

DeneySEL Mimarlık Üretiminde İnsansız Hava Araçlarının Rollerini

Roles of Unmanned Aerial Vehicles in Experimental Architecture Production

Hakan İMERT

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, İstanbul

Doi:10.51764/smutgd.1225719

Geliş Tarihi : 28.12.2022

Kabul Tarihi : 26.03.2023

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesine paralel olarak deneySEL mimarlık üzerine yapılan çalışmalar mimarlıkta üretim şekillerinin çeşitlendirilmesinde önemli roller oynamaktadır. Üretim ve hizmet süreçlerinde robot kullanımı için artan talepler, deneySEL mimarlık üzerine çalışan uzmanların dikkatini çekmektedir. Bu sayede insansız hava araçları da üretim süreçlerinde önemli bir özne haline gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, insansız hava araçlarının rollerini mimarlık üretimine getirdiği yenilikçi çözümler üzerinden keşfetmeye dayanmaktadır. Araştırma oluşturulan kavramsal çerçeve paralelinde deneySEL mimarlıkta insansız hava araçları ile üretime dair durum çalışmalarına odaklanmaktadır. Bu çalışmalara ait nesnel veriler SWOT analizi yöntemi ile sundukları güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler üzerinden değerlendirilmektedir. Yapılan incelemeler neticesinde, durum çalışmaları içerisinde benzer teknoloji ile üretilmelerine rağmen farklı güçlü ve zayıf yönlerin ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak, ortaya çıkan fırsatlar ve tehditlerin durum çalışmaları arasında benzerlikleri de söz konusudur. Seçili örnekler ile sınırlandırılan çalışma sonucunda, insansız hava araçları ile hibrit üretimin dünyada mevcut mimarlık anlayışlarını değiştirecek bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, DeneySEL Mimarlık, Robotlar

ABSTRACT

Current studies on experimental architecture play an important role in the diversification of production forms in architecture with the rapid growth of technology. Increasing demands for the use of robots in production and service processes attract the attention of experts working in experimental architecture. This study explores unmanned aerial vehicles' roles through their innovative solutions to architectural production. This research focuses on case studies for the production of unmanned aerial vehicles in experimental architecture within the conceptual framework. The objective data of these studies are evaluated with the SWOT analysis method through their strengths, weaknesses, opportunities, and threats. As a result of the examinations, it is seen that different strengths and weaknesses have emerged in the case studies, although they are produced with similar technology. However, there are also similarities between case studies of emerging opportunities and threats. Thus, it is understood that hybrid production with unmanned aerial vehicles, which is limited to selected examples, has an effect that will change the current understanding of architecture in the world.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Experimental Architecture, Robots

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte insan emeği yerine robotların kullanımı üretim ve hizmet süreçlerinde yavaş yavaş daha etkin hale gelmektedir. Şüphesiz, bu otomasyon süreçleri içerisinde insansız kara araçları (İKA) ve insansız hava araçları (İHA) önemli rollere sahip olmaktadır. İKA'lar günümüzde çoğunlukla parça besleme ve malzeme taşıma gibi görevlerde kullanılmaktadır (Khosiawan ve Nielsen, 2016). İHA'ların uygulamaları ise, nesnelerin interneti (IoT), 5G ve B5G'deki gelişmiş kullanımları nedeniyle olağanüstü bir şekilde genişlemektedir (Mohsan, Khan, Noor, Ullah ve Alsharif, 2022). Son on yılda gözetleme, lojistik, arama kurtarma (Khosiawan ve Nielsen, 2016), arkeolojik kazı alanı çalışmaları, üç boyutlu şehir modellerinin oluşturulması (Can ve Kahveci, 2017), kamu güvenliği, askeri operasyonlar, iç-dış mekân navigasyonu, atmosferik algılama, afet sonrası operasyonlar, yük taşımacılığı, orman yangını izleme gibi birçok alanda İHA kullanılmaktadır (Hassija, Saxena ve Chamola, 2020; Mohsan ve diğerleri, 2022). İHA Market Raporu'na göre, küresel pazar büyüklüğünün 2026 yılına kadar %9,4 bileşik yıllık büyüme hızı ile 41,3 milyar ABD dolarına ulaşacağı tahmin edilmektedir. 2021 senesinde 828 bin olan birim satışlarının ise, %10,6 bileşik büyüme hızıyla 2026 yılına kadar 1,4 milyona yükselmesi beklenmektedir (Schroth ve Bödecker, 2021). Tüm bu veriler, İHA'ların yeni ve çağdaş bir teknoloji olması nedeniyle ortaya çıkan taleplerin arttığını gözler önüne sermektedir. İnşaat sektörünün yeni teknolojileri yavaş benimsiyor olmasına rağmen İHA'lar mekân üretimini birçok yönden kolaylaştırma potansiyeline sahiptir (Li ve Liu, 2019).

Günümüzde dünyanın teknolojik olarak en gelişmiş imkanlarına sahip üniversiteler İHA ve robotik kollar ile yenilikçi ve deneysel üretimler üzerine çalışmaktadır. Bu üretimler mimari maket ölçeğinden iç ve dış mekânda gerçekleştirilen üretimlere kadar farklı boyutlarda örnekleri içermektedir (Pereira da Silva ve Eloy, 2021). Ancak, deneysel mimarlığın bir ürünü olarak ortaya çıkan bu yaklaşımlar ile gerçekleştirilen tüm projeler etki ve kapasitelerinin doğru anlaşılabilmesi noktasında bir analize ihtiyaç duymaktadırlar. Konu hakkında yapılmış spesifik çalışmalara nazaran bütüncül perspektifte İHA'ların görsel ve duysal inceleme görevleri dışında mimarlığın üretimi boyutunda oluşturulmuş sınırlı sayıda araştırmanın varlığı, güncel bir çalışmanın oluşturulmasında motivasyon ve önemlilik esaslarını belirlemektedir. Ayrıca çalışmanın ileride ortaya konulacak araştırmalara ışık tutabilecek güçlü bir veri arşivine katkı sağlanacağı da düşünülmektedir. Bu doğrultuda, araştırmanın kapsamını belirleyen aşağıdaki araştırma sorularına odaklanılmaktadır:

- İHA'ların deneysel mimarlık ölçütünde mekân üretimindeki güncel rolleri nelerdir?
- İHA'lar deneysel mimarlık üretimlerine nasıl katkılar sağlamaktadır?
- İHA'lar niçin deneysel mimarlığın üretimi içerisinde niçin tercih edilmelidir?

