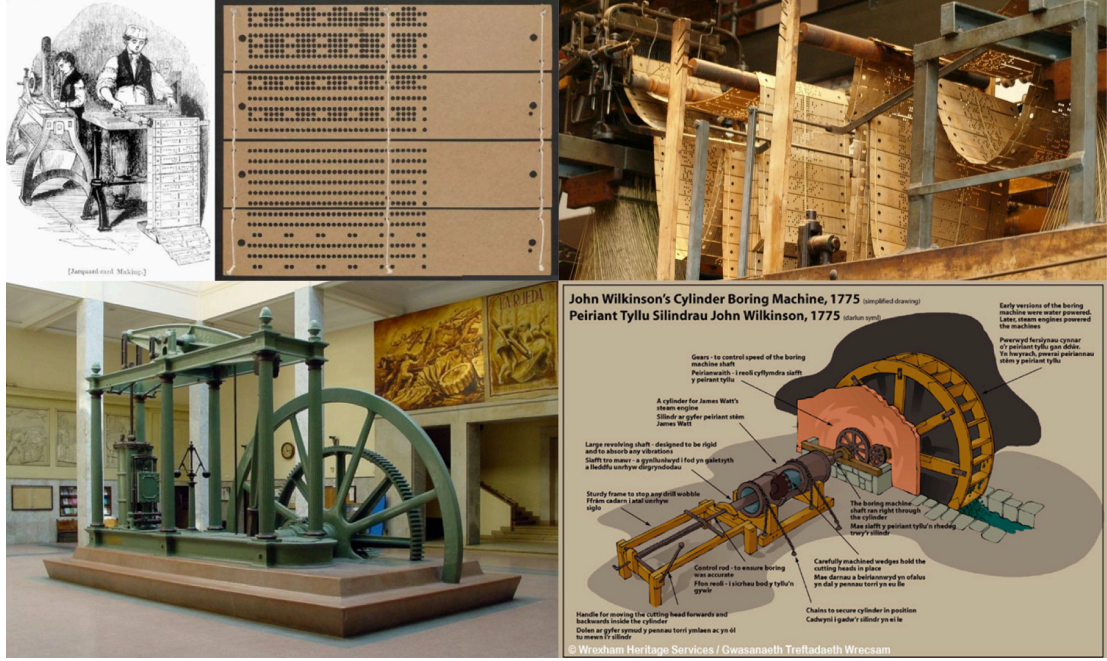


Şekil 1.1: Sağ, Gemi Endüstrisi. RMS Olympic, 1911 (URL-5). Sol, Tekstil. Pacific Mills. Barber-Colman Yüksek Hızlı Çözücü Makinesi, 1937 (URL-6)

2.1. Dijital Fabrikasyonun Kısa Tarihçesi

Endüstride ilk makineleşme örneği, 18. Yüzyılda İngiltere’de başlayan ve sonradan Endüstri 1.0 olarak adlandırılan dönemde, tekstil üretiminde ortaya çıkmıştır (Hu, 2013; Yin ve diğ., 2018). 1725'te Basile Bouchon tarafından kağıt bantlara (punched card) (Şekil 2.1) delinmiş bir dizi delik kullananan tekstil tezgahlarını (Şekil 2.1) üretmesi, 1804’te Joseph Marie Jacquard tarafından bu kartların otomatize edilen bir sisteme dönüştürülmesi (Jacquard Loom) (Essinger, 2004), 1764’te James Watt’ın buhar makinesini (Şekil 2.1) icat etmesi ve sonrasında 1775’te John Wilkinson’ın buhar motorları için gerekli olan silindirleri en iyi şekilde üreten büküm (boring) (Şekil 2.1) makinesi aracını (machine tool) geliştirmesi, bu dönemde dijital fabrikasyon araçlarının temeli sayılabilecek gelişmelerdir (Weightman, 2010).

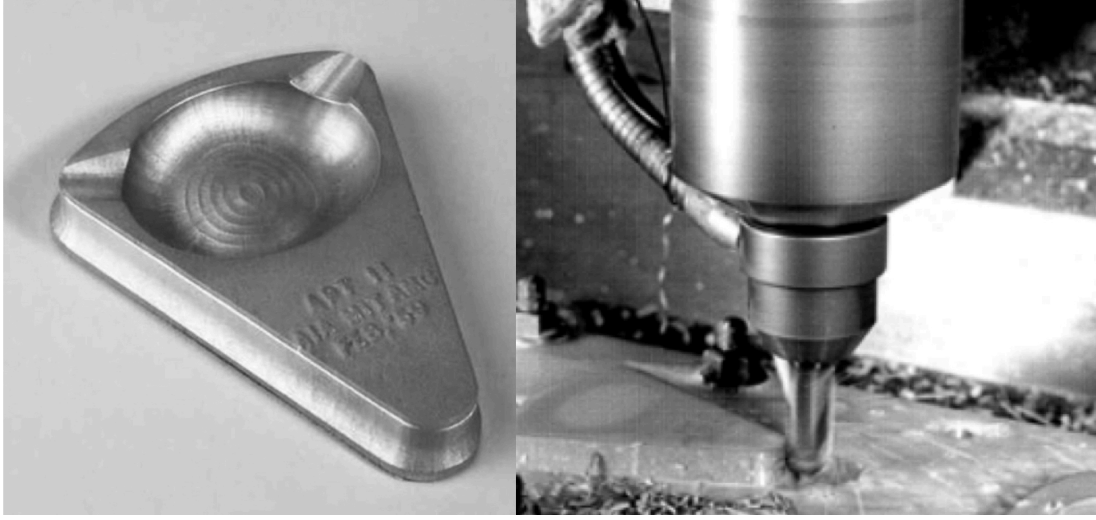
Delikli kart sistemi ve onların mekanik kontrol yeteneği 1896’da Herman Hollerith’in Tabulating Machine Company adlı firmasında elektromekanik sistemlere dönüştürülmüştür. Bu sistemler işleme takımlarının kontrolünü otomatikleştirmek için harfler, sayılar, semboller, sözcükler veya bir kombinasyon biçimindeki verilerin kullanılması anlamına gelen Sayısal Kontrol (Numeric Control - NC)’ün temellerini oluşturmuştur. Aynı yıl geliştirilen ve sonraki dönemdeki tüm uygulamaları etkileyecek bir diğer sistem, H. Calendar tarafından geliştirilen servo mekanizmalar olmuştur.



Şekil 2.1: Sol üst, Delikli kart (URL-7). Sağ üst, Jakarlı dokuma tezgahında kullanılan delikli kartlar (URL-8). Sol alt, James Watt Buhar Makinesi (URL-9). Sağ alt, John Wilkinson Büküm Makinesi(URL-10)

Servo mekanizmalara artan ilgi sonucu 1940 yılında MIT’de başlangıçta ABD donanma endüstrisine yönelik çalışacak olan bir Servo Mekanizma Laboratuvarı kurulmuş, sonrasında laboratuvar çalışmalarını bilgisayar araştırmaları ve geliştirmeleri üzerine genişletmiştir (URL-11). 1949’da başlayan 1950’lerde devam eden ve gelişen proje çerçevesinde takım tezgahlarının sayısal kontrolüne odaklanması, William M. Pease ve James O. McDonough tarafından delikli kağıt bant üzerindeki veriler aracılığıyla yön alan ve sayısal olarak kontrol edilen bir freze makinesi tasarlanması ile sonuçlanmıştır (Pease, 1952). Dolayısıyla, zaman içinde servo mekanizmalar, kodlanmış talimatların bir işleme aletinin kontrol sistemindeki bir mikroişlemciye gönderilmesiyle gelişmiş bir hassasiyet ve tutarlılık düzeyi sağlayan (Smid, 2008) Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (Computer Numeric Control-CNC) araçlarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Şen-Bayram, 2021). Sayısal kontrollerin geliştirilmesi takım tezgahı endüstrisinde devrim yaratmış ve MIT ekibi tarafından, CNC frezelenmiş ilk ürün olan alüminyum kül tablası üretilmiştir (Sdegno, 2014) (Şekil 2.2). Böylece metal stoğu hareket ettiren vidaları döndürmek için bir makinist yerine bir bilgisayar programı kullanılması elle

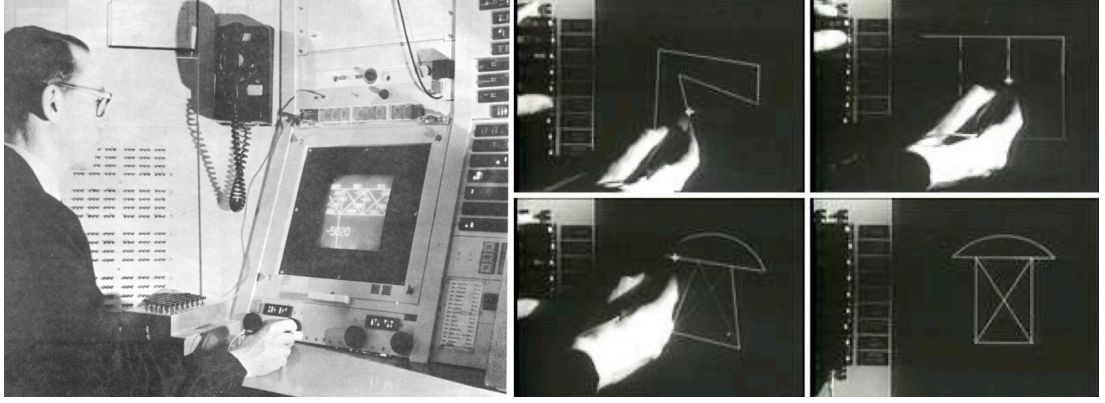
yapılabilecekten çok daha karmaşık şekillere sahip bileşenlerin üretilmesi mümkün olmuştur (Gershenfeld, 2012).



Şekil 2.2: CNC tezgahı ile üretilen alüminyum kül tablası, MIT Servo Mekanizma Laboratuvarı, 1959 (URL-12).

1962’de ilk CAD sistemi olan Elektronik Çizim Makinesi (Electronic Drafting Machine, EDM) İTEK tarafından geliştirilerek uçtan uca CAD/CNC üretim sisteminin ilk örneğini oluşturmuştur (Weisberg, 2008). 1960’ların ortalarında MIT’de Ivan Sutherland tarafından geliştirilen Sketchpad (Şekil 2.3), geometriler arasındaki ilişkileri test etmek ve esnetmek için varyasyon ve tasarım oluşturma yönteminin bir grafik girdi aracılığıyla gerçekleşmesine izin veren ilk sistemlerden olmasına karşın günümüzün birçok tipik CAD işlemini gerçekleştirebilmekteydi ve önceki programlardan etkileşimiyle farklılaşmıştır (Tedeschi&Andreani, 2014). Bir ışıklı kalem ile geometriler, formun, uzayın ve yapının farklı yönlerini temsil eden parametrik örnekler olarak çizilebilir hale gelmiştir. Bunu takip eden GRASP, LOKAT gibi ortamlar arasında Sketchpad, parametrik, ilişkilendirilebilirlik ve kural tabanlı sistem üretimi gibi temel hesaplama yöntemlerini tanımlamada örnek teşkil etmiştir. (Menges & Ahlquist, 2011). SketchPad’in etkisi, 1970’lerde tasarım amaçlı bilgisayar programlarında hızlı bir artış yaratarak, 1972’de Dr. Patrick J. Hanratty tarafından dönemin en önemli tasarım programlarından olan ADAM yayınlanmıştır. 1976’da Hanratty’nin laboratuvarı MCS, bilgisayar için bir tasarım ve üretim sistemi olan AD-2000’i ilk modelleme yazılımı olarak tanıtmıştır. Bu gelişmeler ile birlikte tasarım araçlarının dönüşümü gerçekleşmiştir. Bununla

birlikte, NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) modellemenin eğriler ve yüzeyler için getirdiği yeni tanım dijital nesnenin minimum hata oranı ile üretilebildiği bir tasarım sürecinin önünü açmıştır (Iwamoto, 2013).



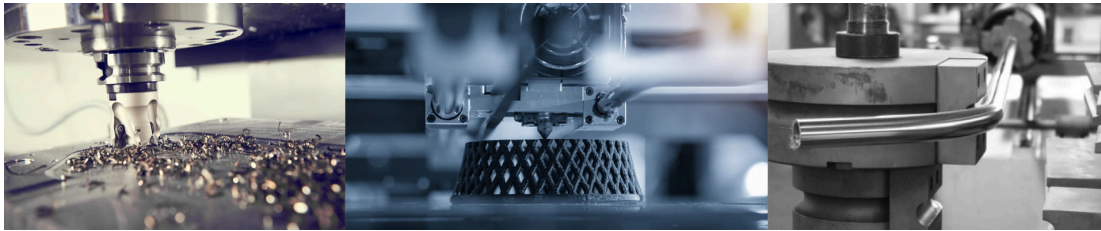
Şekil 2.3: Sol, Ivan Sutherland Sketchpad kullanımı (URL-13). Sağ, ışıklı kalem ile Sketchpad kullanımı (URL-14)

Tasarım alanındaki değişim, üretim teknolojilerinde yeni arayışları tetiklemesi sonucu, 1981'de Hideo Kodama'nın üç boyutlu model üretimine ilişkin iki makalesiyle hızlı prototipleme doğmuştur (Kodama, 1981a, 1981b). Chuck Hull, stereolitografiyi, nesnenin modelini çok sayıda ince katmana bölen gelişmiş bir CAD/CAM yazılımı yardımıyla ultraviyole ile malzemenin katmanlarını üst üste basmak olarak tanımlayarak (Beaman, 1997), 11 Mart 1986'da "Stereolitografi (SLA) ile Üç Boyutlu Nesnelerin Üretimi İçin Aparat" patentini almıştır (Şen Bayram, 2021). Böylece SLA ilk 3 boyutlu yazıcı olarak üretimdeki yerini almıştır (Şekil 2.4). Carl Deckard, Hull's yöntemine benzer bir yöntemi toz malzemeler ile kullanarak, daha sonra Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS) olarak anılacak olan araştırmalara başlamıştır (Deckard, 1989). Aynı yıl, Scott Crump, süreci bir robotik XYZ gantry sistemine bağlamasıyla otomatikleştirerek Eriyik Biriktirme Modellemesini (Fused Deposition Modelling, FDM) yaratmış ve patentini almıştır (Crump, 1989). Zamanla gelişen 3 boyutlu yazıcı teknolojisi sayesinde masaüstü versiyonları evlere girmiş ve günlük hayatın bir parçası olmuştur.



Şekil 2.4: Sol, ilk SLA 3boyutlu yazıcı teknolojisi (URL-15). Sağ, üretilen ilk parçalardan biri (URL-16).

Dijital fabrikasyon araçları, eksiltmeli (subtractive), eklemeli (additive), biçimlendirici (formative) olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir (Kolarevic, 2001). Eksiltmeli yöntemi kullanan CNC kesim araçları, frezeleme tezgâhı gibi araçlar, belirli bir biçimdeki malzemeden belirli işlem adımları izlenerek parçaların çıkarılmasını sağlarken, eklemeli yöntemi kullanan 3B yazıcılar malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle biçimi oluşturmaktadır (Şekil 2.5). Biçimlendirici araçlar ise CNC bükme ve delme araçları gibi herhangi bir çıkarma veya ekleme işlemi olmaksızın malzemenin mevcut özelliklerinden faydalanarak malzemeyi biçim değişikliğine uğratmaktadır (Şekil 2.5). Bunların yanısıra, robot kolları ve insansız hava araçları, farklı uç kullanımı ile farklı işlevler kazanarak kavrayıp yerleştirme (pick & place), kesme ve frezeleme, 3B yazdırma ve biçimlendirme gibi üretim yöntemlerini bünyelerinde barındırabilmektedirler.



Şekil 2.5: Sol CNC frezeleme, orta 3B yazıcı, sağ CNC büküm

2.2.Mimarlıkta Dijital Fabrikasyon Düşüncesi

Dijital fabrikasyon, dijital bir nesnenin bilgisayar kontrollü makineler tarafından bir dizi adım ve işlemin izlenerek fiziksel nesnenin üretilmesi sürecine atıfta bulunan bir anlama gelmektedir (Mitchell, 2003; Iwamoto, 2013; Gershenfeld ve diğ., 2017). CAD araçlarının kullanımının getirdiği iyileştirmeler, bunların CAM araçlarıyla entegrasyonu aracılığıyla ortaya çıkan simbiyotik sinerji, mimari tasarımın temsil ve üretim süreçleri arasındaki boşluğu daraltarak tasarım ve üretim ilişkilerini olağanüstü zenginleştirmektedir (Mitchell & McCullough, 1995; Kolareviç, 2003).

Dijital mimarinin dijital kültür akışından ayrı düşünülmemeyeceği oldukça açıktır (Picon, 2010). Yalnızca disiplindeki ilerleme nedeniyle değil, aynı zamanda giderek daha karmaşık hale gelen toplumların ve kültürel katmanların zenginleştirilmesinden beslenen disiplinlerarası/ötesi bir dünyanın sonucudur.

Bilgisayar destekli süreçlerin belirli olanla başladığı ve nesneyle bittiği yerde, bilginin işlenmesi ve belirli bir ortamı oluşturan öğeler arasındaki etkileşimin ifadesi olan hesaplama ile süreç, temel özellikler ve üretici kurullarla başlamakta ve dinamik bir sistem olarak biçimlenen bilgiyle sona ermektedir (Ahlquistand & Menges, 2011). Geleneksel tasarım düşüncesiyle CAD kullanarak proje çizmek ancak analog mantığın dijital dünyaya tercümesi olarak görülebilir (Tedeschi&Andreani, 2014) yaklaşımı, manuel tasarımın bir taklididir ve “bilgisayarlaştırma” olarak adlandırılmaktadır, oysa gerçek “hesaplama”, mimarların, tasarım, form ve yapımda CAD kapasitesi ve kullanımıyla “aşırı, garip ve bazen öngörülemeyen durumları” aramasına izin vermektedir (Terzidis, 2014).

Hesaplama, karmaşık düzen, biçim ve yapı oluşturma kapasitesi ile bu bilgi veri kümelerinin karşılıklı ilişkisini müzakere etmek ve etkilemek için bir çerçeve sağlayarak tasarım metodolojisi bağlamında spesifik olanı formüle etmektedir. Hesaplamalı tasarımın ilk şartı, bilginin algoritmik olarak işlenmesidir. Genel olarak algoritma tanımı, belirli bir sorunun çözümü için bir dizi işlemi tanımlayan sonlu sayıda kuraldan oluşan bir dizi prosedür olarak yapılmaktadır. Böylece algoritmik bilgi setleri hesaplama prosedürünü sağlayan programlama dilleri aracılığıyla bir bilgisayarda işlenmektedir.

Muazzam miktarda veriyi yönetme potansiyeline sahip bilgisayarlarla birlikte bilginin kendisinin yapılandırılması, mimarlara, disiplin tarihinde emsali olmayan şekillerde karmaşıklıkla başa çıkma imkanı vermektedir. Öte yandan, hesaplamalı tasarım düşüncesi CAD'in mimaride kullanılmasından çok daha önce, Gaudi'nin alışılmamış maketler üzerinden form çalışmaları, "Parametrik Mimari" tanımını icat edilmesi (Luigi Moretti 1939), minimum yüzeyler bulan form araştırmaları (Otto & Rasch 1996) gibi arayışlar ile tasarımda biçim bulma üzerine yeni bir bakış açısı ortaya çıkarmaya başlamıştır. Hesaplamalı tasarımda "nesnelere artık tasarlanmaz, hesaplanır", bu sayede geleneksel çizim yöntemlerini kullanarak temsil etmesi zor olan değişken eğrilikli yüzeylere sahip karmaşık formların tasarımına izin vererek "standart olmayan üretim modu" bir tasarımın temelini atmaktadır (Cache, 1995). Başka bir deyişle, "seri üretim, matematiksel olarak tutarlı ancak farklılaştırılmış nesnelere yanı sıra ayrıntılı, hassas ve nispeten ucuz tek seferlik bileşenler" üretmek artık mümkün olmaktadır." (Kolarevic, 2000).

1980'lerde yerel ağ sistemlerinin ortaya çıkışı ve bilgisayarların günlük hayatın bir parçası olması (Weightman, 2007), üç boyutlu modellemenin gelişimini ivmelendirmiştir, böylece mimari dilin dönüşümünde büyük rol oynayarak süregelen eğilimleri tamamen değiştirmesiyle alternatif üretim sistemleri arayışını ve dahası dijital mimarinin ilk somutlaştırmalarını tetiklemiştir (Kolareviç & Klinger, 2008'te atıfta bulunulduğu gibi). Frank Gehry'nin ofisi, 1989'da Disney Konser Salonu'nun (Şekil 2.6) inşa edilebilirliğini geliştirmek ve test etmek için CAD/CAM kullanmaya başlayarak konser salonunun dış cephesini modellemek için mühendislik alanında kullanılan CATIA'yı (Bilgisayar Destekli Üç Boyutlu Etkileşimli Uygulama) mimariye uyarlamıştır.

Bu inşa yöntemi, yüzey geometrilerinin karmaşıklığının ve benzersizliğinin fabrikasyon maliyetlerini ve parçaların üretimi için gereken çabayı önemli ölçüde etkilemediğini ortaya çıkarmasıyla bir tasarım devrimini tetikleyerek zengin bir mimari buluş ve yenilik sağlamıştır (Iwamoto, 2009). Gehry'nin Bilbao'daki Guggenheim'ı, konsept aşamasında geleneksel olarak çizilen eskizlerden üretilen fiziksel modellerinin lazerle taranarak dijital üç boyutlu bir model elde edilmesi ile yarı dijital olmasına karşın, dijital mimarinin özelliği olarak inşa edilen ilk büyük

ölçekli bina kabulü görmektedir. Binanın orijinal karmaşık geometrileri CAD araçları ile çift eğimli yüzey geometrilerinin dikkatli bir şekilde tasarlanması ve kesin olarak tanımlanmasının yanı sıra, inşaatındaki karmaşıklık sebebiyle ileri CAM tekniklerin kullanılması ile dijital mimariye önemli katkıda bulunmuştur. Dijital mimari, cesur dijital mimari tasarımların yönetilebilen somutlaştırılması olarak ortaya çıkarak, mimarlara, malzemelerin kullanımında, kaplamalarda ve en önemlisi montajda yeni bir olasılıklar dünyasını ortaya çıkaran dijital olarak bilinçli mimarilerini inşa etme şansı vermiştir.



Şekil 2.6: Disney Konser Salonu, Frank Gehry, 1989. (URL-17)

Dijital fabrikasyon hem tasarım hem üretim sürecini içerir, CAD yazılımlarından gelen veri CAM araçlarıyla üretilmektedir. Tasarımın tam anlamıyla mimarın kararlarına göre üretilebilmesi, ancak tasarımcının dijital fabrikasyon araçlarına ve yöntemlerine aşina olmasıyla mümkün hale gelmektedir. Sonuç olarak, mimarın rolü tasarımın kendisinden üretme süreciyle giderek daha fazla ilgilenmesine doğru genişlemiştir. Dijital bilinci olan mimar, temsil ve fabrikasyon arasındaki yakınsamadan yararlanarak herhangi bir karmaşık geometri oluşturmak için gereken eksiksiz bilgi setini kesin olarak tanımlamak için çizimin sınırlarını aşabilmektedir. Dolayısıyla, Mitchell (2001) tarafından önerilen “inşa edilebilecek olanı çizmek ve çizilebilecek olanı inşa etmek” şeklindeki geleneksel sınırlamalar aşılarak bilgisayar kullanılmadan ulaşılabilecek olanı mümkün olmayan olağanüstü karmaşık geometrilere giden yolun keşfedilmesi gerçekleşmiştir (Kolarevic, 2003’te atıfta bulunulduğu gibi).

Mimari tasarım alanında dijital fabrikasyon ile üretilmiş DFAB House (Şekil 2.7), tamamen dijital araçlarla tasarlanıp üretilmiş ilk örnek olması ile literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Tam anlamıyla yaşanabilir bir binanın çoklu dijital fabrikasyon süreçleri kullanılarak nasıl tasarlanıp üretilbileceğini anlamak için yapılan (Graser ve diğ., 2021) binanın tasarımının inşaatı için 6 farklı yapım teknolojisi birleştirilmiştir: (1) yerinde imalatçı (the in-situ fabricator), (2) örgü kalıp (mesh mould), (3) akıllı dinamik döküm (smart dynamic casting), (4) akıllı döşeme (smart slab), (5) mekansal ahşap montajları (spatial timber assemblies) ve (6) hafif yarı saydam cephe (light-weight translucent façade). Beraberinde fizibilite, otomasyonun maliyet-faydası, yeni insan-makine işbirliği modelleri, optimize edilmiş sürdürülebilirlik performansı, yeni işbirliği biçimleri, inşaat yönetimi, disiplinler arası çalışma ve süreçteki organizasyonlar arası bilgi konularında tartışmaları gündeme getirmiş olsa da dijital fabrikasyonun uygulanabilir bir konsept olduğunu gösterdi (Şen-Bayram, 2021).



Şekil 2.7: Sol, DFAB HOUSE gece görünüşü. Fotoğraf, Roman Keller. Sağ, DFAB HOUSE iç mekan, serbest biçimli kalıp duvarlar akıllı döşemeyi destekliyor. Fotoğraf, Roman Keller. (URL-18)

Dijital malzemeleri ve programlanabilir maddeyi, prefabrikasyon ve modülerlik mimari alanıyla birleştirme olanaklarını araştırmak için çeşitli ahşap montaj yapılar üzerinde çalışmalar (Retsin, 2019), ayrık bir dijital form, karmaşık ve açık uçlu bir mimari sunmaktadır. İnşaatla biyomateryallerin kullanımına odaklanan başka bir proje, özel olarak geliştirilen mobil bir 3B baskı kurulumuyla yerel toprakları doğrudan yazdırarak yapılar inşa edebilmektedir (San Fratello& Rael, 2020). Bütün

bir yapı üretimine odaklanan çalışmaların yanı sıra yapı elemanı bazında araştırmalar da dikkat çekmektedir. Bunlardan kireçtaşından 3 eksenli CNC ile oyulmuş duvar panelleri (Erwin Hauer and Enrique Rosado 2005), fiberglass malzemenen yük taşıma kapasiteli çatı kaplaması (Prototype Pavilion, MOS 2005) uygulamaları ilk projeleri oluşturmaktadır (Iwamoto, 2013).

2.3.Robotik Fabrikasyon

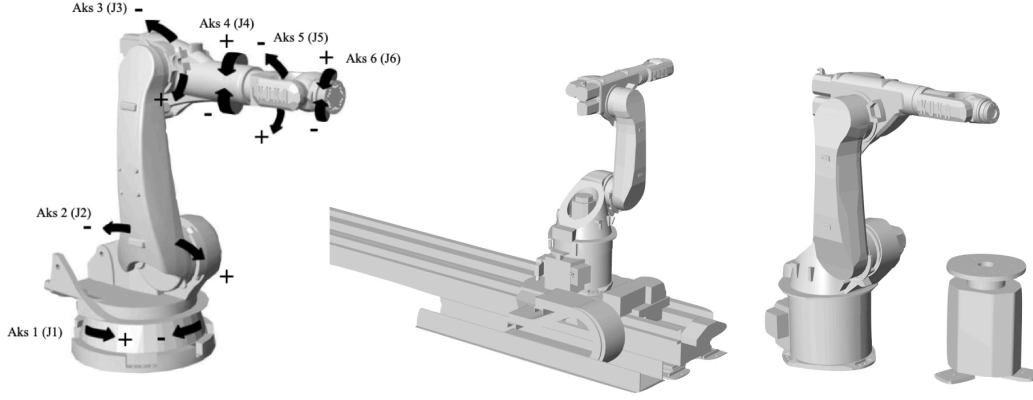
Günümüzde Mimari Dijital Fabrikasyon için bir araç haline gelen endüstriyel robot kollar; çok eksenli tasarımları, menzilleri dahilindeki uzayda herhangi bir noktaya ulaşmalarına izin veren hareket kapasiteleri, farklı uçlar ile artan üretim kabiliyetleri ve ek donanımlarla (sensör, döner tabla vb.) performans arttırımına izin veren yapıları ile mimari üretim kapsamlarını dayanıklı ve çok görevli bir performansa doğru genişletmiştir (Keating, 2012).

Robotik kollar, karmaşık bir dizi eylemi otomatik olarak gerçekleştirebilen bir makinenin geniş bir tanımına sahiptir. Robot kolların mimari dijital fabrikasyona entegrasyonu, endüstriyel robot kolların çok eksenli tasarımı ve menzilleri dahilindeki uzayda herhangi bir noktaya ulaşmalarına izin veren hareket kapasitesi, farklı uçlar ile artan üretim yöntemi kabiliyeti ve sensör ve/veya döner tabla ile performansın artırılması gibi nedenlerle, mevcut üretim kapasitelerini dayanıklı ve çok görevli bir performansa doğru genişletmiştir (Keating, 2012). Çok çeşitli üretim süreçlerinde tekrarlayan görevleri gerçekleştirmek için son birkaç on yılda dünya çapında binlerce fabrikada kullanılmaktadır.

Robot kolu, değiştirilebilen uç kısmı sayesinde birden fazla fonksiyona sahip olabilen, bir kontrol sistemine bağlı olarak karmaşık üretim veya montaj hatlarında çalışabilen araçlardır. Standart uç efektörleri için kısaç, freze milleri ve kaynak ekipmanı örnek oluştururken, geçtiğimiz yıllarda Michigan Üniversitesi özelleştirilmiş robot donanımı içeren birkaç proje yayınlamasıyla yenilikçi kullanımlar da görülmektedir (Braumann & Brell-Cokcan, 2012).

6-aksa kadar olan kontrol mekanizmaları (Şekil 2.8), bir taşıyıcı bant üzerine yerleştirilerek veya malzemeyi döner tabla üzerinde işleyerek 7-akslı olarak da

kullanılabilir (Şekil 2.8). Döner tabla, sistem ile birlikte senkronize çalışan, bir eksen etrafında çok küçük derecelerde dönebilen hassas bir konumlandırma cihazıdır. İşlenecek malzeme sabit veya döner tabla farketmeksizin çeşitli yöntemler tablaya sabitlenerek işleme, kesme, delme gibi işlemlerin hassasiyetle yapılabilmesi için sabitlenmektedir.



Şekil 2. 8: Sol, 6-eksenli robot kol sistemi. Orta, taşıyıcı bant üzerine yerleştirilmiş robot kol. Sağ, döner tabla kullanımı.

Bununla birlikte, son on yılda, akademik kurumlarda ve özel işletmelerde karmaşık imalat görevleri için endüstriyel robotların kullanımında yaygın bir artış olmuştur. Kullanılan robotik fabrikasyon yönteminden bağımsız olarak, çalışmaların genelinde, doğal taş malzeme robotik işleme tekniklerini sistematik olarak sınıflandıran ve yapı sökülmesine uğratan hesaplamalı araştırma sayısının oldukça az olduğu görülmektedir. Malzemenin tahmin edilemez davranışı ve ekonomik sebeplere dayanan bu problemlerin dijital fabrikasyon araçları ile çözülmesi mümkün olmasına rağmen, bu konudaki araştırmalar yine benzer sebeplerle, tepkileri daha tahmin edilebilir malzemelere yönelmiş veya taş malzeme çoğunlukla işleme dışı uygulamalar için araştırma konusu haline gelmiştir. Araştırmaların ahşap, köpük, kil, beton gibi daha yumuşak malzemelere odaklanmasının en büyük sebeplerinden biri, taş gibi sert bir malzeme üzerinde yoğun frezeleme işlemleri gerçekleştirmek için gerekli olan takımların maliyeti ve bu ekipmanların profesyonel kullanımda dahi kırılabilir olmasıdır. Buradaki maddi kayıpların önüne geçmek temel amacıyla bu konuya ilişkin üretim yapan şirketlerin, üretimlerini hızlandırmak ve malzeme - işçilik maliyetlerinin sürekli arttığı bir pazarda rekabet gücünü korumak için CAD/CAM iş

akışlarına ve robotik fabrikasyona yönelmesi (Bubola 2021), taş oymacılığı sektöründe, endüstriyel robotların becerisinden g alan kendi yeni Rönesans'ını yaratmıştır (Dorfman, 2018). Literatürdeki bu açık, incelenmeye değer bir araştırma alanı yaratmaktadır. Mimari tasarımıda da taş işlemeciliği gibi geleneksel bir alanın otomatikleştirilmiş bir iř akışına aktarılması, geometrik karmaşıklıkta azalma olmaksızın artan erişim yoluyla üretim ölçeğini artırabilmektedir.

3.ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME

Robotik fabrikasyon araçlarının mimari tasarım ve üretimde artan rolü, yapılı çevrenin insan tarafından şekillendirilmesiyle tanımlanan Antroposen dönemden, bu ortamın otonom makineler tarafından şekillendirildiği bir çağa doğru potansiyel bir kaymayı işaret etmektedir (Yang, 2019). Endüstriyel robot kolların mimari tasarım ve üretim alanında kullanılmaya başlaması eylemlerin otomatikleştirilmesi, işlem kalitesinin artırılması, işlem süreçlerinin optimize edilmesi ve hassasiyetin artırılması gibi araştırma konularını beraberinde getirmiştir. Buna karşın belirli yöresel malzemelerin ve yüksek beceri gerektiren alanların dijital fabrikasyon yöntemlerine aktarılması ancak son zamanlarda keşfedilmiştir (Johnston, 2017: Shaked, 2021’de atıfta bulunduğu gibi). Bununla birlikte, bu ilerlemeye rağmen, mevcut üretim araçları, özel, yüksek beceri gerektiren görevlerin yanı sıra belirsiz koşulları veya malzemeleri ele alma konusunda hala yetersiz kalmaktadır (Kolarevic 2015). Literatürdeki bu açık, araştırmaya değer bulunmuş ve bu bölümde detaylandırılmıştır.

Çalışmanın kapsamında da belirtildiği üzere, robotik fabrikasyonda, malzemeye, yönteme, ve aracın niteliğine bağlı olarak sayısız alternatif bulunmasına karşın, robot kol ile eksiltmeli taş işleme, geleneksel taş işleme yöntemlerine olan benzerliği ile dikkat çekicidir. Bu sebeple, öncelikle benzerliklerini vurgulamak adına, doğal taş işleme yöntemlerinden kısaca bahsedilmiş, ardından robot kol ile taş işlemeciliği analiz edilmiş ve alandaki örnekler incelenmiştir.

3.1. Doğal Taş İşleme

Taş, insanlık tarihi kadar eskiye dayanan kullanımı ve ondan da eski varoluşu olan doğal bir malzemedir. Mimari alanda Avrupa kıtasındaki törensel taş ürünlerden Greko-Romen klasik düzenindeki cilalı taş, Güneydoğu Asya'daki dağ şeklindeki taş tapınaklara, Latin Amerika'daki ve Afrika'daki taş blok piramitlere kadar tüm

kıtalara yayılan kullanımı ile en yaygın kullanılan malzemelerden biri olduğu ortaya çıkmaktadır. Günümüzde, estetik açıdan renk, desen ve doku çeşitliliğiyle büyük beğeniye sahip olan doğal taşlar, güneş ışığı, nem ve çevresel faktörlere karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olmaları nedeniyle mimari projelerin farklı ölçek ve türlerinde sıklıkla tercih edilen bir seçenek olarak görülmektedir. Yapıların dayanıklılığını artırırken uzun vadeli maliyetleri düşürmesi sebebiyle işlenmiş halleri yapıların iç ve dış mekanlarında, zeminlerde, duvarlarda, tezgahlarda, sütunlarda, heykellerde, mezarlarda, anıtlarda ve diğer birçok alanda esnek ve çok yönlü olarak kullanılmaktadır. Doğal taşlar, içeriğindeki farklı minerallere göre granit, mermer, traverten, kireçtaşı, kuvarsit ve bazalt gibi farklı türlere ayrılarak hem estetik hem statik olarak ayrışmasıyla tasarım ve üretim sürecinde göz önünde bulundurulması gereken farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Örneğin, mermer estetik olarak göze hoş görünen damarlanmalar sunarken damarların etrafındaki alanlar daha zayıf olmasıyla kırılabilirliğini artırmakta; granit son derece dayanıklı olmasına karşın aşırı ağır olmasıyla montajı zor hale getirmektedir. Binlerce yıldır binaların yapımında kullanılan taş, taş ocaklarından çıkarılıp işlenip üst üste konmasıyla ayaklar, sütunlar ve duvarları oluştururken, zamanla gelişen sofistike yöntemlerle estetik cepheler, pencere ve kapı eşikleri, sütunlar, kemerler ve vurgulu elemanlar yaratmak için kullanılmıştır (Şekil 3.1). 19. ve 20. yüzyıla kadar devam eden bu geleneksel sürecin ardından inşaat sektöründe çerçeveleme çözümleri için dökme demir ve geniş açıklıklar için beton gibi farklı malzemelerin kullanılması, gökdelenlerin tasarlanmasına ve geliştirilmesine olanak sağlarken, taşın kullanımı cephe ve döşeme kaplaması olarak dar bir alana sıkışmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.1 : Sol Partenon, Atina Yunanistan, MÖ 5. Yüzyıl (URL-19). Sağ Rodia Stone House, Nikos Smyrnis Architects, (URL-20)



Şekil 3.2 : Sol, Delas Frères Şarap Evi, New Stone Agent şovunda gösterildi. Svenstedt Architect, Fotoğraf: Carl Fredrik (URL-21). Sağ, Stone House / Malik Architecture (URL-22)

Taşın istenen boyutlara getirilmesi için kesme işlemi, istenen forma getirilmesi için şekillendirme işlemi takip eder. Yüzeyinin pürüzsüz hale getirilmesi amacıyla yapılan cilalama işlemleri taşın doğal renk ve desenlerini ortaya çıkardıktan sonra kullanım amacına bağlı olarak monte edilmekte veya son ürün olarak kullanılmaktadırlar.