2. KURAM VE UYGULAMA ARASINDA BİR ARAKESİT: DENEYSEL MİMARLIK

İlerlemeyi ve insan refahını amaçlayan teknolojik bir programa sahip olunmaya başlandığı sanayi devriminden bu yana profesyonel dünya uzun bir yol kat etmiştir. Mükemmellik merkezlerinde üretilen bilginin nesnel olarak kurulmuş bir hipotezi doğrulaması ve empirik duysal deneyimin indirgenemez unsurlarına dayanması gereklilikleri doğmuştur. Bu sayede, deneysel üretim rekabet halindeki açıklayıcı teoriler için bir seçenek durumuna gelmiştir. Özellikle bu fikirlerin doruğa ulaştığı 2. Dünya Savaşı sonrası dönemdeki yeniden yapılanma sürecinde toplumlar tarafından profesyonellerin gerçek günlük sorunlara fiilen çözüm sağlama kapasiteleri sorgulanmaya başlamıştır (Florio ve Segall, 2009). Bu sorgulama süreçlerinden insanı referans alan mimarlık üretimleri de mutlaka etkilenmiştir. Geleneksel mimarlık üretim metotlarına karşı çıkan eleştirel tutumların yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra Archigram ve Superstudio gibi radikal mimari gruplar tarafından daha yüksek perdeden dillendirildiği gözlemlenmektedir (Erol, 2020).

Deneysel mimarlık kavramına ilk olarak 1970 yılında Archigram mimarlık oluşumunun kurucularından Peter Cook tarafından yazılan "Experimental Architecture" kitabında yer verilmiştir. Cook'un empirik yaklaşımı, mimarlığın yaşamın belirsizliği ile daha çok ilişkili olduğuna işaret etmektedir (Sadler, 2005). Söz konusu eleştirel yaklaşımların ortaya çıkmasında, mimarlık eyleminden insanların anlayış ve beklentilerinde ciddi farklılıklar ve sorunların olması büyük rol oynamaktadır (Hillier, 2007). Mimarlık pratiği çoklu ve disiplinler arası süreçlerin oluşturduğu zıtlıklar temelinde hareket eden, teknik olduğu kadar sanatla da ilişkide olan ve uygulama yapılmaksızın var olamayacak bir olguyu tarif etmektedir (Sağocak, 1999). Bu olgu 80'li yıllardan itibaren ofislerde tasarımın bir parçası haline gelen bilgisayar tabanlı üretimle desteklenmiş (Erol, 2020), gelişen teknoloji ile dördüncü sanayi devriminin kapıları açılmış (Xu, David ve Kim, 2018) ve bu süreç robotları karşımıza birçok alanda daha görünür şekilde çıkarmıştır (Agustí-Juan, Müller, Hack, Wangler ve Habert, 2017). Robotların üretimde eylem ve tepki aşamalarında belirsiz ancak esnek çalışmaya imkân veren süreçleri ortaya koyması (Braumann ve Brell-Cokcan, 2012), günümüzde birçok deneysel mimarlık üretimi içerisinde robotların

3. MEKÂN ÜRETİM SÜREÇLERİNDE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

İHA'lar mekân üretim süreçlerinde birçok yeniliği beraberinde getirmiştir. Son birkaç yıl içerisinde İHA'lar raporlamadaki doğruluk oranını yükseltmek, güvenlik koşullarını iyileştirmek, maliyetleri düşürmek ve verimliliği arttırmak gibi şantiye alanlarında ihtiyaç duyulan konularda iyileştirmelerin sağlanmasına yardımcı olmaktadır (Yıldız, Kıvrak ve Arslan, 2021). İHA'ların belirli bir uygulama için kullanılmasında dikkate alınması gereken üç unsur vardır. Bunlar; görev, çevre ve İHA operasyon sistemidir. Görev, İHA'lar tarafından gerçekleştirilecek bir faaliyettir. Farklı görev türleri arasında malzeme taşıma, kalite denetimi ve alan gözetim görevi bulunmaktadır. Çevre, İHA sisteminin kullanılacağı ortam ve altyapıdır. İHA operasyon sistemi ise, farklı tipte İHA'lar (robotik tutucu, görüntüleme cihazı ve sensör ile donatılmış), şarj merkezleri ve diğer kaynakları operasyonları gerçekleştirmek için kullanılmaktadır (Khosiawan ve Nielsen, 2016).

Uygulama alanlarında bir görüntüleme cihazı ve sensör ile donatılan İHA hem görsel hem de duyuşal inceleme olmak üzere zorlu ortamlarda görevlerini icra etmek için kullanılabilir. Bir robotik tutucu ile donatılan İHA ise, üretim ortamında malzeme taşıma görevlerini gerçekleştirmek için de kullanılabilir. Bu uygulama imkanları dahilinde İHA'lar üç boyutlu bir uzay boşluğunda 360 derece inceleme açısı ile çalışabilirlik gibi çeşitli avantajlar ile desteklenmektedir (Khosiawan ve Nielsen, 2016). Tüm bu kapsam içerisinde değerlendirilen İHA'lar için üç genel boyuttan bahsetmek mümkündür. Bunlar; minyatür, orta boy (15x15 cm) ve büyük boy (30 ila 40 cm) İHA'lar olarak kategorize edilebilmektedir. Büyük olanlar ön koşul olmadan açık havada uçabilmekte ve daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Pereira da Silva ve Eloy, 2021). Minyatür İHA'lar ise, daha çok maket gibi ölçeklendirilmiş mimarlık üretimlerinde karşımıza çıkmaktadır. Bu doğrultuda, proje safhasında oluşturulan sayısal tasarım verilerini uçan makinelerin davranışına çeviren matematiksel algoritmalarla uyumlu çalışan işbirlikçi robotlar ve/veya İHA'lar ile üretim süreçleri tamamlanmaktadır (Frederico Augugliaro ve diğerleri, 2014).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Araştırmanın materyali olarak İHA'lar deneysel mimarlık sürecinde üretimler için yenilikçi çözümler sunabilecek güncel bir teknoloji olmasından ötürü seçilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmanın örneklemini İHA'lar kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiş yedi proje örneği oluşturmaktadır. Bu projelere hibrit üretim örnekleri de dahil edilmiştir (Bkz. Tablo 1). Materyallere ait tüm görsel veriler araştırma gruplarının ve üniversitelerin internet adresleri üzerinden elde edilmiş, ayrıca araştırmanın gerekli görülen yerlerinde paylaşılmıştır.