Geleneksel taş işleme süreçleri, uzmanlık ve deneyim gerektiren bir beceri gerektirmesiyle binlerce yıl boyunca ustalar ve taş işçileri tarafından geliştirilmiştir. Bu süreçler, işlenecek taşın türüne ve kullanım amacına göre doğru şekilde kesilmesi, şekillendirilmesi ve cilalanması için teknik bilgi ve beceri gerektirir. Taş ustaları, bu geleneksel becerilere sahip uzman kişiler olarak yıllar süren deneyimleri ve el becerileriyle doğal taşın özelliklerini anlar ve bunları kullanarak taşın en iyi şekilde işlenmesini sağlayarak mimarların ve tasarımcıların vizyonunu hayata geçirirken, taşın dokusunu, renklerini ve desenlerini en iyi şekilde yansıtmaktadırlar. Usta-çırak ilişkisine dayanan örtük bilginin hakim olduğu bu süreçte, ustalar çıraklara taşın yapısal ve fiziksel özelliklerini yaptıkları üzerinden öğretirken, çıraklar görme/görerek yapma üzerinden usta olma yolunda ilerlemektedirler.

Geleneksel yöntemlerde taş ocağından çıkarılan taş, kaba yontulma işlemi ile boyutlandırılıp pürüzsüz bir yüzey elde edildikten sonra tezgahların üzerine sabitlenerek ustaların şeması çıkartılmış motifleri işleme için hazır hale getirilmektedir. Geleneksel taş işleme süreçlerinde elmasla kaplı testereler, zımparalar, çekiçler, keskiler, spiraller ve diğer el aletleri yaygın olarak kullanılan araçlardır. İşlenecek geometrinin şeması spiralin ince ucuyla taşın tüm yüzeyine hafif

darbelerle çizilmesinin ardından işlemin biçimine ve derinliğine göre alet seçimi ile oyma yapılır (Şekil 3.3). Koparılan küçük parçalar fırça ile yüzeyden temizlenmektedir. İşleme sırasında taşı patlatmamak için ustalar hassasiyet ile çalışmakta, taşı ara ara ıslatmakta hatta taşın seçimini kendileri taş ocaklarından yapmaktadır. Yumuşak taşları işlemek sert taşları işlemekten daha kolay olduğu için genellikle tercih sebebi olmaktadır.



Şekil 3.3: Sol, taş yüzeyinde çizilen yol boyunca parçalar kopararak eksiltilmesi. (URL-23). Sağ, kaba işleme için kullanılan araçlar (URL-24).

Geleneksel yöntemlerde çivileme tekniği ile yapılan bazı işlemler aylarca sürmesi sonucu oluşan ürünler çok kıymetli olmalarına karşın teknolojik gelişmeler ve makineleşme ile birlikte zamanla geleneksel yöntemlerden uzaklaşmıştır. Buna rağmen geleneksel aletlerden taşı şekillendirmede kullanılan bir ağzı balta bir ağzı keser olan gran, taşın düz ve ölçülü olmasını sağlayan gönye, taşın yüzeyini temizleyen ve çizgi şeklinde iz bırakan tarak halen kullanılmaktadır (Şekil 3.4).

Zaman içinde teknolojik gelişmelerin üretim süreçlerine yansımaları sonucu bilgisayarlar tarafından kontrol edilen fabrikasyon süreçleri başlamıştır. Dijital fabrikasyon yöntemleri, aletin nesnelere şekillendirmedeki etkisini artırdıkça, bu nesnelere yapım sürecinde insanı fiziksel olarak malzemedan uzaklaştırması manuel tekniklerin sona ererek yerini otonom makinelerle bırakma tartışmaları başlamıştır (Mindrup 2015: Fernando, 2018'de atıfta bulunulduğu gibi). Eksiltmeli yöntemlerden CNC frezeleme genellikle daha maliyetli olmasına karşın ayrıntılı bitirileri ve farklılaşan teknik özellikleri olması gibi sebeplerden ötürü tercih sebebi olmaktadır. Testereyle kesme kaba işleme açısından verimlidir, tel kesme panellerin

iç yüzeylerinde benzersiz dokular yaratır ve aşındırıcı su jeti ile kesme daha ince çentikler oluşturur. Geleneksel yöntemlere paralel şekilde frezeleme, kaba işleme ile başlarken ince işleme ile bitmektedir. İlk kaba işleme geçişi genellikle taş yüzeyin dışından tasarlanmış modele kadar belirli bir derinlikte testere bıçağıyla yapılmaktadır. Oluşan dilimlerin çekiçle vurularak kırılmasıyla geriye pürüzlü bir yüzey bırakması sebebiyle ikinci kaba işleme için disk şeklinde elmas bir alet kullanılmaktadır. Akabinde frezeleme işlemi art arda daha küçük aletler ile devam etmektedir. Taşı işlemek için gereken yüksek yükler nedeniyle aletler boyutlarına bağlı olarak yalnızca belirli bir derinlikte kesme yapabilmektedir. Aletin ucu ne kadar küçük olursa, fiziksel olarak o kadar az malzeme kaldıracığından aşırı yüklenmeyi ve aletin kırılmasını önlemek amacıyla makinenin o oranda yavaş hareket etmesi gerekmektedir. Bu CNC yaklaşımlarının hassasiyet ve toplam kapasite açısından avantaja sahip olmasına karşın endüstriyel robotik manipülatörlerin sunduğu esneklik ve taşınabilirliğin fabrikasyonda benzersiz bir potansiyeli ortaya çıkarmaktadır (McGee, 2014).



Şekil 3.4: Günümüzde kullanılan aletler (URL-25)

3.2.Robot Kol İle Eksiltmeli Üretim

Geleneksel olarak eksiltmeli üretimde (talaşlı imalat), malzeme kesilerek veya işlenerek ana bütünden parçalar eksiltmek yoluyla şekillendirilmesi bir freze veya torna kullanılarak yapılır. Freze, belli bir açıda dönerek malzemedan parça çıkarır, torna ise malzeme dönerken çoğu zaman sabit bir şekilde duran malzemedan parça çıkarır. Geometrideki karmaşıklaşma veya boyutsal niteliklerin değişmesi gibi sebepler, bu yöntemle hedeflenen son ürüne ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu noktada eksiltmeli üretim süreci, endüstriyel robotlar ile yeniden tanımlanarak insanlar için tehlikeli olabilecek veya aşırı hassasiyet gerektiren işlerde, ucun değiştirilmesi ve eksen sayısının artırılması gibi özellikleriyle üretim çözümlerindeki uzayın genişlemesi sağlanmaktadır.

Robot kolu, değiştirilebilen uç kısmı sayesinde birden fazla fonksiyona sahip olabilen, bir kontrol sistemine bağlı olarak karmaşık üretim veya montaj hatlarında çalışabilen araçlardır. Robot kolun türüne göre 3 metre çapındaki bir alana kadar erişebilirler. 6-aksa kadar olan kontrol mekanizmaları, bir taşıyıcı bant üzerine yerleştirilerek veya malzemeyi döner tabla üzerinde işleyerek 7-akslı olarak da kullanılabilir. Döner tabla, sistem ile birlikte senkronize çalışan hassas bir konumlandırma cihazıdır. Bir eksen etrafında çok küçük derecelerde dönebilir. İşlenilecek malzeme çeşitli yöntemlerle tablaya sabitlenerek işleme, kesme delme gibi işlemler yapılabilir (Şekil 3.5). Farklı sertlikteki malzemeleri işlemek için tasarlanmış özel uçlar kullanarak kesme, gravür ve diğer işleme işlemlerini gerçekleştirilmesiyle hem endüstri hem de tasarımcı için avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sunarak insan işçilerin yapamayacağı kadar yüksek hızda çalışabilmektedir.

Tasarımcıların endüstriyel robotlarla üretim yapabilmeleri için gerçek robotlara benzer şekilde tepkiler veren sanal robotlar üzerinde pratik yapmaları gerekmektedir. Simülasyon araçları sayesinde, tasarımcı tasarladığı dijital model üzerinden gerçek zamanlı olarak robotun duruşunu, genel erişilebilirlik durumlarını, çarpışmaları ve eksen sınırlarını analiz ederek mevcut çalışma alanı kullanımını optimize etmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.5 : Döner tablaya sabitlenmiş mermer parçanın işlenmesi

3.2.1.Simülasyon

Simülasyon, üretim öncesinde üretim aracına ve üretim yoluna bağlı olarak sürecin modellenmesinde, üretim sonrasında ise üretilen ürün, model ile ölçülünerek dijital modele geribildirim sağlanmasında kullanılmaktadır. Kullanıcılar, harici veri girişini veya dahili fabrikasyon parametrelerini manipüle ederek ve ortaya çıkan robotik takım yollarını simüle ederek, gerçek zamanlı olarak farklı takım konumlandırma stratejileri arasında değişiklik yapabilmektedirler.

Endüstriyel robot kollar yedi eksene kadar kartezyen olmayan makineler olduğundan (Hägele ve dig. 2008), herhangi bir hareket için birden fazla çalıştırıcının aynı anda etkinleştirilmesini gerektirmektedir. Robotların ve kartezyen makinelerin hareketine baktığımızda, yalnızca X/Y/Z yönünde hareket edebilen kartezyen makineler için hareket komutu ile hareketin kendisi arasındaki ilişki çok açıktır; endüstriyel robotlarda ise birden çok serbestlik derecesi, büyük erişilebilirlik ve çeviklik sağlarken herhangi bir XYZ noktasına ulaşması için matematiksel olarak sonsuz olasılık olduğundan dolayı bu ilişki karmaşıklaşmaktadır (Braumann & Brell-Cokcan, 2012). Bu karmaşık ilişkileri yönetmek üzere robotun pozisyona getirilmesi, her eksenin dönüş hareketlerinin tüm konumlar için kaydedilmesi ve tekrar tekrar

oynatılabilmesini mümkün kılan çevrimiçi robot programlama (Biggs ve MacDonald 2003) yaklaşımının ortaya çıkması, kullanıcıların ölçekli bir robot modelinin duruşunu gerçek endüstriyel robota aktarmalarına izin veren bir Robotik Sayısallaştırıcı (Robotic Digitizer, Payne 2011) geliştirilmesi, robotun hareketini sezgisellik ve belirsizlikten kurtararak robotla tasarlama alışkanlığı robotla üretmede süreç tasarımına doğru evrilmiştir.

Robot kol kontrolü, takım ve robot hareket komutlarını içermesinin yanı sıra G-code dilinden farklı olarak değişkenlere göre koşul cümleleriyle çalışabilen KRL adlı makine dili ile sağlanmaktadır. Buna göre, robot kolun altı eksenin her birine eksen döndürme talimatları verilerek ve ucun konumu ile yönü tanımlanarak bir konumdan diğerine robot hareketi gerçekleştirilir. Bu hareket ile malzemenin şekillendirilmesini sağlayan takım yolu, takım ucu, takım boyutları, akış yönü, kesme derinliği, işleme hızı, yaklaşma mesafesi, parça tanımı, yüzey geometrisi ve işleme sınırları gibi parametreler ile oluşturulur. Takım yolu tanımlanmasında basit arayüze sahip her CAM aracına özel CAD yazılımları bulunmaktadır. Son zamanlarda, Grasshopper ortamına özelleşmiş KUKA PRC (Braumann & Brell-Cokcan 2012) ve HAL (Schwartz 2013), Robots gibi birçok yazılım projesi, tasarımcıların robotik prosedürleri düzenlemesine yardımcı olan arayüzler sağlayarak robotları tasarım iş akışlarına dahil etmeye çalışmaktadır. Bu yazılım paketleri, tasarımcıların robot davranışını gerçek zamanlı olarak simüle ederken görsel programlama ortamlarında çalışmasına yardımcı olmaktadır.

3.2.2. Robot kol ile doğal taş işleme

Robot kolların taş işleme endüstrisinde kullanımı, otomasyonu artırarak maliyetleri düşürürken aynı işi yapan insanların güvenliğine ve sağlığına katkıda bulunabilir. Bundan dolayı, taş işleme gibi geleneksel yöntemlerin robotik teknolojiler ve dijital üretim ile birleştirilmesi, tasarımın yenilikçi ve verimli bir şekilde yapılmasına olanak tanır. Taşın özellikleri, robot kol ile işleme yöntemi için önemli bir faktördür. Bu nedenle, robot kol ile taş işleme yöntemiyle ilgili bir araştırma yaparken, taşın özelliklerine bağlı olarak farklı araştırma yöntemleri uygulanabilir. Örneğin, taşın sertliği ve dayanıklılığı, robot kolun kullanacağı kesici aletlerin türünü ve işleme

hızını etkileyebilir. Bu nedenle, taşın fiziksel özellikleri dikkate alarak, robot kolun kullanacağı kesici ucun seçilmesi gerekebilir. Bu seçim işlemi, farklı kesici aletlerin taşın üzerindeki performansını test etmek için deneyler yaparak gerçekleştirilebilir. Bunların yanı sıra, taşın kırılabilirliği, işlemeyi zorlaştırabilir ve işlem sırasında çatlaklar veya diğer kusurlar oluşabilir. Bu nedenle, araştırmacılar, taşın işlenmesi sırasında kırılmaları önlemek için robot kolun hareketlerini optimize etmek ve taşın işlenmesine yönelik yeni teknikler geliştirmek için deneyler yapabilirler.

Genel olarak, taş işleme işi iki adımdan oluşur: malzemeyi katman katman kabaca kaldıran kaba işleme ve alet ucunun kalan parçayı hassas bir şekilde işleyerek yüzey bitişini ürettiği ince işleme. İlk kaba işleme model yüzeyinizin dışında belirli bir derinliğe kadar keser. Bu çok pürüzlü bir yüzey bırakır. Daha sonra kalan taşı frezelemek için art arda daha küçük aletler kullanılır. Aletler, taşı öğütmek için gereken yüksek yükler nedeniyle boyutlarına bağlı olarak yalnızca belirli bir derinlikte kesebilir. Aletin ucu ne kadar küçük olursa, fiziksel olarak o kadar az malzeme kaldırabilir ve aşırı yüklenmeyi ve aletin kırılmasını önlemek için makinenin o kadar yavaş hareket etmesi gerekir.

Robotik oymacılıktaki mevcut araştırma, simülasyona daha az odaklanarak fabrikasyon odaklıdır (Brugnaro ve diğ. 2019). ETH Zürich Mimarlık Teknoloji Enstitüsü'ndeki Blok Araştırma Grubu (Block Research Group) dijital stereotomi üzerine yaptıkları çalışmalarda, yapısal gereklilikleri ele alarak kendi kendini taşıyan taş tonoz için geleneksel stereotomiye yeniden ele almaktadır (Şekil 3.6). Karmaşık kubbe geometrisi için mevcut üretim yöntemlerini analiz ederek geliştirmek amacıyla örnek çalışma yürütmektedir (Rippmann, M., & Block, P., 2011).



Şekil 3.6: Karmaşık kubbe geometrisi için stereotomik çalışma (Rippmann, M., & Block, P., 2011)

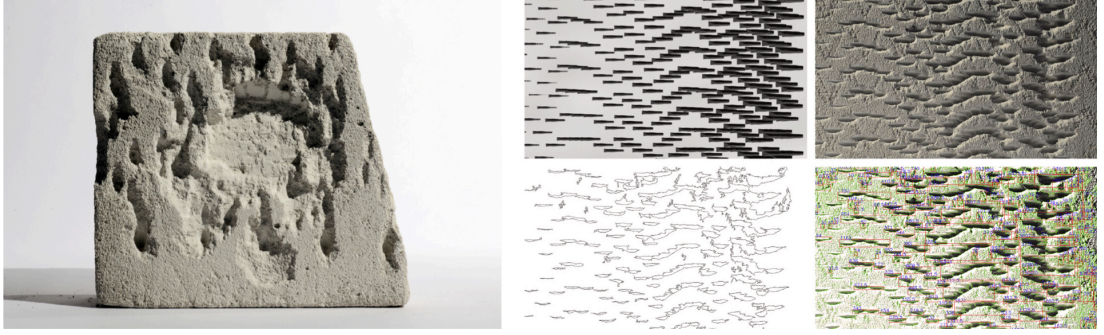
Başka bir proje, kendi kendini taşıyan strüktürlerde bağlantı çeşitleri üzerine bir araştırma yürüterek stereotomik çalışmalara odaklanmıştır (Şekil3.7). Farklı geometrik karmaşıklıkta bağlantı tipolojilerinde ampirik bir çalışma yürütülerek farklı tipolojideki bağlantıların performans kriterleri ve bu elemanların malzeme, uç, operasyon gibi değişen parametreler sonrası üretim stratejileri incelenmiştir (Fernando ve diğ., 2019).



Şekil 3.7: Üst, 7 eksenli robot ile işleme süreci. Alt, işlenmiş parçalar ve prototip (Fernando ve diğ. 2019)

Son araştırmalar uyarlanabilir robotik taş oymacılığı üzerinedir. Kestirilemeyen malzeme davranışa yönelik bu deneyde geri besleme için sensör ve geliştirilmiş bir takım kullanılmıştır. Burada hem robot hem de sensör araç takımı istemci görevi görürken, sunucu verileri toplar ve oyma yinelemeleri arasında entegre modeli

günceller (Shaked ve diğ. 2020). Hedef geometriye ulaşılan kadar her bir oymadan sonra dijital model güncellenir ve işlem yinelenir (Şekil 3.8). Bu çalışma, yüksek çözünürlükte taramanın, fabrika sınıfı bir uç efektör geliştirmenin ve doğru bir şekilde etmenin önemini vurgulamaktadır (Shaked ve diğ. 2020). Değişen malzeme senaryolarına uyum sağlayabilir ve bu nedenle, doğası belirsiz bir dizi malzeme kullanılarak karmaşık mimari elemanların üretilmesine izin vermesi hedeflenir.



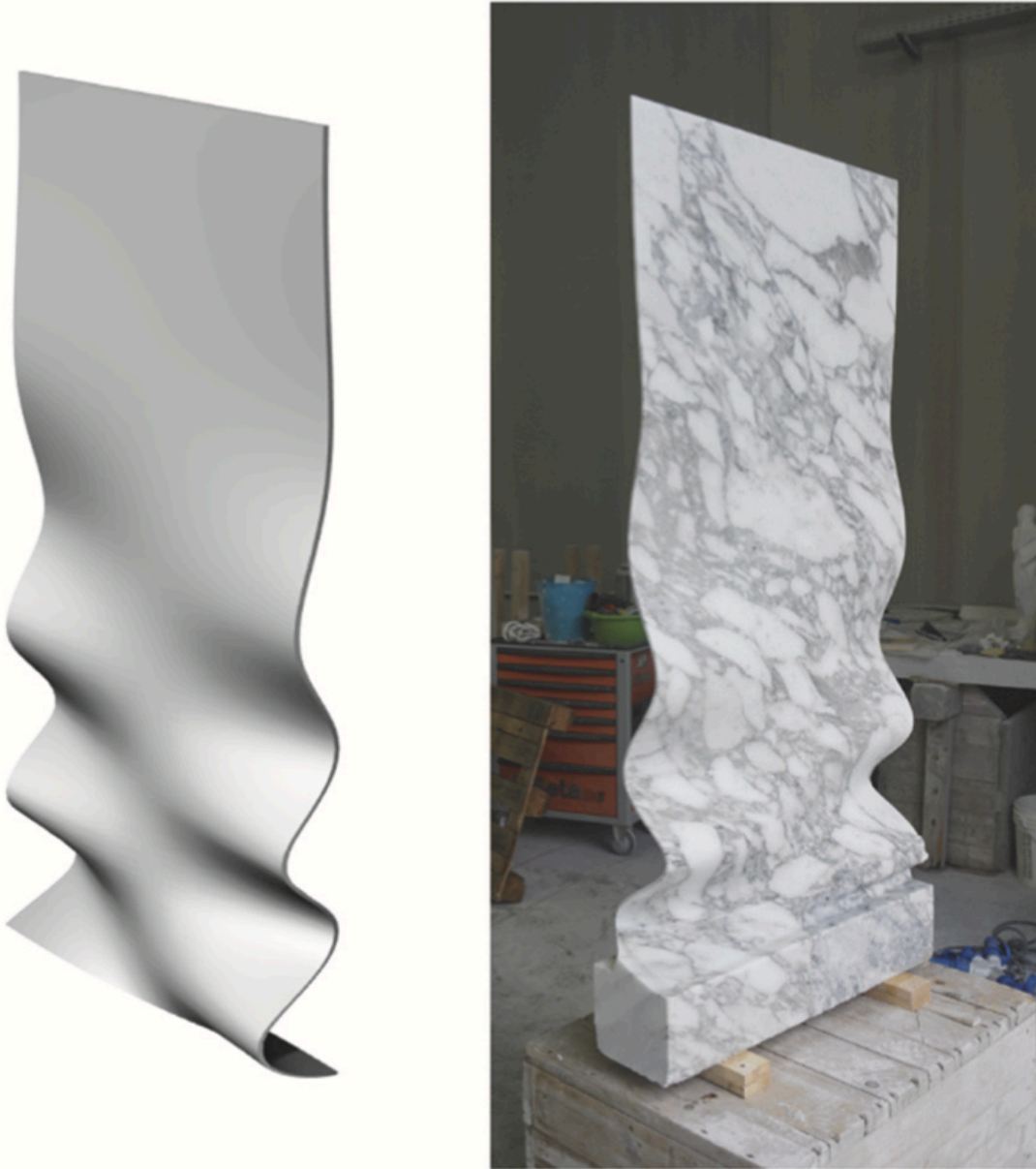
Şekil 3.8 : İşlenen geometri, dijital ve fiziksel takımyolu (Shaked ve diğ. 2020)

Tasarım, mimari ve sanatta yaratıcı süreçleri yönlendirmek için yeni etkileşim metodolojilerinin potansiyelinin geliştirildiği Dijital Taş Projesi'nin 2018'deki atölyesinden ilk örnek incelemesinde, terk edilmiş bir mermer kayanın yüzeyinde, yüzeysel bir desen oluşturmak için entegre bir 3D taramadan frezelemeye çözüm oluşturulan örnekte, bir lazer tarayıcı ile algoritmik ortama aktarılan malzeme, kullanıcı tarafından belirlenen desen boyutu, türü ve takım yolu parametreleriyle özelleştirilmiştir (Şekil 3.9). 5 mm çapında bir freze ucu ile yaklaşık 2 saat süren işlem robot üzerinde başarıyla yürütüldükten sonra parçaya herhangi bir son işlem veya cila uygulanmamıştır (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).



Şekil 3.9 : Taranarak yüzey geometrisi oluşturulan model(sol), işlenmiş malzeme(sağ) (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).

Aynı araştırmadan başka bir örnek; geniş, dalgalı ve ultra ince bir mermer yüzeyi şekillendirmek için etkileşimli bir modelleme çerçevesi geliştirilmiştir ve büyük hassasiyet ile üretilmiştir (Şekil 3.10). Frezeleme işlemleri, bir CNC yazılımı ile programlanarak ürün, 6 eksenli endüstriyel bir robotik kola harici bir döner tabla eklenmesi ile 7 eksen kullanılarak frezelenmiştir. Frezeleme işi, bir ilk kaba oyma ardından da detaylandırma ile toplamda yaklaşık 36 saatte bitirilmiştir (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).



Şekil 3.10 : Dijital Taş Projesi dijital model (sol), işlenmiş parça (sağ) (Garcia del Castillo y Lopez, 2022).

Robot kol ile taş işleme üzerine yer verilen örnekler, son zamanlarda bu alanda yapılan nitelikli çalışma sayısı artmış olsa da giriş bölümünde açıklanan literatürdeki açığı doğrulamaktadır.

4.ROBOT KOL İLE DOĞAL TAŞ İŞLEME İÇİN BİR ÇERÇEVE ÖNERİSİ

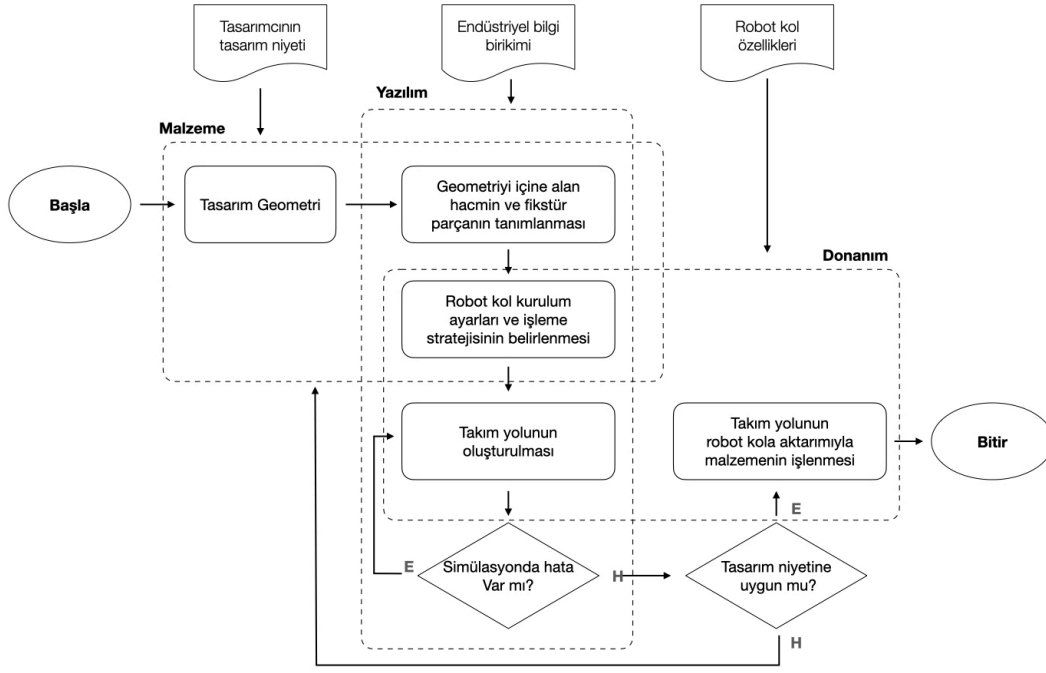
Bu bölümde endüstriyel taş işlemeciliğindeki örtük bilginin de eklemlendiği simülasyon modelleri ile doğal taş işleme için bir çerçeve önerisi sunmayı hedefleyen araştırmanın çerçeve parametrelerinin elde edildiği alan çalışmaları detaylı şekilde incelenmiş, çalışmalarda tercih edilen simülasyon ortamı, işleme aracı ve örtük bilgi girdisini oluşturacak malzemeye ilişkin bilgilere değinilmiştir. Araştırmanın kurgusunun anlatılmasıyla başlayan bölüm, geometri, detay, malzeme, operasyon ve süre ilişkilerinin incelendiği iki farklı alan araştırması ile devam etmektedir. Bölüm sonunda elde edilen verilerin yorumlanması ışığında taş işleme için tasarımcılara öneri niteliğinde bir çerçeve geliştirilmiştir.

4.1. Araştırma Kurgusu

Robot kol ile doğal taş işleme için bir çerçeve geliştirme önerisi, tasarımcıların tasarım niyetlerini bilgi kaybı olmadan üretim aracına aktarırken aynı zamanda gerçek uygulama bilgisinden de beslenen bir kurgu yaratma ana hedefine sahiptir. Bu hedefe ulaşmak için sırasıyla malzeme, yazılım ve donanıma ilişkin verilerden beslenen bir sistem ile incelenen simülasyon aşamaları farklılaşan adımlar içerecek şekilde kurgulanarak araştırmanın veri sağlayacak iş akışı oluşturulmuştur (Şekil 4.1):

- Malzeme ve Geometri:

Önceki bölümlerde detaylı olarak değinildiği gibi, bahsedilen tasarım niyeti veya düşüncesi, üretim söz konusu olduğunda, kullanılan malzeme ile doğrudan ilişki içindedir. Doğal taşın homojen olmayan yapısı, malzeme tercihinin ek bir katman olarak bu malzemenin nasıl bir geometri üretmek için kullanılacağını da önemli kılmaktadır.



Şekil 4.1: Araştırma kurgusu akışı.

Araştırma kapsamında değerlendirmeye alınacak doğal taşların seçimi, araştırmanın örtük bilgi katmanını oluşturan Gürmas Gürel firması ile yapılan görüşmelerde elde edilen bilgiler doğrultusunda, onların daha önce fiziksel üretimini gerçekleştirmiş oldukları bir uygulamanın incelenmesi sonucu yapılmıştır. Aynı karmaşık mukarnas geometrisinin Marmara beyazı ve Dolomit taşları ile üretilmesi sonucu elde edilen veriler, yazılım ve donanım ayaklarında da girdi teşkil etmektedir (Şekil 4.2).



Marmara beyazı; daha çok iç mekân ve banyo ile özdeşleştirilse de su bulunan her ortamda kullanılabilir özelliğe sahiptir. Bu sebeple dış mekan sanat üretimlerinde de sıklıkla tercih edilmektedir. Dolomit beyaz, kireç taşlarının magnezyum bakımından zengin sularından etkilenerek oluşmaktadır. Beyazın sıklıkla kullanıldığı banyo karolarında, aksesuarlarda, duvar kaplamalarında ve zemin döşemelerinde kullanımı yaygındır. İki taş da blok ve plaka olarak üretilmesinin yanı sıra ebatlı şekilde kesilebilir. Gürmas Gürel ile yapılan görüşmeler sonucu aynı geometrinin bu iki farklı taş ile üretilmesi durumunda, kompleks geometrilerde kullanılması gereken işleme hızı değerleri bilgisi elde edilmiştir. Dolomitin Marmara beyazına kıyasla daha sert ve yoğun bir malzeme olması işleme aşamasında daha yavaş ilerleme yapılması gerekliliğini beraberinde getirmektedir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.2: Solda: Gürmal Gürel üretimi Marmara beyazı mukarnas; Sağ üst: Marmara beyazı mermer; Sağ alt: Beyaz dolomit.

Malzemenin dolaylı olarak etkilediği geometrik üretilere göre, süre verisinin incelenmesi araştırmanın önemli bir veri sağlayıcısı durumundadır. Bu sebeple alan çalışmaları basit ve karmaşık geometrileri farklı taşlar üzerinden inceleyecek şekilde düzenlenmiştir. Alan araştırmasında detaylı şekilde açıklanacak olan sözkonusu basit geometri; bir küp üzerindeki farklı eksiltme uygulamalarını, karmaşık geometrilerse; sinüs eğrisi formülasyon derecelerinin değişmesi ile elde edilen geometrileri içermektedir.

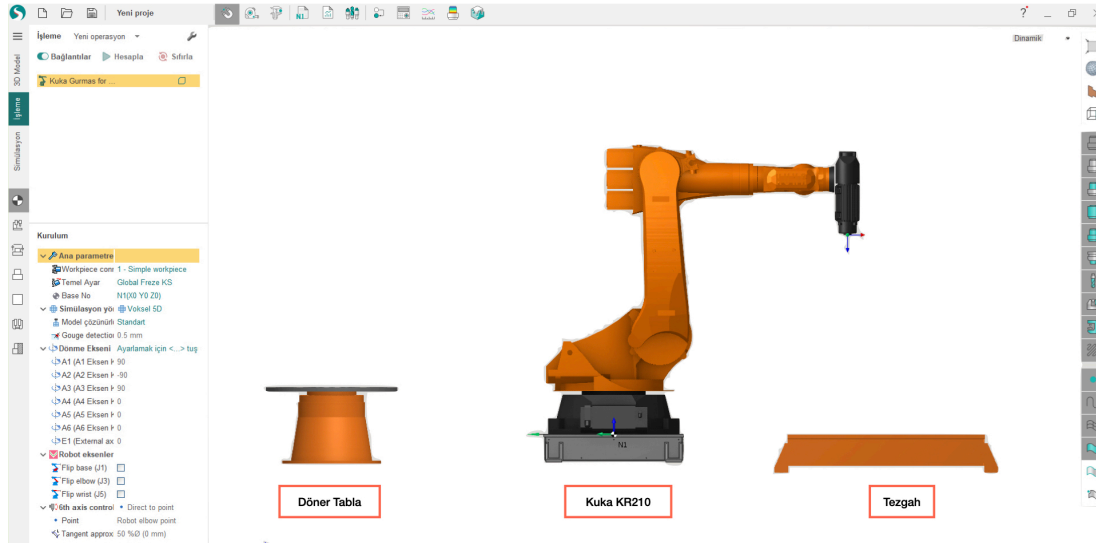
Çizelge 4.1: Marmara beyazı ve dolomit malzemelerin sertlik ve yoğunluk farkına göre işleme hızı değişimleri.

Doğal Taş	Tür	Sertlik (Mohs)	Yoğunluk (g/cm ³)	İşleme Hızı (mm/dk)
	Marmara Beyazı	3	2,71	800
	Dolomit	4	3,2	300

- Yazılım ve Donanım:

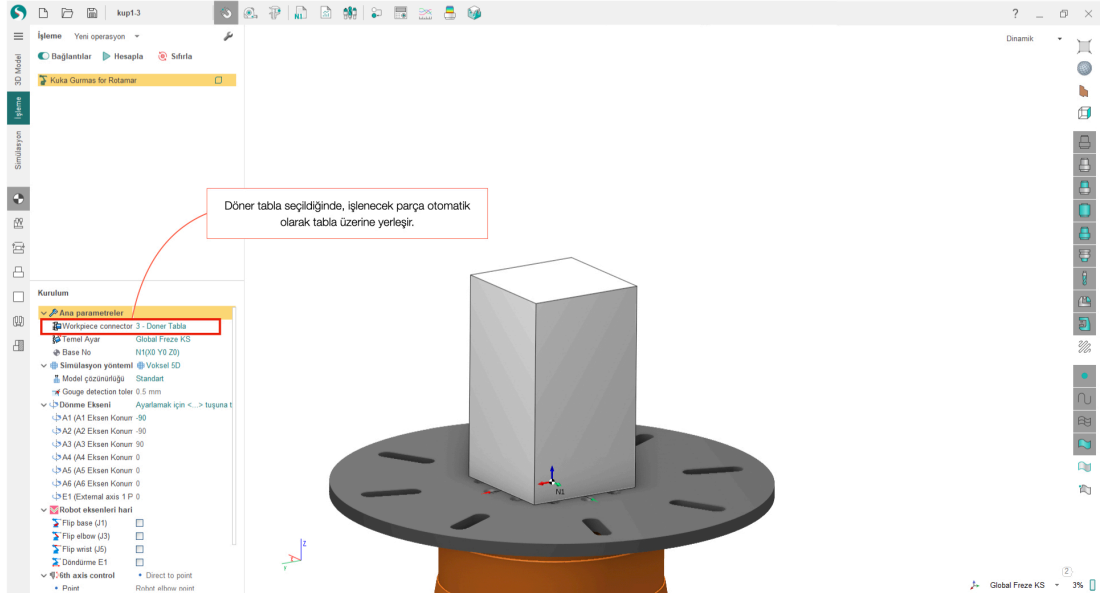
Çalışma kapsamında robot hareketini simüle etmek, robotun çalışması için takım yolunu oluşturmak ve etkileşimli bir ortamda robotun hareketi ve üretilen formlar arasındaki ilişkiyi görsel olarak anlamak amacıyla, KUKA, ABB ve UR'nin endüstriyel robotlarını kontrol etmek için bir CAM yazılımı olan SprutCAM programı kullanılmıştır.

Dijital olarak modellenmiş bir geometrinin CAM arayüzündeki temel bir takım yolu oluşturma işlemi, genellikle üretimi gerçekleştirecek robot kolun kurulum ayarlarının yapılmasıyla başlamaktadır. Burada program içerisinde var olan robot sistemlerinden biri seçilebileceği gibi özelleştirilmiş sistemler de eklenebilmektedir. Çalışmanın endüstriyel örtük bilgi odağını Gürmas Gürel firmasının desteklemesi sebebiyle firma bünyesindeki robot kol kurulumlarından 6 eksenli Kuka KR210'ın döner table ile birlikte 7 eksenli hale geldiği üretim ayarları çalışmada kullanılmıştır (Şekil 4.3).



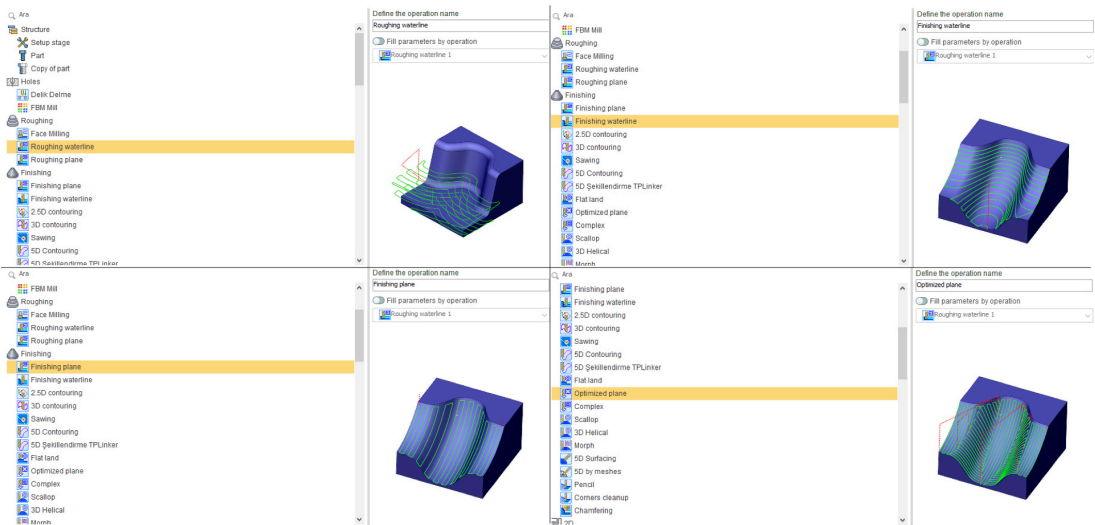
Şekil 4.3: Kuka KR210 ve döner tabla ile 7 eksenli üretim kurulumu.

Robot kolun seçiminin ardından tasarlanan dijital nesne arayüz içerisine aktarılır, onun haricindeki işlenecek parça yani malzeme, parçayı sabitleyen fikstür ve varsa parçada işlenmemesi gereken kısım/kısımlar dijital model olarak eklenebileceği gibi arayüz içerisinde de oluşturulabilmektedir. İşlenecek parçaya ait bu modeller, robot kolun işlemeyi gerçekleştireceği uygun koordinat pozisyonuna getirilmesinin ardından, robot kolun işlemeyi gerçekleştireceği yüzey olan sabit tezgah veya döner tabla üzerine yerleştirilmesiyle kurulumun ilk aşaması tamamlanmış olur (Şekil 4.4).