Çalışmanın metodu çerçevesinde ilk olarak İHA'ların maketten uygulamaya kadar çok geniş bir yelpaze içerisindeki mekân üretimi boyutunda değerlendirilebilecek teorik bilginin bütünleştirici değerlendirme ölçütüyle literatür incelemesi yapılmıştır. Söz konusu incelemeler doğrultusunda çalışma, İHA ile tamamlanmış üretimler için nitel bir araştırma metodu temelinde bir durum çalışmasıdır. Bahsi edilen örneklemin değerlendirilmesinde ise SWOT analizi yöntemi kullanılmıştır. SWOT analizi, bir süreç ya da durumun güçlü ve zayıf yönlerini belirlemek, oluşması öngörülen fırsat ve tehditleri tespit etmek amacıyla kullanılan bir tekniktir (Helms ve Nixon, 2010). Bu sayede İHA'ların mevcut rolleri paralelinde yeni fırsatları gerçekleştirmek için güçlü yönlerden nasıl yararlanılabileceği, zayıflıkların ilerlemeyi nasıl yavaşlatabileceği veya tehditleri nasıl büyütebileceği iç ve dış girdiler listelenerek tespit edilebilmektedir. Tüm bu yönleriyle literatürde sıklıkla kullanılan SWOT analizi yönteminin, durum çalışmalarının analizi için en verimli yöntem olduğuna karar verilmiştir. SWOT analizine ait akış şemalarını içerir diyagramlar ise internet tabanlı, açık erişimli SankeyMATIC programı ile hazırlanmıştır. Bu doğrultuda, çok geniş uygulama alanlarında kullanılan İHA'ların deneysel mimarlığın bir parçası olarak üretim süreçlerine katkılarının, kısıtlarının ve gelecek potansiyellerinin analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

5. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İLE ÜRETİLMİŞ PROJELERE BAKIŞ

5.1. ICD/ITKE Araştırma Pavyonu Projesi 2016/17

Proje Stuttgart Üniversitesi, Hesaplama Tasarım ve İnşaat Enstitüsü (*Institute for Computational Design and Construction-ICD*) ve Bina Strüktürü ve Yapısal Tasarım Enstitüsü (*Institute of Building Structures and Structural Design-ITKE*) tarafından 2016-2017 yılları arasında cam elyaf ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin bina ölçeğinde üretimini araştırmak amacıyla araştırma pavyonu ölçeğinde tasarlanmıştır. Tasarım sürecini kullanılan fiber malzemenin karakteristik özellikleri şekillendirmiştir. Bu malzemeler hafif fakat mukavemeti yüksek olduklarından, İHA'lar gibi düşük taşıma kapasiteli ancak uzun menzilli makineleri, güçlü ancak sınırlı erişime sahip endüstriyel robotlarla işbirlikçi olarak çalışabilmesini mümkün kılmaktadır (Resim 1). Bu işbirlikçi konsept ayrıca uzun açıklıklı fiber kompozit yapılar için ölçeklenebilir bir fabrikasyon kurulumuna da imkân

vermektedir. Bütünleştirici olarak hesaplamalı tasarım, mühendislik ve üretimi araştırıp sonuçlarını araştırma pavyonu üzerinde incelenmesine yön veren bir süreci içermektedir. Proje mimarlar, mühendisler, biyologlar, araştırmacılar ve öğrencilerden oluşan geniş bir ekip tarafından disiplinler arası bir sürecin sonucu olarak oluşturulmuştur (Früh, 2022; Solly ve diğerleri, 2017).

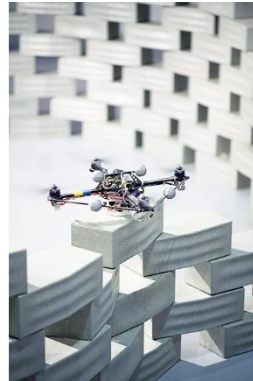
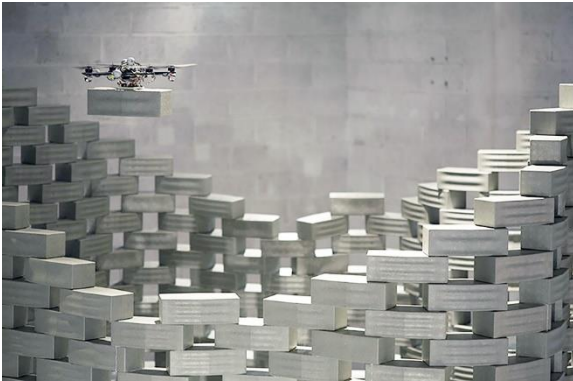


Resim 1. ICD/ITKE tarafından hibrit üretim süreciyle tamamlanan araştırma pavyonu (URL-1, 2022)

Standart endüstriyel fabrikasyon ekipmanının çalışma alanının ötesinde, uzun açıklıklı bir yapı inşa etmek birden fazla robotik sistemin kesintisiz bir fiber döşeme sürecini oluşturmada ara yüzü teşkil etmesini gerekli kılmaktadır. Spesifik olarak deney düzleminde fiber sarma işlemi için gerekli güç ve hassasiyete sabit iki adet endüstriyel robot kol uç noktalara yerleştirilirken, otonom ve hassasiyeti daha düşük olan İHA'lar aracılığıyla fiberlerin taşınması sağlanmaktadır (Solly ve diğerleri, 2017) (Resim 1.).

5.2. Uçuş Montajlı Mimarlık Projesi

İHA'lar kullanılarak yapılan ilk üretimlerden biri olarak kabul edilen proje 2012 senesinde Gramazio Kohler araştırma grubu ve robot mühendisi Raffaello D'Andrea tarafından uygulamaya sokulmuştur (Pereira da Silva ve Eloy, 2021). Bir mimarlık enstalasyonu şeklinde gerçekleştirilen proje kapsamında 1500 köpük modülden oluşan 6 metre yüksekliğinde bir kulenin tamamlanması İHA'lar vasıtasıyla sağlanmıştır. Enstalasyon, orijinal olarak dikey bir köy olarak tasarlanmış projenin 1:100 ölçekli modelidir (Frederico Augugliaro ve diğerleri, 2014) (Resim 2).



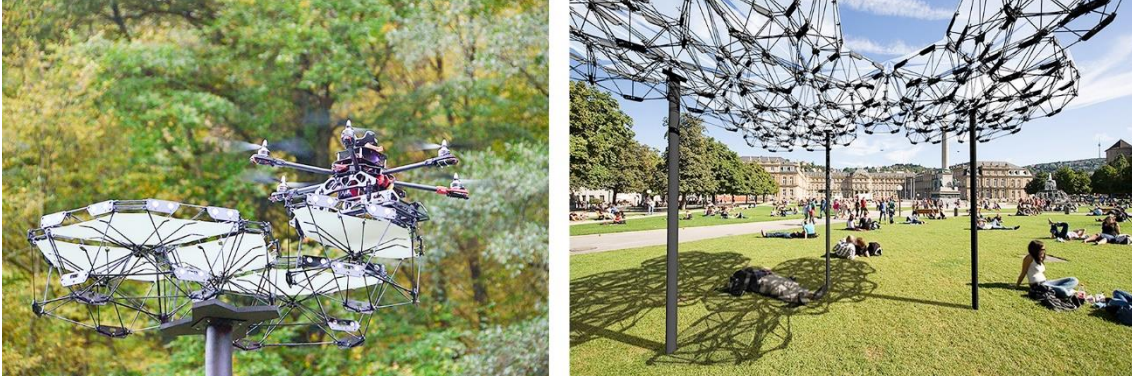
Resim 2. Gramazio Kohler tarafından gerçekleştirilen uçuş montajlı mimarlık projesi (URL-2, 2022)