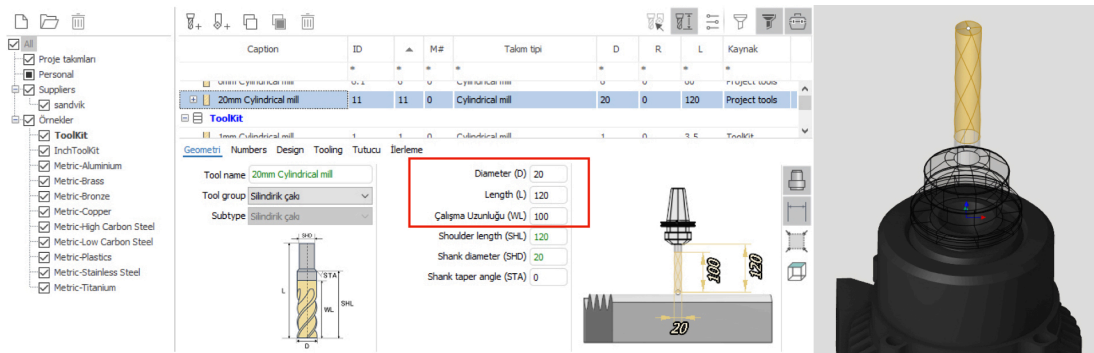
Şekil 4.4: Modelin döner tablaya yerleştirilme aşamaları.

İşleme süreçleri daha önce bahsedildiği üzere ana olarak kaba işleme ve ince işleme olmak üzere iki aşamalı ilerlemektedir. Geometriye göre tanımlanan operasyonlar sırasıyla gerçekleştirilir. Alan çalışması kapsamında SprutCAM arayüzü tercih edilmesinin nedenlerinden biri de kullanıcıya sunmuş olduğu çeşitli ön tanımlı operasyon seçenekleri barındırmasıdır. Bu noktada önemli olan dijital modelin formuna uygun operasyonun belirlenerek takım yolunun oluşturulmasıdır. Seçilen arayüz olan SprutCAM'in operasyonu seçme konusunda hareketli anlatımı forma ilişkin operasyon seçiminde fazlasıyla yardımcı olmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5: Operasyon seçme aşamaları.

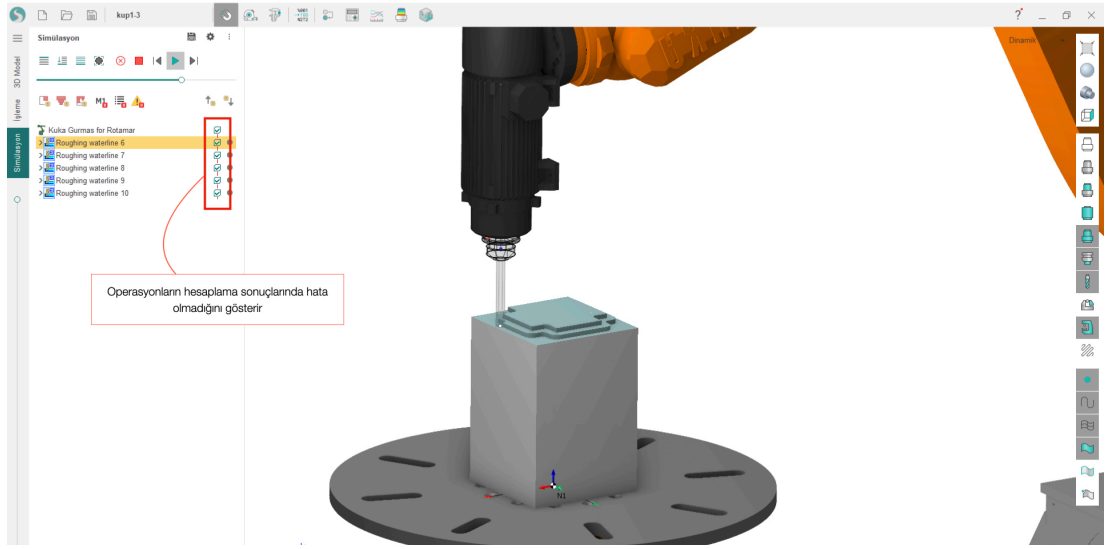
Forma uygun olarak bu tanımlı operasyonlardan biri seçildikten sonra o operasyonda kullanılacak takım ucu, yine arayüz içerisindeki silindirik, konik, disk gibi tanımlanmış geometrilerden biri seçilebileceği gibi özel bir uç da kütüphaneye eklenerek operasyonda kullanılmak üzere belirlenebilir. Takım ucunun tipine karar verildikten sonra ucun diş sayısı, çapı, uzunluğu, çalışma uzunluğu, tutucu tipi özellikleri oluşturulur. Alet, yalnızca ulaşabileceği noktaları işleyebileceğinden köşeler ve içbükey yüzeyler gibi bazı kısımlar takım çapından küçükse; bu alanların işlenmesi o aletle mümkün olmayacağından sonuçta ortaya çıkan malzeme şekli, dijital modeldeki ilk yüzey geometrisinden farklı olacaktır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Uç seçme aşamaları

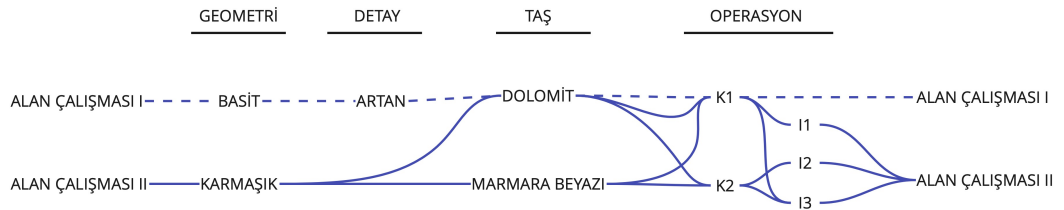
Operasyona ait uç seçiminin ardından birinci olarak, robotun eksenleri o operasyonun çalışmasına uygun konum ve döndürme değerlerince belirlenir. İkinci olarak, operasyonun gerçekleştirileceği bölge tanımlanır. Bu, kolun çalışma yönüne göre iki düzlem arasında bir bölge olabileceği gibi, noktalar, çizgiler, düzlemler veya üç boyutlu yüzeyler de işlemin türüne göre farklı kombinasyonlar halinde parça tanımlı yapmakta kullanılabilir. Ek olarak, takım ucunun malzeme yüzeyindeki akış yönü ve bu yönün deseni ön ayarlı seçeneklerden doğrusal, spiral vb olarak seçilebilmektedir. Üçüncü olarak, işleme hızı belirlenir. Gürmas Gürel'den edinilen bilgi doğrultusunda; işleme hızı, malzemenin sertlik derecesi ile ters orantılıdır. Yani sertlik arttıkça işleme hızının düşmesi gerekir, aksi halde malzemede çatlama veya uç kırılması gibi istenmeyen durumlar oluşur. Ayrıca, bir takım yolu modelindeki yollar arasındaki mesafe olarak tanımlanan takımın adım mesafesi, işlenmiş alanlarda herhangi bir malzeme kalmadan pürüzsüz yüzeyler elde etmek için çok küçük mesafeler olarak tanımlanabileceği gibi, tasarımcının malzeme üzerinde nasıl bir yüzey oluşturmak istediğine göre de belirlenebilir.

Takım yolunu sonlandırmak ve oluşturmak için tanımlanmış operasyonlar sırasıyla hesaplanarak her bir operasyon için sorun olup olmadığı ortaya çıkarılır. Operasyonlarda sorun olmaması halinde tüm işlemler simüle edilerek üretim öncesi ortaya çıkması muhtemel şekiller hakkında temel bir fikir edinilir ve takım yolunun hatasız çalışıp çalışmadığının kontrolü sağlanır. Tasarımcılar dijital modellerini gerçekte işlemeden forma ilişkin araştırmaları için farklı parametrelerle deney yapabilirler (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Hatasız hesaplanan operasyonların simülasyonu.

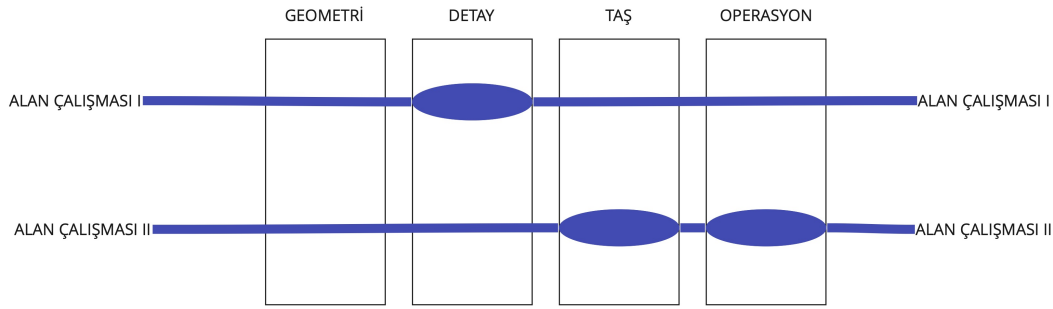
SprutCAM ile ilgili açıklamalardan da anlaşılacağı gibi, aynı model üzerinde, üretim araçları (robot kol türü, üretim hattı, işleme ucu), işleme operasyonları ve hız parametrelerinin değiştirilmesiyle, yüzlerce farklı sonuç elde edilebilir. Bu sebeple tasarımcılara yol gösteren içerik ve basitlikte bir çerçeve oluşturulabilmesi için bu araştırmanın kapsamı, basit ve karmaşık geometriler üzerinde, aynı işlemleri aynı işleme ucu ve üretim hattı üzerinden, farklı taşlarla da gözlemlenebilen, süre bazında karşılaştırmakla sınırlandırılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Alan çalışmaları akış ve kapsamı. K1 ve 2 kaba işleme operasyonlarını, I 1- 2-3 ince işleme operasyonları ifade etmektedir.

4.2. Alan Çalışması

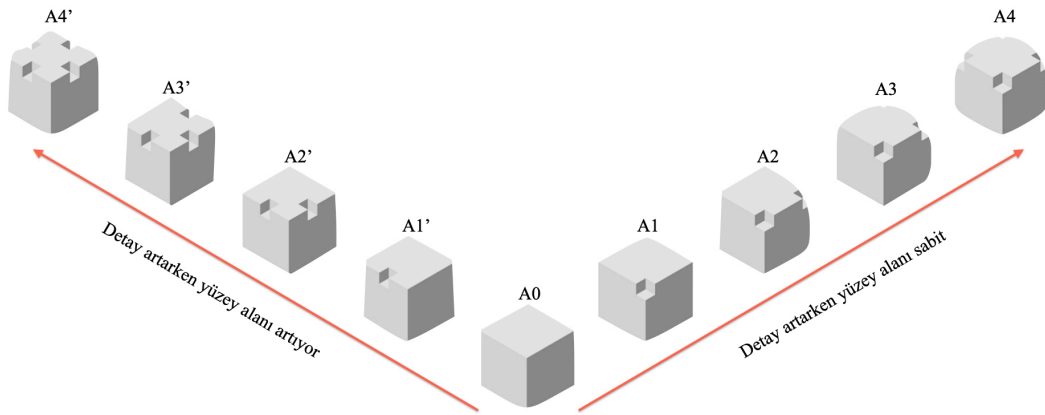
Robot kol ile doğal taş işleme üzerine oluşturulacak çerçeveye temel olacak bir veri seti elde etmek için çıktıları birbiri ile ilişkili olarak yorumlanabilecek iki farklı bir alan çalışması kurgulanmıştır. Birinci alan çalışmasında, basit geometride detay artışı ve işlem süresi arasındaki ilişkiye odaklanılırken, ikincide, karmaşık geometrielerde malzeme, operasyon ve işlem süresine farkları araştırılmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Alan çalışmaları araştırma odakları.

4.2.1. Alan çalışması I: geometrik detay odaklı

Alan çalışmasının ilk kısmındaki deneyler, yüzey alanı, geometrik detay ve işleme süresi arasındaki ilişkiye odaklanmaktadır. Araştırma, yüzey alanı sabit tutularak geometrik detay artışı sağlanan ilk grup modeller ve yüzey alanı belirli oranda artırılarak geometrik detay artışı sağlanan ikinci grup modeller olmak üzere iki yönlü geliştirilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: Deney geometrilerinin ilişkisi.

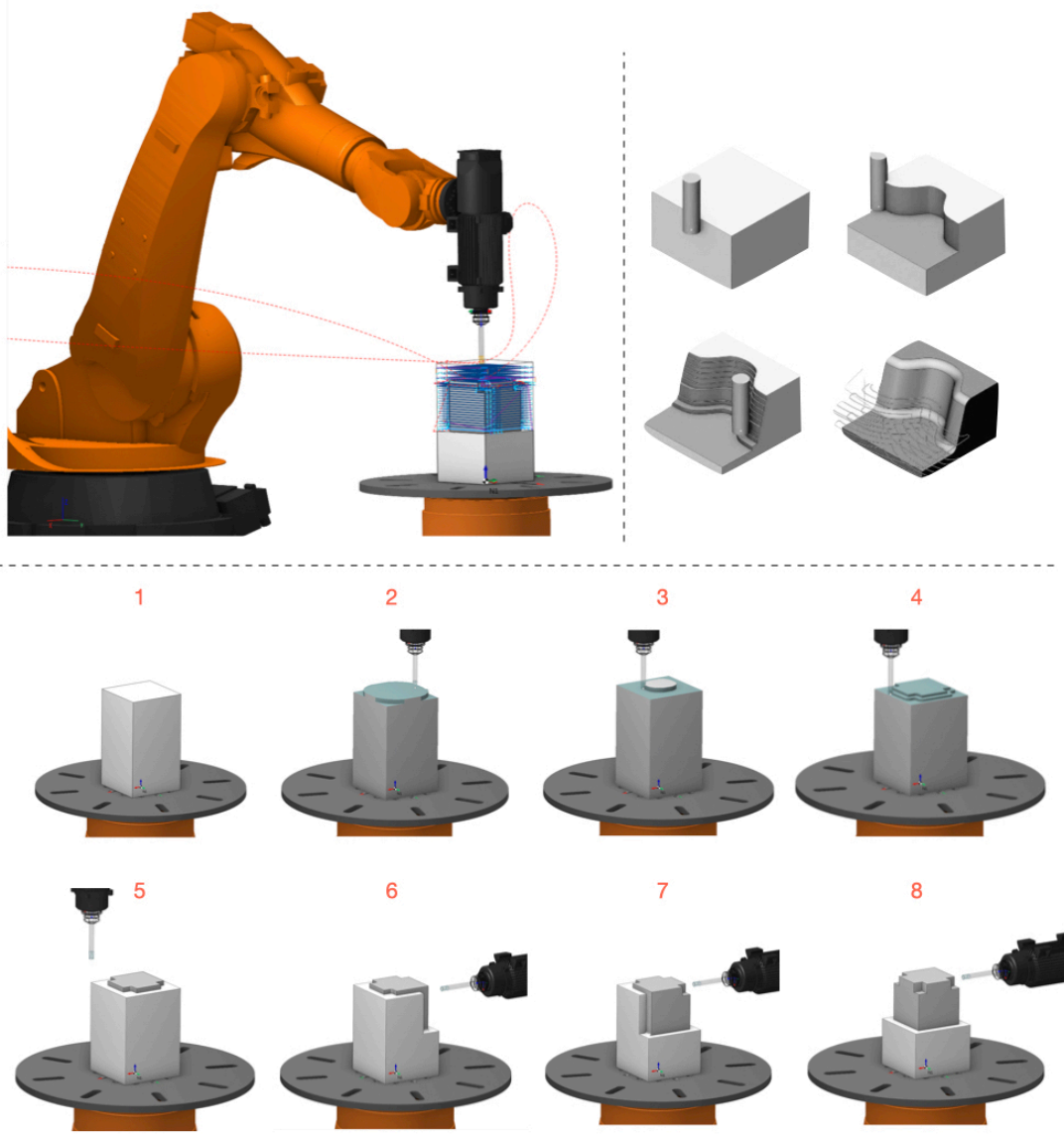
Başlangıç geometrisi Rhino 7, Grasshopper ortamında 20*20 cm'lik bir küp (A0) oluşturularak başlayan süreç bu küpten her bir adımda 4*4 cm'lik küp geometrisi çıkarılması ile devam etmiştir. Deneyin birinci aşaması için aşamalı olarak çıkarılan küçük küpler ilk geometrinin(A0) köşe konumlarından çıkarılarak toplam yüzey alanının sabit kalması sağlanmış, bu şekilde A1, A2, A3 ve A4 geometrileri elde edilmiştir. Deneyin ikinci aşamasında ise A0 temel geometrisinden çıkarılan küçük küpler A0'ın üst yüzey ayrıtlarını ortalayacak şekilde çıkarılarak yüzey alanında her bir adım için belli bir artış sağlanmış, sonucunda A1', A2', A3' ve A4' geometrileri elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Simülasyon girdileri.

Geometri	Yüzey Alanı (cm2)	Nokta Sayısı	Yüzey Sayısı
A0	2000	6	8
A1	2000	9	14
A2	2000	12	20
A3	2000	15	26
A4	2000	18	32
A1'	2032	10	16
A2'	2064	14	24
A3'	2096	18	32
A4'	2128	22	40

Simülasyon deneyleri boyunca farklılaşan her bir dijital model için aynı taş malzeme, Marmara beyazı, kullanımı kabulüyle aynı takım yolları kullanılarak bilinçli bir şekilde değişken parametre sayısı az tutulmuş, böylece işlem süresinin geometrik detay artışına bağlı kıyaslanması hedeflenmiştir. Kıyaslama işlemi için seçilen operasyon taş işlemede kaba uygulamalarda sıklıkla tercih edilen “roughing waterline” (kaba suyoru) operasyonudur. Bu operasyonda işleme ucu, bir katmanı bitirdikten sonra diğerine geçecek bir şekilde katmanlı bir eksiltme sistemi uygular.

Malzeme 5 yönden işlenmesi uygun olduğu için uygulamayı kolaylaştırmak amacıyla 6 eksenli robot kol döner tabla ile 7 eksenli kurgu haline getirilmiştir (Şekil 4.11). Tüm basit geometrilere, uygulanan işlem, hız ve işleme ucu sabit tutularak hatasız simülasyon gerçekleştirilmesi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.3'teki gibidir.



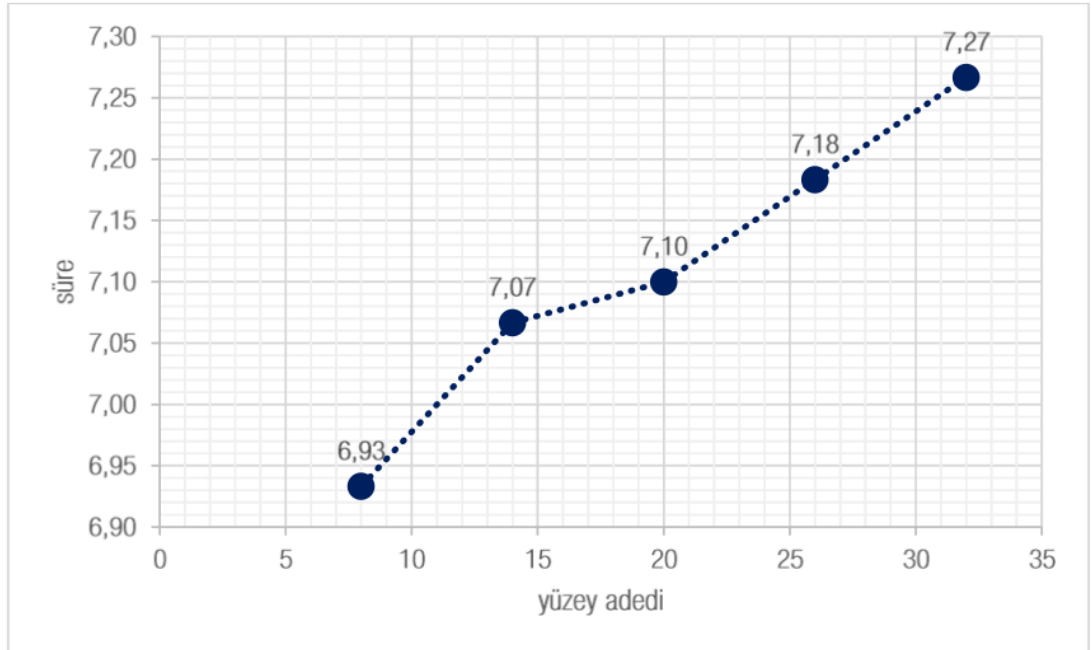
Şekil 4.11: Sol üst: 7 eksenli döner tablalı işleme kurgusu; Sağ üst: Kaba suyuolu işleme aşamaları; Alt: İşleme aşamaları.

Yüzey alanı aynı olan A0-1-2-3-4 geometrileri değerlendirildiğinde yüzey ve nokta sayısı düzenli olarak artmasına rağmen simülasyon için gerekli total sürede düzenli bir doğrusal bir artış görülmemektedir (Şekil 4.12).

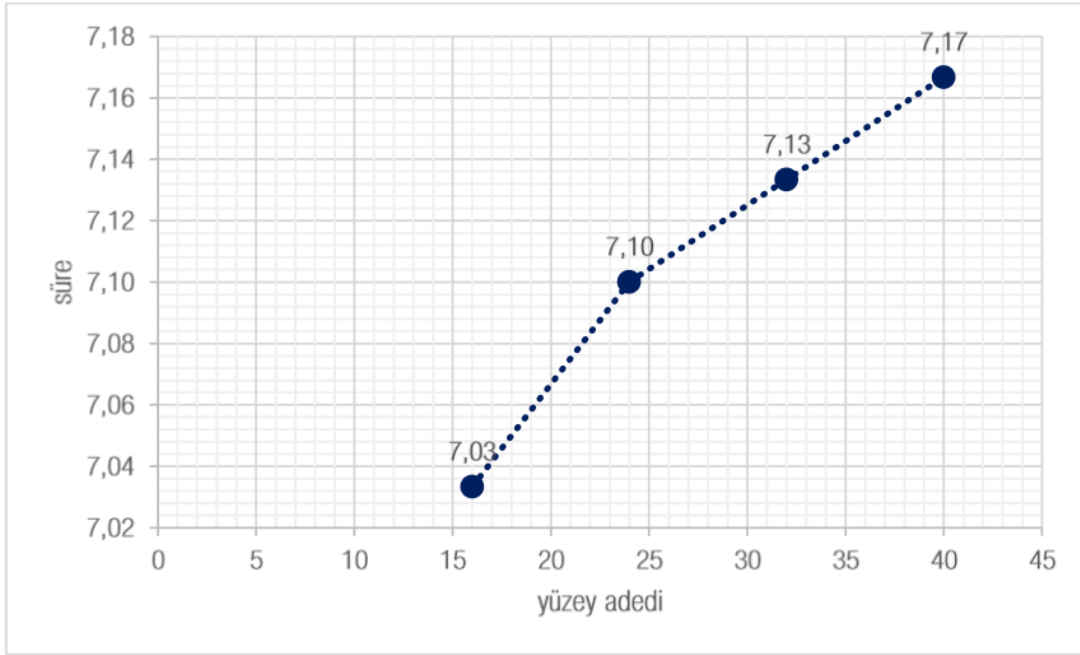
Çizelge 4.3: Simülasyon bulguları.

Geometri	Yüzey Alanı (cm ²)	Nokta Sayısı	Yüzey Sayısı	Süre (saat)
A0	2000	6	8	6,93
A1	2000	9	14	7,07
A2	2000	12	20	7,10
A3	2000	15	26	7,18
A4	2000	18	32	7,27
A1'	2032	10	16	7,03
A2'	2064	14	24	7,10
A3'	2096	18	32	7,13
A4'	2128	22	40	7,17

Yüzey alanı değişen A1'-2'-3'-4' geometrileri değerlendirildiğinde yüzey ve nokta sayısı düzenli olarak artmasına rağmen yüzey alanı aynı olan örneklerle benzer şekilde simülasyon için gerekli total sürede düzenli doğrusal bir artış görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.12: Sabit yüzey alanında yüzey adedi (detay seviyesi) -süre ilişkisi.



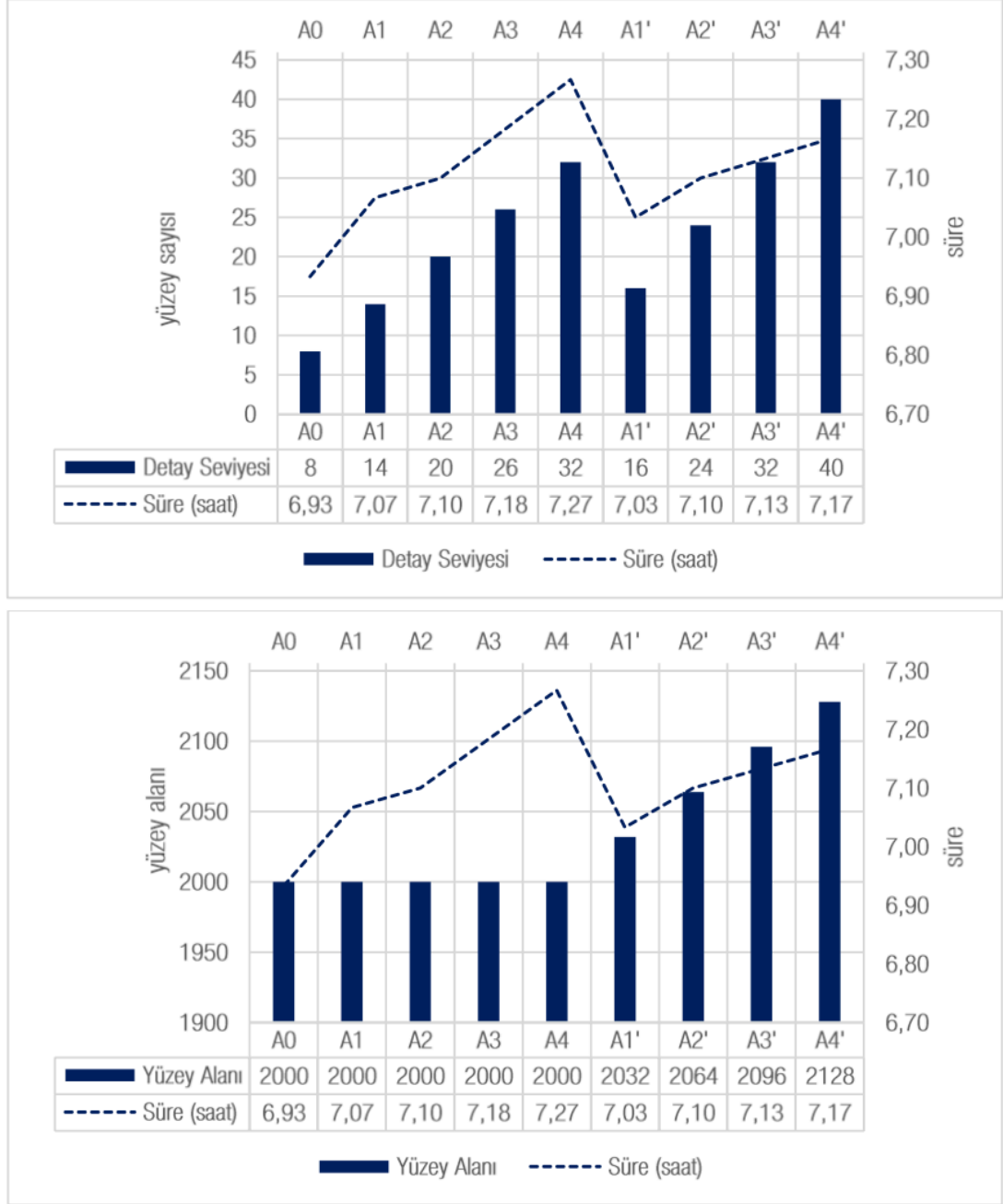
Şekil 4.13: Değişken yüzey alanında yüzey adedi-süre ilişkisi.

Düzenli olmayan bu doğrusal artışa rağmen yüzey alanı ve detay seviyesi verilerinin süre ile korelasyonuna bakıldığında 1'e çok yakın değerlerle karşılaşmaktadır. Bu durum, genel yorumlama ile de tahmin edilebileceği gibi, yüzey alanının ve detay seviyesinin artışının süreyi etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4: Yüzey alanı ve detay seviyesinin süre ile korelasyon değerleri.

Geometri	Yüzey Alanı (cm ²)	Detay seviyesi		Süre (saat)	Korelasyon değeri	
		Nokta Sayısı	Yüzey Sayısı		Yüzey alanı / Süre	Detay seviyesi / Süre
A0	2000	6	8	6,93	0	0,99
A1	2000	9	14	7,07		
A2	2000	12	20	7,10		
A3	2000	15	26	7,18		
A4	2000	18	32	7,27		
A1'	2032	10	16	7,03	0,98	0,98
A2'	2064	14	24	7,10		
A3'	2096	18	32	7,13		
A4'	2128	22	40	7,17		

Ayrı ayrı değerlendirildiğinde yüzey alanı ve detay seviyesinin süreye yüksek etkisini gösteren veriler birarada değerlendirildiğinde ortaya çıkan sonuçlar dikkat çekicidir (Şekil 4.14):



Şekil 4.14: Üst: Yüzey alanı-süre ilişkisini gösteren grafik; Alt: Detay seviyesi-süre ilişkisini gösteren grafik.

- Alan sabit örneklerdeki detay seviyesi artışının süreye etkisi, alan değişken örneklere göre daha fazladır. Bu durum köşe noktalarda işleme sürelerinin kenar orta noktalarındakilere göre süreye etkisinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

- Detay seviyesi aynı, yüzey alanları farklı A4 ve A3' geometrileri üzerinden incelendiğinde yine yüzey alanı artışının süre ile doğru orantılı olmadığı görülmektedir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5: A4 ve A3' geometrilerinin yüksek değer karşılaştırması.

Geometri	Yüzey Alanı (cm2)	Nokta Sayısı	Yüzey Sayısı	Süre (saat)
A4	2000	18	32	7,27
A3'	2096	18	32	7,13

- Yüzey alanı artışı ve detay seviyesindeki azalmanın A4 ve A1' geometrileri arasındaki süre değişimine etkisi dikkat çekicidir. Artan alana rağmen detay seviyesinin azalmasının sürenin azalmasını sağlaması, işleme yapılacak alanların konumlarının, dolayısıyla geometrinin işleme üzerindeki etkisini gösterir niteliktedir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6: A4 ve A1' geometrilerinin yüksek değer karşılaştırması.

Geometri	Yüzey Alanı (cm2)	Nokta Sayısı	Yüzey Sayısı	Süre (saat)
A4	2000	18	32	7,27
A1'	2032	10	16	7,03

Alan çalışması I sonunda verilerin yorumlanması ile elde edilen bulgulara göre;

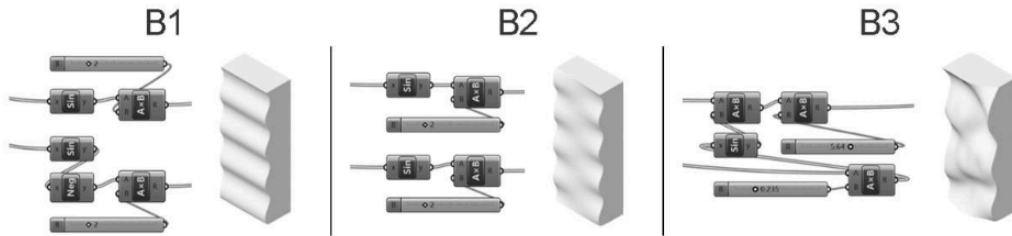
- Basit geometrilerin işlenmesinde 4 Mohs sertlik, 3,2 gr/cm³ yoğunluk değerli Dolomit kullanıldığında kullanılan uçtan bağımsız olarak 200-300 mm/dk hız ile işleme yapılması sonuç ürüne kaba işleme ile ulaşmak için yeterli olmaktadır. Sertlik değeri ile ters orantılı olacak şekilde hızın değiştirilmesi gerekmektedir.
- Basit geometrilerin işlenmesinde kaba suyu (roughing waterline) işleme yöntemi sonuç ürüne en yakın sonucu vermek için yeterlidir. Elbette bu işlemin tekrarlanma gerekliliği kullanılacak işleme ucuna ve tasarımda işlenecek alanların derinliğine de bağlıdır. Alan çalışması I de kullanılan 20 mm'lik silindirik uç, ucun uzunluk parametresinden kısa bir derinlikte işleme yapılacak detay seviyesinde, işlemlerin tek sefer uygulanmasını yeterli kılmıştır. Detay yüzeylerin en-boy parametrelerine göre ucun çapı değiştirilebilir, daha dar alanların işlenmesi için daha küçük çaplı işleme uçları tercih edilebilir. Küçük çaplı uçların işleme süresini arttırıcı etkisi unutulmamalıdır.

- Benzer geometrilerde yüzey alanı artışının süre ile doğru orantılı bir ilişkisi vardır. Ancak imalatta süre artışını asıl etkileyen faktör detay seviyesidir. Basit geometrilerin imalatında köşe noktalara yakın yapılan imalatlar detay seviyesi ve yüzey alanında bağımsız şekilde süreyi uzatabilir niteliktedir. Bu nedenle süre öncelikli imalatlarda tasarımcılar köşe detaylarından çok kenar detaylarına odaklanan tasarımlar geliştirmeyi tercih etmelidir.

Bulgularda değinilen değişen hız ve malzeme parametrelerine göre farklı kararlar verme gerekliliğine cevap bulmak amacıyla Alan çalışması I'ın kapsam ve karmaşıklığı genişletilerek Alan çalışması II kurgulanmıştır.

4.2.2. Alan çalışması II: operasyon odaklı

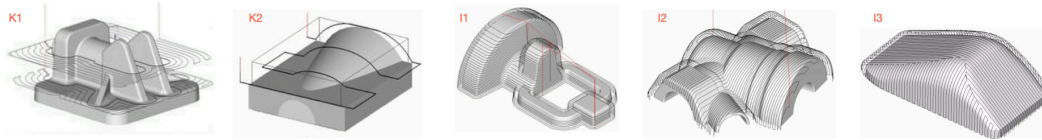
Alan çalışmasının ikinci kısmındaki deneylerde, farklı karmaşıklık seviyelerindeki geometrilerin farklı malzeme ve işlemler ile simülasyon sürelerinin değişimine odaklanılmıştır. Araştırma, dikdörtgenler prizması şeklindeki bir geometrinin bir yüzeyinde sinüs eğrisinin tek yönlü eğrilik oluşturması, çift yönlü eğrilik oluşturması ve rastgele bozulmuş çok yönlü eğrilik oluşturması şeklinde üç formu temel almıştır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: Sinüs eğrileri ile oluşturulan B1-2-3 geometrileri.

Simülasyon deneyleri kapsamında arayüz içerisinde önceden tanımlanmış operasyonlardan 2 farklı kaba işleme ve kaba işlemeyi takip eden 3 farklı ince işleme operasyonu kullanılmıştır. Bunlar kaba işleme için Roughing Waterline (RW) (K1) ve Roughing Plane (RP) (K2) iken ince işleme için Finishing Waterline (FW) (I1), Finishing Plane (FP) (I2) ve Optimized Plane (OP) (I3) operasyonlarıdır. Burada FW yalnızca RW ile, FP yalnızca RP ile, OP ise hem RW hem RP ile birlikte bir takım yolu oluşturmaktadır. Arayüz içerisinde Şekil 4.5 gösterilen çeşitli kaba ve ince işleme operasyonları olmasına karşın yukarıda adı geçen operasyonların seçilmesinin nedeni CAM aracının operasyonun çalışmasını gösteren şema ve açıklamalarından

gelen teknik bilgi ile Gürmas Gürel'den taş malzeme için uygulamada kullanılan operasyon önerisinden gelen örtük bilginin sentezlenmesidir. RW, dijital modelin dışında kalan iş parçasının stok kısmının hat boyunca ucun yatay (XY) hareketiyle çıkarılmasıdır. Büyük oranda parça çıkarımı ve belirli geometrik farklılığa sahip karmaşık modeller için tercih edilir. FP, dijital modelin dışında kalan iş parçasının stok kısmının düzlemsel olarak çıkarılmasıdır. Bitmiş operasyon dijital modelden çok fazla farklılık göstermeyen kaba bir iş parçası edilmesini sağlar. FW, takımın yatay hareketleri sonucu hacmin işlenmesidir. Ana yüzey alanları dikeye yakın olan modelleri veya parçalarını işlerken iyi sonuç verir. Fazla karmaşık geometrilerde düzlemsel operasyonlar ile kullanılması daha iyi sonuç verecektir. FP, model yüzeylerinin düzlemsel işlenmesidir. Geçişler dikey paralel düzlemlerde yapılır ve takım yoluna dik alanların işlenmesinde iyi sonuç verir. Fazla karmaşık geometrilerde yatay hareketli operasyonlar ile birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir. OP, aynı anda karşılıklı dik takım yollarına sahip iki düzlem işlemi ile yüzey işleme gerçekleştirilir. Bu operasyona ait varsayılan parametreler, işlenecek yüzeyleri en iyi sonucu verecek şekilde ayarlıdır. Zor yüzey şekillerin kaliteli işlenmesine olanak tanıırken işleme süresini kısaltır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Alan çalışması II kapsamında tercih edilen operasyonlar (URL-26).

Deneyler içerisinde takım ucuna ait bilgiler aynı tutularak ayırt edici bir parametre olarak değerlendirilmemiştir. Tüm geometri ve taşlar için, kaba işleme ucu silindirik 20mm çapta, 120mm uzunluğunda, 100mm çalışma uzunluğuna sahip olarak ince işleme ucu silindirik 6mm çapta, 80mm uzunluğunda, 60mm çalışma uzunluğuna sahip olarak belirlenmiştir. Tutucu her biri için aynı seçilmiştir. Takım uçları ve takım tutucu, Gürmas Gürel ile yapılan görüşme sonucu ekipmanlarında bulunan iyi sonuç verdiği daha önceden kanıtlanmış tercihlerdir.