Projenin tamamlanması doğrultusunda birçok yazılım ve donanım tasarlanması görevleri üstlenilmiştir. Buna göre, özel bir cımbız şeklinde aparat taşıyan 4 adet İHA, her uçuş yönünde tuğlayı tutmak için üzerinden delik açan pimlere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Komutları okuyan, İHA'ları kontrol eden, çarpışma olmayan bölgeleri ve yörüngeleri planlayan, yapıyı inşa eden ana bir kontrol yazılımı ile üretimin optimizasyonu artırılmıştır (D'Andrea ve diğerleri, 2011; Pereira da Silva ve Eloy, 2021).

5.3. Siber Fiziksel Makro Materyal Projesi

Siber Fiziksel Makro Malzemeler projesi, 2017 yılında Stuttgart Üniversitesi Hesaplamalı Tasarım ve İnşaat Enstitüsü'nde (ICD) kamusal alanlar için deneysel mimarinin somut bir vizyonunu göstermek için tez projesi kapsamında geliştirilmiştir. Modüler ve yeniden yapılandırılabilir gölgelik, dağıtılmış robotik yapı ve programlanabilir maddenin bir kombinasyonu ile sağlanmaktadır. İHA'lar kullanılarak yapılandırılan gölgelik, iklime veya güneş açısına gerçek zamanlı olarak yanıt verebilen modüler bileşenlerle oluşturulmuştur. Yapı, iletişim ve algılama için entegre elektroniklere sahip hafif karbon fiber filamandan yapılmış siber-fiziksel yapı malzemesinden oluşmaktadır. Çevik, çok yönlü bir gölgeliğin, güneşin konumuna göre büyük bir kamusal

alanda otonom olarak hareket ettiği, oturanlara gölge sağladığı ve zaman zaman tamamen yakındaki çatılara çekilirken oturanlara hizmet etmek için aktif olarak kendini yeniden inşa ettiği bir sistemi içermektedir (Wood ve diğerleri, 2019) (Resim 3).



Resim 3. İCD çatısı altında gerçekleştirilen siber fiziksel makro materyal projesi (URL-3, 2022)

5.4. İHA ile 3D Baskı Projesi

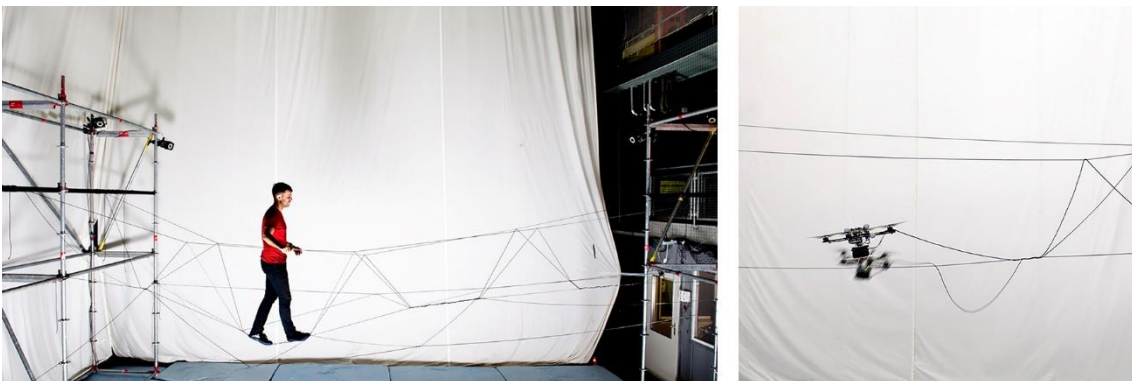
2022 yılında projelerini Nature dergisinde yayınlayan Londra Emperyal Koleji ve EMPA araştırmacıları, yapıları sürüler halinde yazdırabilmek için İHA'lara üç boyutlu yazıcılar entegre etmişlerdir. İHA'lar polimerik kompozit karışımli çimento malzemeyi yüksek yapılar inşa etmeye yetecek hassasiyette biriktirebilmek için özel olarak tasarlanmıştır. Prototip niteliğinde hazırlanan projede kubbe benzeri geometri ve çoklu robot simülasyonlarına cevap veren, 72 kat hızlı sertleşen yalıtım köpüğü malzemesinden oluşan, 2,05 metre yüksekliğinde bir silindir ve 28 kat yapısal psödoplastik çimentolu malzemeden yapılmış konsept kanıtı baskılar üretilmiştir (Zhang ve diğerleri, 2022) (Resim 4).



Resim 4. Londra Emperyal Koleji ve EMPA araştırmacıları tarafından İHA ile 3D baskı projesi (URL-4, 2022)

5.5. Uçuşla İnşa Edilmiş Halat Köprü Projesi

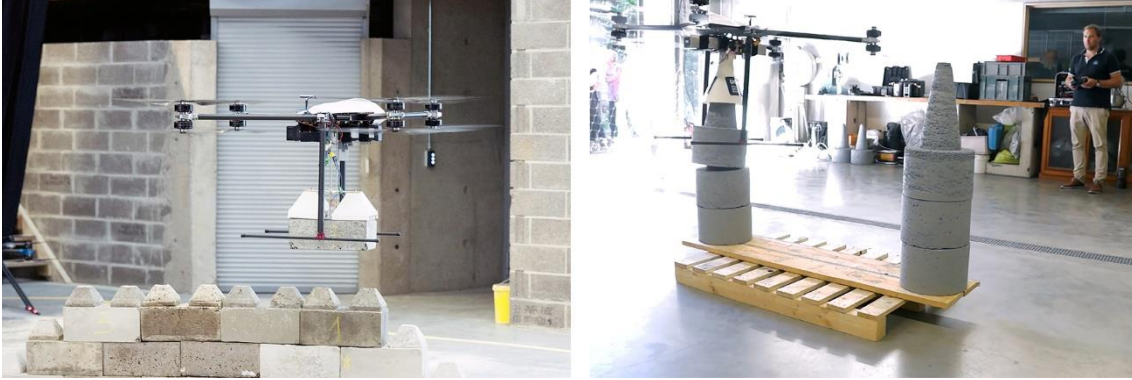
Proje 2012 senesinde, ETH Zürih desteğiyle FMA (Flying Machine Arena) ekibi tarafından tamamlanmıştır. Bir kişinin geçebileceği şekilde tasarlanmış halat köprü projesi İHA'lar tarafından üretilmiştir. Köprü, yapının her iki ucundaki gerekli ankraj noktaları dışında tamamen germe elemanlarından oluşmakta olup, bağlantıları tamamen uçan makinelerle gerçekleştirilmiştir. İki iskele yapısı arasında 7,4 m uzanan köprü, yaklaşık 120 m toplam halat uzunluğu için dokuz halat parçasından oluşmuş, düğüm ve örgü gibi farklı unsurlardan meydana getirilmiştir (Federico Augugliaro, Mirjan, Gramazio, Kohler ve D'Andrea, 2013) (Resim 5).



Resim 5. FMA ekibi tarafından tamamlanan halat köprü projesi (URL-5, 2022)

5.6. İHA ile Yığma Yapı Oluşturma Projesi

Louvain Katolik Üniversitesi ile MIT üniversitelerinden Pierre Latteur önderliğindeki çalışma grubu araştırmalarına 2014 senesinde başlamış, 2018 senesinde sonuçlarını bir makale ile yayınlamışlardır. Bu projenin amacı, gerçek ölçekli yığma yapıların büyük özel yapım İHA'lar ile inşa edilmesi için konsept kanıtı üretimler gerçekleştirmektir. Yapılan denemeler doğrultusunda 12 kg ağırlığındaki İHA'ların 20 kg ağırlığındaki beton blokları yığma duvar inşası için herhangi bir yönde kontrolsüz sıçrama olmaksızın örebildiğini ortaya koymuştur (Goessens, Mueller ve Latteur, 2018) (Resim 6).



Resim 6. Latteur ve ekibinin İHA ile yığma yapı oluşturma projesi (URL-6, 2022)

5.7. Afet-Mülteci Sığınağı İçin Yapı Kabuğu Katmanı Oluşturma Projesi

2018 Londra Tasarım Festivali'nde Stephanie Chaltiel ve ekibi, bir İHA tarafından kil ve elyaf karışımı püskürtülen ahşap bir kafese tutturulmuş saman torbalarından jeodezik kubbeli bir afet ve mülteci sığınağını inşa etmiştir. Bu projenin amacı, mülteci kamplarında veya afet bölgelerinde ucuz, hafif ve kolayca bulunabilen malzemelerden hızlı bir şekilde 4 gün içinde imal edilebilen sığınaklar üretmektir. Samanla dolu küçük çuvallar jeodezik kubbe üzerine monte edildikten sonra üzerlerine İHA tarafından kaplama katmanı püskürtülmüştür. Bu katman altındaki yapı elemanlarını birbirine bağlarken, aynı zamanda hava koşullarına dayanıklı bir kabuk oluşturmaya yardımcı olmuştur (Chaltiel, Bravo, Veenendaal ve Sayers, 2020) (Resim 7).



Resim 7. Chaltiel ve ekibinin Afet-Mülteci sığınağı projesi (URL-7, 2022)

6. BULGULAR

Bu bölümde İHA'ların deneysel mimarlık ekseninde üretime katkıları, beşinci bölümde yer alan çalışmaların ortaya koyduğu nesnel veriler ışığında SWOT analizinin bir çıktısı olarak güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler başlıkları altında incelenmiştir. Bulguların analizine yardımcı olması amacıyla Tablo 1. durum çalışmalarını tanımlar kısa rumuzlar verilerek hazırlanmıştır (Bkz. Tablo 1). Böylelikle proje çıktılarına ait tablodaki bulgular belirginleştirilerek tartışma zemini oluşturulması amaçlanmaktadır.

Tablo 1. Durum çalışmalarına ait SWOT analizi tablosu

Proje Tanımı	Üretim Şekli	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler	Fırsatlar	Tehditler
P1 Araştırma Pavyonu	Hibrit (İHA + Robot Kol)	Bütünleşik üretim, Daha küçük hata payı, Üretimde yüksek hassasiyet	Sınırlı ağırlık taşıma kapasitesi, Yavaş işlem hızı	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı, İşbirlikçi imalat süreci	Dış unsurlara karşı hassas, Yazılım-donanım tutarsızlığı, Donanım arızaları
P2 Karmaşık Geometriye Sahip 6 metre Kule	İHA	Otonom üretim, Daha küçük hata payı, Hareket yakalama sistemi	Sınırlı ağırlık taşıma kapasitesi, Gerçek ölçekli montajda yetersizlik	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı, Uçuşla montaj için net ara yüzler oluşturma	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları
P3 Dinamik Gölgeleme Sistemi	İHA	Otonom yeniden düzenleme, Daha küçük hata payı, Etkileşimli davranış	Sınırlı ağırlık taşıma kapasitesi, Durağan çalışma yeteneği	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı, İşbirlikçi imalat süreci	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları
P4 İHA ile 3D Baskı (Konsept Kanıtı Geometriler)	İHA	Otonom baskı, Eklemeli imalat, Çoklu üretim imkânı	Sınırlı ağırlık taşıma kapasitesi	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları
P5 Halat Köprü	İHA	Otonom üretim, Daha küçük hata payı	Sınırlı ağırlık taşıma kapasitesi	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları
P6 Yığma Yapı Duvarları Oluşturma	İHA	Yüksek ağırlık taşıma kapasitesi	Kaldırma sistemindeki eksiklikler, Sapma açısı	Mekânsal kısıtlamanın olmayışı	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları
P7 Afet-Mülteci Sığınağı	Hibrit (İHA + İnsan Gücü)	Püskürtme yapabileme	İnsan kontrolüne ihtiyaç, Kısıtlı çalışma alanı	İşbirlikçi imalat süreci	Dış unsurlara karşı hassas, Donanım arızaları

Tablo 1.'de yer verilen bulgular ışığında, araştırmaya konu olan proje örnekleri üzerinde yapılan gözlem ve incelemeler neticesinde ortaya konulan çıkarımlar aşağıda sıralanmış ve akış şeması Sankey diyagramında verilmiştir (Bkz. Şema 1):

P1: Araştırma pavyonu projesinde, kısa menzilli yüksek hassasiyetli robotlar ile uzun menzilli düşük hassasiyetli İHA'lar olmak üzere birden fazla fabrikasyon aracı arasında işbirlikçi bir imalat sürecinin mümkün olduğu kanıtlanmaktadır. Buna ek olarak, proje içerisinde uzun açıklıklı kompozit üretim için gelecekteki araştırmalarda referans alınabilecek gerilim kontrol mekanizmaları ve hacimsel sarma stratejileri gibi sistem bileşenleri geliştirildiği görülmektedir. Ancak sürecin en büyük eksikliğinin, yavaş işlem hızı ile yazılım ve donanım tutarsızlıkları olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, geride kalan bazı elyaf parçalarının otomatik olmayan yöntemlerle yapıya uygulanması mecburiyetleri doğmuştur. Bu nedenle, endüstriyel üretim senaryosu için üretimin bazı noktalarda geliştirilmesi ihtiyaçları ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

P2: Uçuş montajlı mimarlık projesi, hava araçlarının yapı inşa etme yeteneğini gösteren bir kavram kanıtı olarak değerlendirilmektedir. Proje içerisinde kurulum, araç konumu ve tutumunu gözlemlenmek için bir hareket yakalama sistemi kullanılmasına rağmen uygulama sırasında kullanılan makinelerin taşıma kapasitelerinin sınırlı olduğu saptanmaktadır. Bu doğrultuda gerçek boyutlu üretim için çözüm oluşturmayan ancak maket ölçeğinde uygulamaya cevap veren bir projenin var olduğu anlaşılmaktadır.