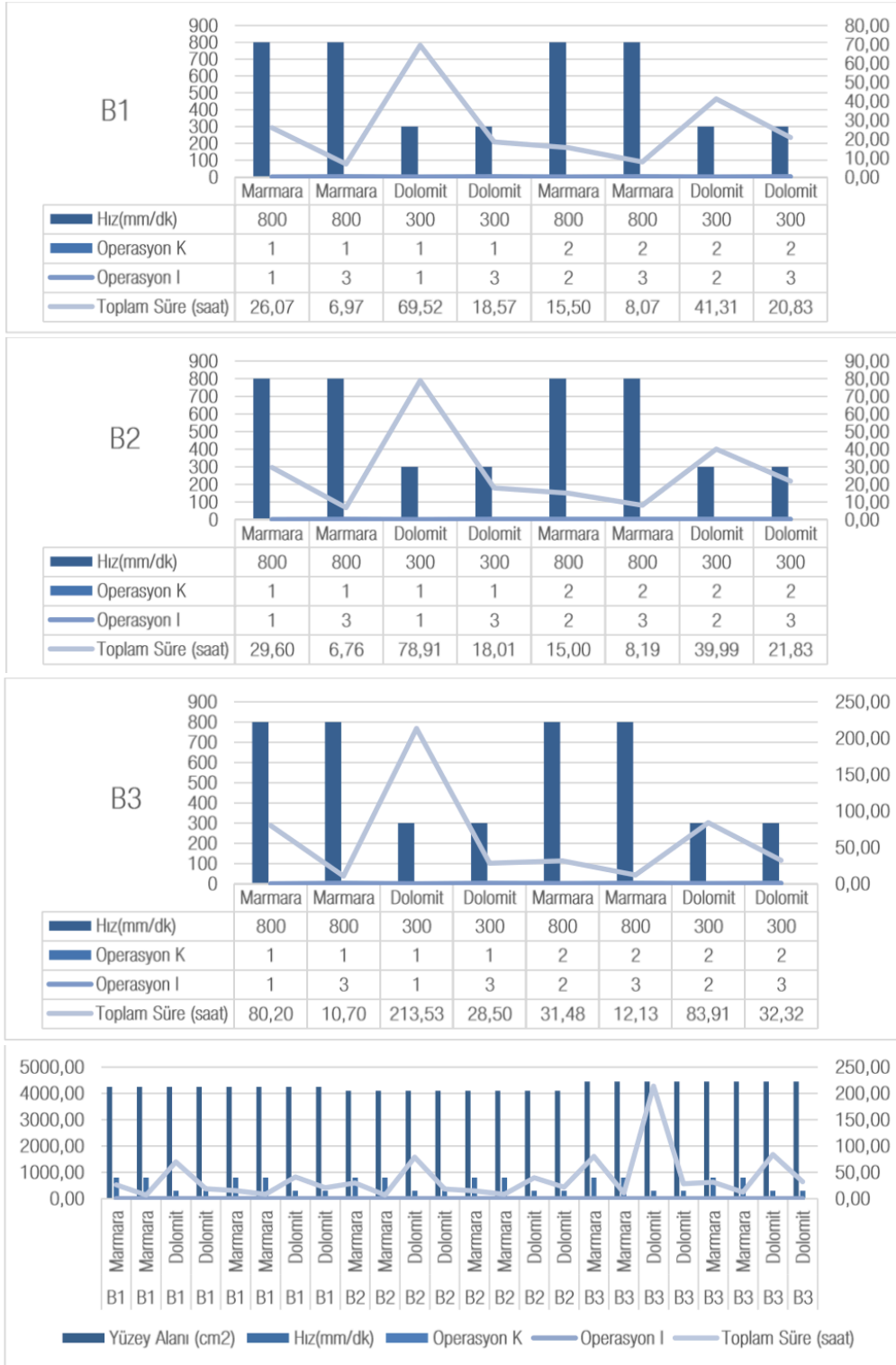
Belirlenen parametrelere göre B1-2 ve 3 geometrilerine Marmara beyazı ve Dolomit özelinde ayrı ayrı K1 ve K2 kaba ile I1-2 ve 3 ince operasyonların uygulanması sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.7'deki gibidir.

Çizelge 4.7: Alan Çalışması II’de elde edilen değerler.

GEOMETRİ	TAŞ	ALAN(cm2)	HIZ	OP 1	SÜRE1(sa)	OP 2	SÜRE2(sa)	T. SÜRE(sa)
B1	Marmara Beyazı	4253,58	800	K1	1,78	I1	24,29	26,07
B1	Marmara Beyazı	4253,58	800	K1	1,78	I3	5,19	6,97
B1	Dolomit	4253,58	300	K1	4,75	I1	64,77	69,52
B1	Dolomit	4253,58	300	K1	4,75	I3	13,82	18,57
B1	Marmara Beyazı	4253,58	800	K2	3,28	I2	12,22	15,5
B1	Marmara Beyazı	4253,58	800	K2	3,28	I3	4,79	8,07
B1	Dolomit	4253,58	300	K2	8,73	I2	32,58	41,31
B1	Dolomit	4253,58	300	K2	8,73	I3	12,10	20,83
B2	Marmara Beyazı	4095,74	800	K1	2,05	I1	27,55	29,6
B2	Marmara Beyazı	4095,74	800	K1	2,05	I3	4,72	6,77
B2	Dolomit	4095,74	300	K1	5,45	I1	73,46	78,91
B2	Dolomit	4095,74	300	K1	5,45	I3	12,56	18,01
B2	Marmara Beyazı	4095,74	800	K2	3,36	I2	11,64	15
B2	Marmara Beyazı	4095,74	800	K2	3,36	I3	4,83	8,19
B2	Dolomit	4095,74	300	K2	8,96	I2	31,02	39,98
B2	Dolomit	4095,74	300	K2	8,96	I3	12,87	21,83
B3	Marmara Beyazı	4452,93	800	K1	2,64	I1	77,57	80,21
B3	Marmara Beyazı	4452,93	800	K1	2,64	I3	8,06	10,7
B3	Dolomit	4452,93	300	K1	7,02	I1	206,50	213,52
B3	Dolomit	4452,93	300	K1	7,02	I3	21,48	28,5
B3	Marmara Beyazı	4452,93	800	K2	4,03	I2	27,45	31,48
B3	Marmara Beyazı	4452,93	800	K2	4,03	I3	8,11	12,14
B3	Dolomit	4452,93	300	K2	10,72	I2	73,19	83,91
B3	Dolomit	4452,93	300	K2	10,72	I3	21,60	32,32

Verilerin yorumlanmasında öncelikle Alan çalışması I’ e benzer bir yöntemle, her bir geometri özelinde incelemeler yapılmış, daha sonra değişken parametreler bütün verilerle değerlendirilmiştir.

- B1-B2 ve B3 geometrileri için Marmara beyazı ve dolomit taşlarına özel inceleme yapıldığında, taşların sertlikleri ile ters orantılı olarak Gürmas Gürel'den alınan bilgi doğrultusunda tanımlanan işleme hızlarının doğal bir sonucu olarak sert olan dolomit taşı işleme sürelerinin daha uzun olduğu görülmektedir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17: B1-2 ve 3 geometrilerinin farklı taşlar ve operasyonlara göre analizi.

- B1-2 ve 3 geometrileri birlikte incelendiğinde (Şekil 4.17) benzer şekilde mermer farklarına ilişkin değişim gözlenmektedir. Ancak bu değişim, yüzey alanı veya detay seviyesi ile doğru orantılı bir artış yerine, kaba ve ince operasyonlar ile daha ilişkili bir etkileşim içindedir. Bu etkileşimi daha net okumak için geometriler operasyonlar özelinde incelendiğinde bazı operasyon ikililerinin diğerlerine göre daha hızlı sonuçlar önerdiği görülmektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18: B1-2 ve 3 geometrilerinin farklı operasyonlara göre analizi.

Grafikler değerlendirildiğinde, malzeme özelinde operasyon kombinasyonlarının etkisinin, biçim karmaşıklığı ve yüzey alanı parametrelerinden bağımsız olarak süreye etki ettiği görülmektedir. Öyle ki yüzey alanı-süre korelasyon değeri her iki doğal taş türü için de, uzak ilişkili olduklarını gösterecek şekilde 0,31 çıkmaktadır.

Geometriden ve doğal taş türünden bağımsız olarak en iyi süre sonuçlarını K1+I3 ve K2+I3 operasyon ikilileri vermektedir.

Alan çalışması II sonunda verilerin yorumlanması ile elde edilen bulgulara göre;

- Sinüs eğrilerinin farklı değerlere göre değiştirilmesi ile elde edilen farklı karmaşıklık seviyesindeki yüzeylerin işlenmesinin etkisinin incelenmesi hedeflenen bu çalışmada, yüzey işlemedeki karmaşıklığın süre kriterine etkisi öngörülen farkları yaratmamıştır. Yüzey sayısının artması, döner tabla ile çalışılan durumlarda, tablanın döndürülmesiyle her yüzeyin aynı şekilde algılanacak olması sebebi ile yine fark yaratmayacaktır. Bu sebeple eğrisel yüzeylerdeki karmaşıklığın süre kriteri önemli tasarımların üretiminde öncelikli kriter olarak ele alınması gerekmemektedir.
- Malzemedeki fark beklendiği gibi sürede bir değişiklik yaratmaktadır. Çalışmada ele alınan Marmara beyazı ve Dolomit taşlarının yoğunluk ve sertlik değerleri arasında çok büyük sayısal farklar yokmuş gibi görünse de (Çizelge 4.1), Gürmas Gürel ile yapılan görüşmeler sonucu sert olan Dolomit için işleme hızı 300mm/dk, Marmara beyazı için işleme hızı 800mm/dk olarak belirlenmiştir. Yoğunluk ve sertlik oranındaki artışla kıyaslandığında çok daha büyük bir hızlanma/yavaşlamaya işaret eden bu değişim, malzemenin üretim için ne kadar önemli olduğunu bir kere daha göstermiştir. Tasarımcılar yoğunluk değerlerine göre kendi kullanacakları taşlar için benzer verileri oranlayarak tasarımlarına dahil edebilir.
- Alan çalışması sonunda karmaşık yüzeylerde en önemli belirleyicinin operasyon ikilileri olduğu sonucuna varılmıştır. Alan çalışmasında önerilen kaba ve ince işleme operasyon önerileri, Gürmas Gürel ile yapılan görüşme sonrası, doğal taş işlemede en çok kullanılan operasyonlar olarak tespit edilen ikililerin kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Veriler sonucu kaba işlemeye eklenerek en iyi süre sonuçlarının elde edilmesini sağlayan optimize yüzey operasyonu,

başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için birçok hesaplamayı kendinin yaparak hataları engellemesiyle de tasarımcılar için üretim simülasyonu süreçlerinde tercih sebebi olabilir niteliktedir.

4.3. Alan Çalışması Bulgularının Değerlendirilmesi

Robotik fabrikasyonla doğal taş işleme üzerine, üretim bilgisi entegre edilmiş sonuçlar elde etmek amacıyla kurgulanmış Alan çalışması I ve II sonucunda, araştırmanın kurgusunda önceki bölümlerde bahsedilen malzeme, geometri, yazılım ve donanım eksenlerinde dikkate değer bulgular elde edilmiştir:

- Malzeme değişkeni açısından incelendiğinde, araştırma kapsamında tercih edilmiş 2 farklı yoğunluk ve sertlikteki doğal taş için uzman bilgisi ile elde edilen hız girdilerinin farklı çıktılarının incelenmesi, malzeme kararının robotik fabrikasyon ile üretim yapılması durumunda tasarım aşamasında ve hatta belki de öncesinde verilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Doğal taş söz konusu olduğunda işlenecek malzeme, imalat süresini etkilemenin yanısıra, sertlik sebebi ile tasarıma biçimsel kısıtlar da getirebilmektedir. Bu sebeple robotik fabrikasyonla doğal taş işlemeye ilişkin bir çerçevenin ilk adımı malzeme tanımlaması olmalıdır.
- Araştırma kapsamında ele alınan Marmara beyazı ve dolomit malzemelerin sertlik değerleri arasındaki 1 Mohs fark, işleme hızında 500mm/dk lık bir değişime sebep olmuştur. Bu fark orantılı olarak diğer taşlara da uyarlanabilir. Ancak, doğal taş malzemenin öngörülemez yapısı, gerçek üretim öncesi kullanılacak malzemeye ilişkin testlerin yapılması ve prototiplerin üretilmesini gerekli kılmaktadır. Bu sebeple çerçevenin ikinci aşaması, kısıtlar dahilinde değilse, tercih edilen malzemenin temini ve bir parçası üzerinde üretim testlerinin yapılması olmalıdır. Fiziksel özellikleri bilinen taşların bile doğal ataklarda yüzyıllar içinde oluşum aşamalarında karşılaştıkları etkiler bilinemeyeceği için, sağlıklı bir üretim sürecinde bu test aşaması kritik önem taşır.
- Bir diğer değişken olan geometri, basit biçimlerde süre parametresine etki etmişken, karmaşık geometrilerde bu etkisi ikincil hale gelmiştir. Alan çalışması I'deki bulguların gösterdiği üzere, geometri basit bir küp olsa dahi, işlenmesi

sırasında, köşelerin işleme operasyonları çok daha uzun sürmektedir. Karmaşık geometrilere bu ayarın yapılmamış olmasının en büyük sebeplerinden biri üretim alanı kurulumunda döner tablanın seçilmiş olmasıdır. Döner tabla ile gelen 7. eksen, robot kol ile üretimi tekrar koordinat ayarı yapmadan, tek yüzeyde çalışabilen bir basitlik seviyesine indirebilmektedir. Bu kolay kullanım, üretim hakimiyeti olmamasına rağmen ürüne ilişkin karar alacak tasarımcılar için, hem süreci anlama rahatlığı sağlamakta hem de geometrik tasarım kısıtlarını bir nebze azalarak tasarım özgürlüğü yaratmaktadır. Dolayısıyla çerçevenin üçüncü ayağı olan donanım parametresinin kurulumunda döner tabla seçilmesi önerilmektedir.

- Çalışmada, robot kollar ile doğal taş işlemede sıklıkla tercih edilen SprutCAM yazılımının kullanılmış olması, çerçevenin bir diğer konusu olan yazılım parametresine ilişkin bir çok problemin çözülmesini sağlamaktadır. Alan çalışması I ve II de tariflenmiş SprutCAM'deki kaba ve ince işleme operasyonları ile, başlangıç seviyesindeki bir tasarımcı bile kolaylıkla sonuç ürün elde edebilecektir. Bu noktada, üretim yapılmayacak olsa dahi, tasarımcıların programa girerek, işlemlerin simülasyon önizlemelerini incelemeleri önemlidir. Kaba işleme operasyonları daha çok yüzey temizlemeye özelleşmeleri sebebi ile final ürüne ulaşmadan tasarım üzerinde bazı katmanlar bırakabilmektedir. Dikkat edilmesi gereken başka bir husus ise, seçilecek işleme operasyonlarının SprutCAM tarafından tanımlanmış işleme yolları sebebi ile, tasarım üzerinde bırakması potansiyel işleme izleridir. Bu izler, ince işleme veya üretim sonrası süreçlerle silinebilecekleri gibi, tasarımın doğal ve istenen bir parçası olarak da kullanılabilir. Bu sayede, robotik fabrikasyonla taş işleminin doğasından kaynaklanan temiz bir bitiş elde edememe hali, bilinçli bir tasarım kararına dönüştürülebilir. Bu potansiyel, tasarımcının fabrikasyondaki tasarım niyetinin aktarımındaki etkisini ve hatta profesyonelliğini gösterebileceği en kritik noktalardan biridir.
- Çerçevenin son adımını ise alan çalışmalarında bahsedilmeyen bilginin yaygınlaştırılması oluşturmaktadır. Bu araştırmadan yapıldığı gibi, özelleşmiş geometri üzerine elde edilen farklı sonuçların birikeceği bir veri havuzunun diğer kullanıcılara sağlayacağı fayda zaman ve maliyet bakımından paha

biçilmezdir. Bilgiyi paylaşmaya odaklı bu yaklaşım, alınacak geri bildirimler ile üreticinin kendisini de besleyektir.

Malzeme, biçim, yazılım, donanım ve paylaşım eksenlerinde öneriler barındıran bu çerçevenin gelişime açık ve esnek bir sistem olduğu unutulmamalıdır. Sonuç bölümünde bu esnekliğin sağladığı potansiyeller, öngörü ve önerilerle ele alınacaktır.

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Üretim süreçlerinin hiyerarşik, sonuç odaklı ve keşiflere sınırlı izin veren yapısı, digital fabrikasyon süreçleri söz konusu olduğunda ürün ve bağlam ilişkisinin güçlü bir şekilde kurulabileceği yaratıcı alanlar barındırmaktadır. Bu alanları "dosyadan fabrikaya" (Schodek, 2005) süreçlerle inceleyen birçok araştırma olmasına rağmen fabrikadan dosyaya süreçler yeterli ilgiyi görmemektedir (Oxman, 2007).

Mimarlıkta dijital fabrikasyon uygulamalarından robot kollar ile üretim süreçleri bahsedilen üretimden teoriye geribeslemeler için büyük bir veri havuzuna sahiptir. Ancak robot kol süreçlerinin diğer dijital fabrikasyon süreçlerine göre daha aşamalı ve komplike olması, robot kollara erişimin zorluğu ve kolları kullanmak için uzmanlık gereksinimi gibi birçok faktör bu alandaki çalışmaları, dolayısıyla geri beslemeleri sınırlı hale getirmiştir.

Tasarımcının üretim süreçlerine hakim olmadığı her prosedür gibi robot kollar ile işleme de tasarım ürününün salt son ürüne dönüşmesi bağlamında ele alındığında, tasarım ruhundan çok şey kaybedilmesine müsait bir düzlem tanımlayabilir.

Bu tez öncelikli olarak, tasarımcıların robot kol ile üretim süreçlerinde etkin rol alarak, üretim sürecini bir tasarım girdisi olarak kullanabilecekleri bir bilgi aktarımı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu amaçla bir çerçeve önerisinde bulunmayı hedefleyen tezde, robot kollar ile işlemenin geniş kapsamı sebebi ile, üzerine yeterince araştırma yapılmadığı tespit edilen doğal taş işleme konusuna odaklanılmıştır. Doğal taşların yapılarındaki heterojenliğin getirdiği belirsizlik tez kapsamında negatif bir girdi olarak ele alınmaktansa, bu sınırın farklı bir bakış açısı ile teze dahil edilmesi kararı verilmiştir. Doğal taş işlemeye yönelik bu bilgilerin ancak gerçek üretimlerden elde edilebilecek olması tezin örtük bilgiyi üretim sürecine dahil eden araştırma kurgusunda yerini bulmuştur.

Tez, kapsamı dahilinde geniş bir literatür araştırması ile başlamış olmasına karşın, robotik fabrikasyon süreçlerinin malzeme, yazılım ve donanım ekseninde her bir kriterde ayrı ayrı alt başlıklara ayrılacak geniş bir havuz olduğu unutulmamalıdır. Günümüzde her gün sürdürülebilirlik, geri dönüşüm, döngüsel ekonomi, optimizasyon, yenilikçi malzemeler gibi birçok farklı alandan beslenerek yeni bir uygulama ve teknikle karşılaşılan bu geniş alanine, sadece konu ile ilgili kısmının aktarıldığı çalışma, şüphesiz ki yayınlanmasından çok kısa bir süre sonra bile bir çok yeni ve ilham verici örnekle yenilenme gereği duyacaktır. Bu durum, dijital fabrikasyon alanının hızla gündem dışı kalmaya veya güncelliğini yitirmeye mahkum olduğu bakış açısıyla değil, her bir çalışmanın başka bir gelişmenin temelini oluşturma potansiyelini barındırması vizyonu ile değerlendirilmelidir.