P3: Dinamik gölgeleme sistemi projesinde, İHA'lar ile yeniden yapılandırılabilir bir uygulamanın gerçekleştirildiği saptanmaktadır. Uygulama için tekil bir robotik montaj veya yapım yönteminden ziyade davranışsal tasarım modelleriyle yönlendirilen otonom yeniden düzenleme ve durağan çalışma yeteneğine sahip çıktılar elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu işlevsel çerçeve içerisinde İHA'ların, karbon fiber ünitelerden oluşan ve kendi kendini modüler formlar üzerinden şekillendirebilen bir gölgeleme sistemi oluşturulmasında kilit rol oynadığı gözlemlenmektedir.

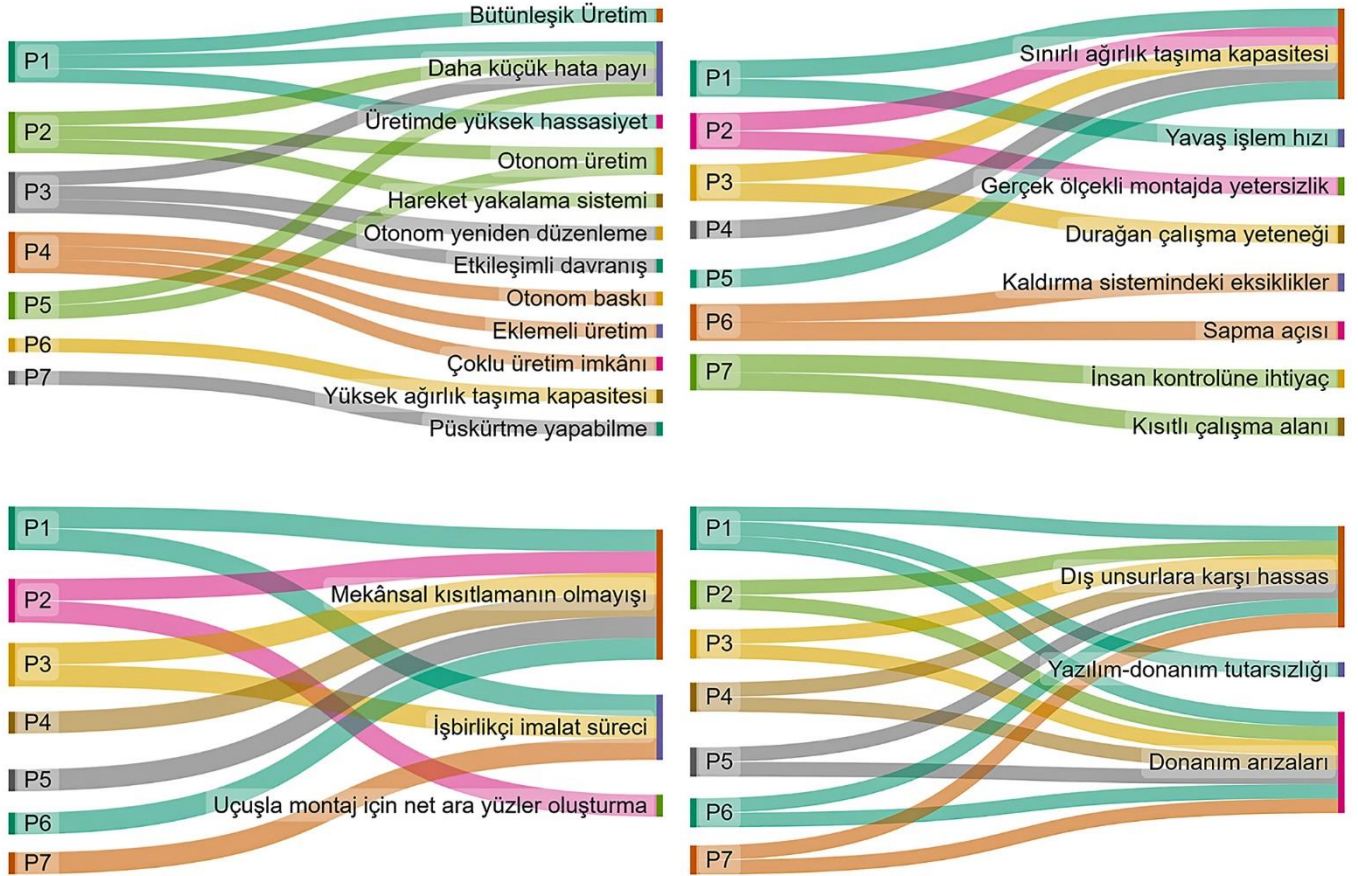
P4: İHA ile 3D baskı projesinde, malzemeyi üç boyutlu olarak yazdırabilen ve kalitesini gerçek zamanlı ölçebilen İHA sistemlerinin oluşturulduğu anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda, gerçek zamanlı model tahminine dayalı kontrol şemasını da içeren bir konsept kanıtı baskı sürecinin gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

P5: Halat köprü projesi, havada düğüm atabilen İHA'ların otonom olarak yük taşıyan çekme yapıları inşa etme yeteneği gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma düğümünün nihai kalitesini iyileştirmek için bir öğrenme şemasının kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu durumun karmaşık germe yapıların İHA'larla montajı için önemli bir aşama olduğu tespit edilmiştir.

P6: Yığma yapıların oluşturulması için duvar montajı yapan İHA'ların 20 kg ağırlığındaki blokları "tak ve yerleştir" işlemine göre gerçekleştirebilmesi için çeşitli sistemler geliştirildiği anlaşılmaktadır. İHA'ların bloklara gömülü

çelik plakalara entegre edilmiş elektromıknatıslarla donatılarak taşıma işlemlerinin gerçekleştirildiği saptanmıştır. Ancak bu durum her ne kadar düşük bir güç tüketimi ve yüksek bir verim içeriyor olsa da üretimde optimizasyon süreci için sorunlar barındırmaktadır: Örneğin; sonraki evrelerde çelik levhaların malzemeye eklenmemesi gerekliliği ve kaldırma sisteminin muhtemelen buna göre uyarlanması gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, İHA'ların görüntü analizi yaparak yükü doğru yere bırakmasını sağlayan yönlendirme sistemlerine ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır.

P7: Afet-mülteci sığınağı projesinde yerel malzeme kullanımı ile İHA'ların ilişkilendirildiği saptanmıştır. Oluşturulmuş jeodezik kubbe üzerine yerleştirilen tekstil tabanlı yapı kabuğuna İHA'ların uçuş yeteneği ile püskürtme yapılarak işbirlikçi bir uygulama sürecinin oluşturulduğu anlaşılmaktadır. Kil, kum, pirinç kabuğu gibi karışımlardan oluşmuş biyoharçların püskürtme yoluyla jüt torbaların üzerine aktarılmasının uygulama ölçeği göz önüne alındığında başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Ancak, püskürtme aletinin entegrasyonu çerçevesinde uçuş hızı ve püskürtmede homojen bir kaplama oluştururken dış etkenlere bağlı olarak çeşitli zorluklar oluşabileceği düşünülmektedir.



Şema 1. SWOT analizine ait akış şemasını içerir Sankey diyagramı (Soldan sağa: güçlü-zayıf yönler, fırsatlar, tehditler)

7. TARTIŞMA

Bu çalışma, deneysel mimarlık özelinde son on yıl içerisinde İHA'lar ile uygulaması tamamlanmış projelere odaklanmaktadır. Bu projeler içerisinde beş tanesi İHA'lar (P2, P3, P4, P5, P6), diğer iki tanesi ise hibrit üretim (P1, P7) ile tamamlanmıştır (Bkz. Tablo 1). Üretim süreçlerinde dikkat çeken ilk husus malzeme kullanımındaki farklılıklardır. Köpük tuğlalar, özel yapım karbon fiber modüller, halatlar, polimerik kompozit karışimli çimento ve beton bloklar gibi farklı malzemeler kullanılarak üretim süreçlerinin gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır (Federico Augugliaro ve diğerleri, 2013; D'Andrea ve diğerleri, 2011; Goessens ve diğerleri, 2018; Wood ve diğerleri, 2019; Zhang ve diğerleri, 2022). Tüm deneysel mimarlık çalışmaları için her ne kadar farklı malzemeler kullanılmış olsa da seçilen yapı üretim teknolojisinin neden olduğu benzer güçlü ve zayıf yönler ortaya çıkmaktadır (Bkz. Tablo 1). Bununla birlikte, malzemenin uygulanma süreçlerinde püskürtme yapılarak doğal bir biyoharç malzemesinin kullanımı (Chaltiel ve diğerleri, 2020), robotik tutucu ekleyerek blokların yakalanıp taşınması (D'Andrea ve diğerleri, 2011; Goessens ve diğerleri, 2018) ya da yazdırma başlığı ile basılabilmesi (Zhang ve diğerleri, 2022) tek bir amaç için üretilmiş uç efektörlerinin (Gramazio ve Kohler, 2008; Weissenböck, 2015) uygulamanın ihtiyacını belirler şekilde farklılık gösterebileceğini ve uygulama imkanlarını arttırabileceğini ortaya koymaktadır.

İHA'ların kullanımı, mekânsal bir kısıtlama olmadığından ötürü daha geniş bir alanda uygulama özgürlüğü sunmaktadır. İHA'lar hızlıdır ve klasik mimarlık üretimleri ile kıyaslandığında ek donanım ve yazılımlar kullanılarak daha düşük hata payına sahip oldukları görülmektedir. Ancak, üretim süreçlerinde kullanılan yazılım ve donanımlardaki tutarsızlıklar ile arızalar optimizasyon süreçlerini etkileyen önemli dezavantajlardır. Bunlarla birlikte, İHA'ların taşıma kapasiteleri düşüktür (Pereira da Silva ve Eloy, 2021). Fakat, P6 örneğinde görüldüğü gibi taşıma kapasitelerinin arttırılabilme imkânları bulunmaktadır. Ayrıca, proje üzerinde yapılan gözlemler ışığında İHA'ların dış unsurlara karşı hassas oldukları anlaşılmaktadır. Bu noktada daha güçlü ve hassasiyeti yüksek İHA'ların geliştirilmesi önemli hale gelmektedir. Böylelikle, İHA'ların sahip olduğu olumlu özellikler nedeniyle inşaat uygulamalarının tamamlanması noktasında dış mekânlarda zorlu görevlerin yerine getirilmesinde çok faydalı olacağı düşünülmektedir. Hibrit üretim süreçlerini analiz etmek için ise iki farklı uygulama örneği seçilmiştir. İki uygulama arasındaki temel fark, insan gücü ile robot kolların İHA'lar ile etkileşime sokulduklarında ortaya çıkan sonuçlarla ilintilidir. P7 örneğinde insan gücü ile tamamlanmış yapı kabuğu üzerinde yine insan kontrolünde kumandayla bir İHA'nın püskürtme yaptığı görülürken (Chaltiel ve diğerleri, 2020), P1 örneğinde zemine entegre edilmiş ve iki uca yerleştirilmiş robot kolların uygulama alanı içerisindeki kısıtlılıkları İHA'ların havadan desteği ile giderilmiştir (Solly ve diğerleri, 2017).