Tezde de benzer bir yaklaşımla, bilgiyi yaymak, aktarmak, paylaşmak ve paylaşılan bilgi ile katılımcı bir deneyim havuzu oluşturmak için ilk adım olabilecek bir çerçeve sunulmasının gizli bir sebebi de bu kapsayıcı yaklaşımdır. Alan çalışması I ve II kapsamında değerlendirilen konular sonucu elde edilen birikimin paylaşılması ile birçok tasarımcıyı bu alanda üretim yapmaya teşvik etmesi beklenen çalışmanın çerçevesinin son ayağı bu sebeple bilgi paylaşımı olarak belirtilmiştir.

Önerilen çerçevenin genişleyerek başka bilgi birikimlerinden beslenmesi için takip eden çalışmalarda bu araştırma, tasarımcı ve üreticilerin erişilerek kendi veri setlerini girebilecekleri açık erişimli bir veri tabanına dönüştürülebilir. Yalnızca malzeme, kullanılan robot ve üretim bandı, uç takımı ve hız parametresi gibi alan çalışmalarında da tercih edilen bir kaç basit parametre ile üretim sırasında sıkıntı yaşanabilecek bir çok potansiyel problemin önüne geçilebilir.

Çalışmanın gelişme potansiyeli barındıran bir diğer yanı, tercih edilen SprutCAM yazılımının yalnızca doğal taş işlemede değil, her türlü malzeme imalatı ve üretim bandında tercih ediliyor olmasıdır. Doğal taşın öngörülemezliği sebebi ile muğlak kısımları üretici bilgi birikimi ile kapatmaya çalışan bu çalışmadan farklı olarak, aynı çerçeve daha tanımlı malzemeler için, onlara özel süreçler bağlamında uygulanabilir.

Bilgisayar destekli tasarım, temsil ve üretim araçlarının tasarım ediminin vazgeçilmez bir parçası haline geldiği günümüzde, üretim araç ve yönteminin

tasarımın bir girdisi haline gelmesi, mimarlık alanında sayısal tasarım düşüncesine katkı sağlayacak bir yaklaşımdır. Robot kolun işleme izlerine göre bilinçli olarak, belki özellikle kaba işleme halinde bırakılması tercih edilen bir tasarım yaklaşımı örneği, bu girdinin en iyi örneklerinden biri olabilir. Farklı katmanları eşzamanlı olarak değerlendirip çözüm üretmeye yönelik tasarım geliştirme işi olarak yorumlanabilecek mimari tasarımda bu katmanlardan birinin fabrikasyon aracı olması gerekliliği kaçınılmazdır. Bu araştırmanın yakın zamanda mimari tasarım, üretim ve hatta inşaaı uygulamaların vazgeçilmez bir parçası haline geleceği düşünülen robot kollara dair literature katkı sağlayacağı, gelecek çalışmalara girdi oluşturacağı ve konu ile ilgili önyargılı tasarımcıları bu yolla üretime teşvik edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aish, R.** (2013). First build your tools. Inside Smart Geometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design, 36-49.
- Beaman, J. J.** (1997). Historical perspective. JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan, p21-31.
- Bechthold, M.** (2009). New stone shells: design and robotic fabrication. Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures.
- Bechthold, M.** (2010). The return of the future: a second go at robotic construction. Architectural Design, 80(4), 116-121.
- Bidgoli, A., & Cardoso-Llach, D.** (2014). Towards a motion grammar for robotic stereotomy.
- Braumann, J., & Brell-Cokcan, S.** (2012). Digital and physical computing for industrial robots in architecture. In Beyond Codes and Pixels-Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (pp. 317-326). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Braumann, J., & Brell-Cokcan, S.** (2012). Real-time robot simulation and control for architectural design. In Digital Physicality-Proceedings of the 30th eCAADe Conference (pp. 479-486).
- Brell-Cokcan, S., & Braumann, J.** (2010, October). A new parametric design tool for robot milling. In Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (pp. 357-363).
- Brell-Cokcan, S., & Braumann, J.** (Eds.). (2013). Rob| Arch 2012: Robotic fabrication in architecture, art and design. Springer Science & Business Media.
- Brugnarò, G., & Hanna, S.** (2019). Adaptive robotic carving: training methods for the integration of material performances in timber manufacturing. In Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018: Foreword by Sigrid Brell-Çokcan and Johannes Braumann, Association for Robots in Architecture (pp. 336-348). Springer International Publishing.
- Brugnarò, G. and Hanna, S.** (2017). Adaptive robotic training methods for subtractive manufacturing. ACADIA 2017, pp. 164-169.

- Bubola, E.** (2021). ‘We Don’t Need Another Michelangelo’: In Italy, It’s Robots’ Turn to Sculpt. <<https://www.nytimes.com/2021/07/11/world/europe/carrara-italy-robot-sculptures.html>>, erişim tarihi 10.05.2023.
- Cache, B.** (1995). *Earth moves: the furnishing of territories*. MIT press.
- Carmo, M.** (2011). *The alphabet and the algorithm*. MIT Press.
- Carmo, M.** (2013). The Ebb and Flow of Digital Innovation: From Form Making to Form Finding-and Beyond. *Architectural Design*, 83(1), 56-61.
- Carmo, M.** (2017). *The second digital turn: design beyond intelligence*. MIT press.
- Crump, S. S.** (1989). Apparatus and method for creating three-dimensional objects, U.S. Patent 5,121,329, June 9 1989.
- Deckard, C.** (1989). Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US patent 4,863,538, filed October 17th, 1986, published September 5th, 1989.
- Dorfman, P.** (2018). How Would Michelangelo’s Sculpture Look if He’d Had Robot Apprentices? <<https://redshift.autodesk.com/robot-sculpture/>>, erişim tarihi 10.05.2023.
- Dunn, N.** (2012). *Digital fabrication in architecture*. Laurence King Publishing.
- Essinger, J.** (2004). *Jacquard's web: how a hand-loom led to the birth of the information age*. OUP Oxford.
- Fernando, S., Weir, S., Reinhardt, D., & Hannouch, A.** (2019). Towards a multi-criteria framework for stereotomy–Workflows for subtractive fabrication in complex geometries. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 468-478.
- Gershenfeld, N.** (2012). How to make almost anything: The digital fabrication revolution. *Foreign Aff.*, 91, 43.
- Gershenfeld, N., Carney, M., Jenett, B., Calisch, S., & Wilson, S.** (2015). Macrofabrication with digital materials: Robotic assembly. *Architectural design*, 85(5), 122-127.
- Gershenfeld, N., Gershenfeld, A., & Cutcher-Gershenfeld, J.** (2017). *Designing reality: How to survive and thrive in the third digital revolution*. Hachette UK.
- Gramazio, F., & Kohler, M.** (2008). *Digital materiality in architecture*, Lars Müller Publishers, Baden, Switzerland.
- Gramazio, F., & Kohler, M.** (2014). *The robotic touch-how robots change architecture* (pp. 224–237). Switzerland: Park Books.
- Gramazio, F., & Kohler, M.** (Eds.). (2014). *Made by robots: challenging architecture at a larger scale*. John Wiley & Sons.
- Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S.** (Eds.). (2017). *Fabricate 2014: Negotiating Design & Making* (Vol. 2). UCL Press.

- Graser, K., Kahlert, A., & Hall, D. M.** (2021). DFAB HOUSE: implications of a building-scale demonstrator for adoption of digital fabrication in AEC. *Construction Management and Economics*, 39(10), 853-873.
- Hägele, M., Nilsson, K., Pires, J. N., & Bischoff, R.** (2016). Industrial robotics. *Springer handbook of robotics*, 1385-1422.
- Hu, S. J.** (2013). Evolving paradigms of manufacturing: From mass production to mass customization and personalization. *Procedia Cirp*, 7, 3-8.
- Iwamoto, L.** (2009). *Digital fabrications architectural and material techniques*, New York: Princeton Architectural Press.
- Iwamoto, L.** (2013). *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press.
- Keating, S. J.** (2012). Renaissance robotics: novel applications of multipurpose robotic arms spanning design fabrication, utility, and art (Doktora Tezi).
- Klinger, K., & Kolarevic, B.** (2008). *Manufacturing Material Effects. Rethinking Design And Making In Architecture*. New York, 1662-1664.
- Kohler, M., Gramazio, F. and Willmann, J.** (2014). *The robotic touch: how robots change architecture*. Park Books.
- Kodama, H.** (1981a). A scheme for three-dimensional display by automatic fabrication of tree-dimensional model. *IEICE Transactions on Electronics*, Vol. J64-C No.4, pp.237-241.
- Kodama, H.** (1981b). The equipment of automatic method for the three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *IEICE general conference No.5*, p.149.
- Kolarevic, B.** (2000, October). Digital architectures. In *Proceedings of the ACADIA 2000 Conference, ACADIA. 2000. Eternity, Infinity and Virtuality* 251-256.
- Kolarevic, B.** (2001, October). Digital fabrication: manufacturing architecture in the information age. In *Proceedings of the twenty first annual conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture* (pp. 268-278).
- Kolarevic, B.** (2003). *Information master builders. Architecture in the digital age: Design and manufacturing*, 59.
- Kolarevic, B.** (2003). Digital Fabrication: From digital to material. In *Connecting>> The Crossroads of Digital Discourse, Proceedings of the 2003 Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 54-55).
- Kolarevic, B.** (Ed.). (2004). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. Taylor & Francis.

- Kolarevic, B.** (2008). The (risky) craft of digital making. *Manufacturing material effects: Rethinking design and making in architecture*, 119-28.
- Kopplin, J.** (2002). *An illustrated history of computers*. Computer Science Lab.
- Garcia del Castillo y Lopez, J. L.** (2022). The Digital Touch-Towards novel modeling frameworks for robotically-enhanced marble sculpting.
- Marcos, Carlos L..** (2011). *New materiality: ideation, representation and digital fabrication*.
- McGee, W., de Leon, M. P., & Willette, A.** (2014). *Robotic Fabrication in Architecture*. *Art and Design*, 33-49.
- Menges, A.** (2012) *Material computation: Higher integration in morphogenetic design* , *Architectural Design*, 82(2), pp. 14-21
- Menges, A.** (2015) *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational* , John Wiley & Sons
- Menges, A., & Ahlquist, S.** (2011). *Computational design thinking: computation design thinking*. John Wiley & Sons
- Mitchell, W. J., & McCullough, M.** (1995). *Digital design media*. John Wiley & Sons.
- Mitchell, W. J.** (2003). *Design worlds and fabrication machines. Architecture in the digital age: Design and manufacturing*. Taylor & Francis.
- Otto, F., Rasch, B.** (1996). *Finding form towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges.
- Oxman, N.** (2007, September). *Digital craft: fabrication based design in the age of digital production*. In *Workshop Proceedings for Ubicomp 2007: International Conference on Ubiquitous Computing* (pp. 534-538).
- Oxman, N.** (2007). *Rapid Craft: Material Experiments towards an Integrated Sensing Skin System*. In *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture: Expanding Bodies: Art o Citieso Environment*. Halifax, Nova Scotia.
- Pease, W.** (1952). *An automatic machine tool*. *Scientific American*, 187(3), 101-115. <http://www.jstor.org/stable/24950784>, erişim tarihi 30.05.2023.
- Picon, A.** (2010). *Digital culture in architecture*. In *Digital Culture in Architecture*. Birkhäuser.
- Picon, A.** (2014). *Robots and Architecture: Experiments, Fiction, Epistemology*. *Architectural design*, 84(3), 54-59.
- Pye, D.** (1968). *The nature and art of workmanship*, Cambridge University Press, 1968 (ISBN: 9780521060165). London: Herbert Press.
- Retsin, G.** (ed.) (2019). *Discrete: reappraising the digital in architecture*, *Architectural Design Special Issue*, 89(2), Oxford: John Wiley & Sons.

- Rippmann, M., & Block, P.** (2011). Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints. In *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium (Vol. 2011)*.
- San Fratello V., Rael, R.** (2020). *Mud Frontiers, Fabricate*, pp. 22-27, London: UCL Press. DOI: <https://doi.org/10.14324/111.9781787358119>
- Scheurer, F.** (2010). Materialising complexity. *Architectural Design*, 80(4), 86-93.
- Schodek, D. L.** (2005). Digital design and manufacturing: CAD/CAM applications in architecture and design.
- Schwartz, M., & Prasad, J.** (2013). RoboSculpt: Unique molds for design with minimal waste. In *Rob| Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art, and Design* (pp. 230-237). Springer Vienna.
- Sdegno, A.** (2014). What about 3D? Modeling, Visualizing, Materializing.
- Shaked, T., Bar-Sinai, K. L., & Sprecher, A.** (2020). Autonomous in craft-embedding human sensibility in architectural robotic fabrication. In *RE: Anthropocene, Design in the Age of Humans-Proceedings of the 25th CAADRIA Conference (Vol. 2, pp. 243-252)*.
- Shaked, T., Bar-Sinai, K.L. and Sprecher, A.** (2021). Adaptive robotic stone carving: Method, tools, and experiments. *Automation in Construction*, 129, p. 103809.
- Sharif, S.** (2020). *A Framework and Process Library for Human-Robot Collaboration in Creative Design and Fabrication (Doktora Tezi)*.
- Smid, P.** (2008). *Cnc Programming Library*. Industrial Press, Inc..
- Şen-Bayram, A. K.** (2021). Digital Fabrication Shift in Architecture. Chap. 7 in *Architectural Sciences and Technology*, 173-193.
- Tanyeli, U.** (2008). Becoming Istanbul. *Becoming Istanbul: An Encyclopedia*, 43-45.
- Tedeschi, A., Andreani, S.** (2014). *AAD Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher.
- Terzidis, K.** (2014). *Permutation design: Buildings, texts, and contexts*. Routledge.
- Weightman, G.** (2010). *The Industrial Revolutionaries: The Making of the Modern World, 1776–1914*. Open Road+ Grove/Atlantic.
- Weisberg, D. E.** (2008). *The Engineering Design Revolution The People, Companies and Computer Systems That Changed Forever the Practice of Engineering*. <<https://www.shapr3d.com/blog/history-of-cad>>, erişim tarihi 19.07.2023.
- 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.
- URL-1:** <<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/projekte/e/0/0/0/366.html>>, erişim tarihi 19.05.2023.
- URL-2:** <<https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/366.html>>, erişim tarihi 19.05.2023.
- URL-3:** <<https://block.arch.ethz.ch/brg/project/knitnervi>>, erişim tarihi 19.05.2023.
- URL-4:** <<https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livMatS-Pavilion/>>, erişim tarihi 20.05.2023.
- URL-5:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Manchester%2C_New_Hampshire_-_Textiles._Pacific_Mills._Barber-Colman_High_Speed_Warper._This_machine_is_using_345..._-_NARA_-_518752.jpg>, erişim tarihi 19.05.2023.
- URL-6:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/RMS_Olympic%27s_propellers.jpg>, erişim tarihi 19.05.2023.
- URL-7:** <<https://imagination.oncell.com/en/pages/jacquard-loom-punch-card-8844.html>>, erişim tarihi 20.05.2023.
- URL-8:** <https://en.wikipedia.org/wiki/Jacquard_machine#/media/File:Deutsches_Technikmuseum_Berlin_February_2008_0013.JPG>, erişim tarihi 20.05.2023.
- URL-9:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Maquina_vapor_Watt_ETSIIM.jpg>, erişim tarihi 20.05.2023.
- URL-10:** <https://www.cfdengineering.co.uk/wp-content/uploads/2018/01/29_boringmachine.jpg>, erişim tarihi 20.05.2023.
- URL-11:** <<https://libraries.mit.edu/mithistory/research/labs/mit-servomechanisms-laboratory/>>, erişim tarihi 28.04.2023.
- URL-12:** <<https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-2-the-evolution-from-nc-to-cnc-4b9fe1653536>>, erişim tarihi 21.04.2023.
- URL-13:** <<https://tr.wikipedia.org/wiki/Sketchpad#/media/Dosya:SketchpadDissertation-Fig1-2.tif>>, erişim tarihi 23.05.2023.
- URL-14:** <<https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad#/media/File:Sketchpad-Apple.jpg>>, erişim tarihi 23.05.2023.
- URL-15:** <<http://www.makepartsfast.com/wp-content/uploads/2016/05/SLAISY1.jpg>>, erişim tarihi 19.07.2023.
- URL-16:** <http://www.makepartsfast.com/wp-content/uploads/2016/05/IMG_8843.v2.jpg>, erişim tarihi 19.07.2023.

- URL-17:** <https://www.archdaily.com/441358/ad-classics-walt-disney-concert-hall-frank-gehry/5264acf3e8e44ef4c200021b-ad-classics-walt-disney-concert-hall-frank-gehry-photo?next_project=no>, erişim tarihi 11.04.2023.
- URL-18:** <<https://ethambassadors.ethz.ch/2020/01/14/the-nest-building-a-construction-technology-showcase/>>, erişim tarihi 19.07.2023.
- URL - 19:** <https://tr.wikipedia.org/wiki/Partenon#/media/Dosya:The_Parthenon_in_Athens.jpg>, erişim tarihi 11.04.2023.
- URL - 20:** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/18th_century_mansion_built_of_Bath_stone%2C_with_Italianate_alterations_2.JPG>, erişim tarihi 11.04.2023.
- URL-21:** <https://www.archdaily.com/966220/stone-house-malik-architecture/610a982fc954fd01655c76bc-stone-house-malik-architecture-photo?next_project=no>, erişim tarihi 11.04.2023.
- URL - 22:** <https://i.guim.co.uk/img/media/1132ae31034cb0e13d22c2d96f259fb2ce378e8f/17_133_1858_1115/master/1858.jpg?width=1020&quality=45&dpr=2&s=none>, erişim tarihi 11.04.2023.
- URL - 23:** <<https://i.pinimg.com/564x/8a/17/08/8a1708bbc81f9ec4da5f10bd98c766cd.jpg>>, erişim tarihi 08.08.2023.
- URL-24:** <<http://alyoshastone.com/new-page>>, erişim tarihi 08.08.2023.
- URL-25:** <<https://www.janvanderlaan.eu/en/portfolio/genesis/>>, erişim tarihi 08.08.2023.
- URL-26:** <<https://kb.sprutcam.com/SCrobotmanual12/en/creating-machining-technology/list-of-types-of-machining-operations>>, erişim tarihi 08.08.2023.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Berfin Aybike KÖRÜKCÜ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
- **Yüksek Lisans:** 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Anabilim Dalı, Mimari Tasarımda Bilişim Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- **2021-Günümüz** Freelance - Mimari Tasarımcı
- **2020-2021** TRİDİ Teknoloji - Üretim Planlama Uzmanı
- **2017-2018** HIVE Tasarım ve Teknoloji Ofisi - Stajyer Mimar

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Körükçü, B. A.**, 2023, A Framework Proposal For Natural Stone Processing With Robotic Arm: The Case of Simple Geometry Focused on Detail. The ASCAAD 2023 conference. (Süreç devam ediyor)

DİĞER YAYINLAR:

- Çiçek, S., Koç, M., **Körükçü, B.**, 2022, Urban Map Generation in Artist's Style Using Generative Adversarial Networks (GAN). Architecture and Planning Journal (APJ), 28(3). <https://doi.org/10.54729/2789-8547.1204>
- **Körükçü, B. A.**, Şen Bayram, A. K., 2021, Geleneksel Tasarımda Yeni Dirençlilik: El Eskizinin Sayısal Form Bulma Aracına Dönüşümü, Mimarlıkta Sayısal Tasarım XV. Ulusal Sempozyumu, 25-35.