Disiplinler arası bir iş akışı çerçevesinde geometrik, yapısal, hesaplamalı ve malzeme odaklı deneysel yaklaşımlar, günümüz mimarlık uygulamaları için var olan ekonomik ve tasarımsal engellerin çözümüne yönelik yeni tipolojiler geliştirmenin küçük bir adımını temsil etmektedir. Böylelikle, mimarlar ve iç mimarlar için ilerleyen dönemde uygulamanın kısıtlarını aşabilecek daha özgürlükçü uygulamalar yapabilmeyen önündeki engellerin kalkacağı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, işçilerin şantiye süreçlerinde grev, iş yavaşlatma ya da iş bırakma gibi eylemlerinin ortaya çıkardıkları sonuçlara maruz kalmadan uygulama takvimine uygun üretimler de gerçekleştirilebilecektir. Hatta P1 örneğinde saptandığı gibi makinelerin çalışma hızlarında artış sağlandığı takdirde işçilerle yapılan üretime göre şantiye veya atölyedeki üretim süresinin de kısalması mümkün olacaktır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında konu deneysel mimarlık özelinde incelendiğinde, eleştirel bir bakışın varlığı ile üretim süreçlerindeki taleplere odaklanılması önem taşımaktadır. Wigglesworth'e göre (2005), eleştirel bir mimari, eleştirel davranmanın yollarını geliştirmelidir ve üretim koşullarıyla eleştirel bir şekilde ilgilenmeyi gerektirmektedir. Diğer bir deyişle, politik olmalıdır. Bu doğrultuda üretim süreçlerinde ortaya çıkan ikilemler, bir projeye ait uygulamanın gerçekleşmesinde ticari zorunluluklar (ve müşterilerin istekleri) ile deneysel mimarlık çıktısı arasındaki beklenti farklarıdır. Deney ile tasarım ve üretim yapmak stratejileri ticari kaygılardan uzaktır. Ancak, günümüz dünyasında mimarlık üretimlerinin kar odaklı yapıldığı da büyük bir gerçekliktir. Dolayısıyla, deneysel olan üretimlerin ortaya çıkış sebebinin bu kar odaklı yaklaşımlara karşı bir eleştiri olduğu düşünülmektedir (Wigglesworth, 2005). Ancak, deneysellik ile mimarlık birbirinden ayrı düşünülen süreçler olmamalıdır. Bu çalışma üzerinde incelemeleri gerçekleştirilen tüm örneklerin ilerleyen zaman diliminde klasik mimarlık üretimlerine dönüşebilme olasılıklarının yüksekliği, aslında deneyselliğin mimarlığın yapılış şekillerini çeşitlendirici bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışma için seçilen yedi durum çalışmasının analizinden sonra her birinin kullanılan benzer teknolojiye rağmen farklı güçlü ve zayıf yönleri bulunduğu sonucuna varılmıştır. Buna rağmen, teknolojik geliştirmelerle eşgüdümlü olarak ortaya koyması muhtemel fırsatlar ve oluşmuş tehditlerde benzerlikler ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Tablo 1.'de ortaya koyulan kısıtlar kaldırıldığı takdirde ilerleyen süreçte İHA'ların hareket serbestlikleri nedeniyle insan erişiminin zor olduğu yerlerde daha yüksek ve daha büyük binalar inşa etmek için kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla, İHA'ların mekân üretiminde farklı senaryo tipindeki uygulamalara yapı özellikleri ve konum fark etmeksizin konsept kanıtı ölçütünde yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Robot kollar ile İHA'ların oluşturduğu hibrit üretimin ise her iki teknolojinin de temel avantajlarını alan, zayıf yönleri azaltırken güçlü yanlarını kullanan, mekân üretimi için en olumlu yöntem olduğu anlaşılmaktadır.

İHA'lar sahip oldukları olanaklar ve edindikleri roller ile aşağıdaki hususları sağlayabilir:

- Hızlı ve çevik olmaları sebebiyle karmaşık mimari örüntüleri az hata veya tamamen hatasız olarak üretebilmek,
- Montaj esnekliği nedeniyle yeni yapı malzemelerini mimarlık üretiminde kullanılabilir hale getirmek,
- Üretimleri daha ekonomik ve hızlı bir şantiye programı içinde gerçekleştirebilmek,
- İşbirlikçi yöntemler ile çoklu üretim özelinde optimizasyonu yüksek çıktılar elde etmek,
- Mekân sınırlamasının olmaması sebebiyle iç ve dış mekânda proje üretiminde ayrıca gelecekte uzay kolonilerinin inşasında aktif görev alabilmek.

İHA'lar ile üretim, deneysel kavramını mimarlığın başına getirerek süreci ayrıksı hale getirmeden, mimarlık üretiminin daimî ve olağan bir parçası olarak düşünülmelidir. Böylece süreç boyunca araştırma ve deney ekseninde gerçekleşen üretimler bir arakesiti oluşturmaktan öteye kuram ile uygulama arasındaki mesafeyi yakınlaştırarak geçebilecektir. Böylelikle deneysel mimarlık üretimlerinin üniversiteler ve araştırma grupları tarafından geliştirilmeye devam edilmesiyle, İHA'lar gibi robotik üretim çerçevesinde deneysel mimarlığın tüm dünyada mevcut pratikler üzerindeki anlayışları değiştirecek bir etkiye sahip olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Agustí-Juan, I., Müller, F., Hack, N., Wangler, T. ve Habert, G. (2017). Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal of Cleaner Production*, 154, 330–340. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.002
- Augugliaro, Federico, Mirjan, A., Gramazio, F., Kohler, M. ve D'Andrea, R. (2013). Building tensile structures with flying machines. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* içinde (ss. 3487–3492). IEEE. doi:10.1109/IROS.2013.6696853
- Augugliaro, Frederico, Lupashin, S., Hamer, M., Male, C., Hehn, M., Mueller, M. W., ... D'Andrea, R. (2014). The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines. *IEEE Control Systems*, 34(4), 46–64. doi:10.1109/MCS.2014.2320359
- Braumann, J. ve Brell-Cokcan, S. (2012). Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design. *Digital Physicality Proceedings of the 30th eCAADe Conference*, 2, 479–486.
- Can, N. ve Kahveci, M. (2017). İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada ve Türkiye'deki Yasal Durumu. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 5(4), 511–535. doi:10.15317/Scitech.2017.109
- Chaltiel, S., Bravo, M., Veenendaal, D. ve Sayers, G. (2020). Drone Spraying on Light Formwork for Mud Shells. *Design Transactions* içinde (ss. 150–157). UCL Press. doi:10.2307/j.ctv13xprf6.30
- D'Andrea, R., Augugliaro, F., Corzillius, M., Flores, C., Hamer, M., Hehn, M., ... Thommen, I. (2011). Flying Machine Enabled Construction. *ETH Zurich*. http://www.idsc.ethz.ch/Research_DAndrea/fmec adresinden erişildi.
- Erol, K. (2020). Deneysel Mimaride Bilgisayar Destekli Tasarımın Etkilerinin Okuması: Venedik Mimarlık Bienali Örnekleri. *Tasarım Enformatiği*, 2(2), 65–74. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/te/issue/66501/869947> adresinden erişildi.
- Florio, W. ve Segall, M. L. (2009). Experimentation and Representation in Architecture: analyzing one's own design activity. *Undisciplined! Design Research Society Conference* içinde (ss. 16–19). Sheffield Hallam University. <http://shura.shu.ac.uk/493/> adresinden erişildi.
- Früh, N. (2022). ICD/ITKE Research Pavilion 2016-17. <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2014-15/> adresinden erişildi.
- Goessens, S., Mueller, C. ve Latteur, P. (2018). Feasibility study for drone-based masonry construction of real-scale structures. *Automation in Construction*, 94(June), 458–480. doi:10.1016/j.autcon.2018.06.015
- Gramazio, F. ve Kohler, G. (2008). *Digital Materiality in Architecture*. Prestel Pub. <https://books.google.com.tr/books?id=LIXWGAAACAAJ> adresinden erişildi.
- Hassija, V., Saxena, V. ve Chamola, V. (2020). Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory. *Computer Communications*, 149(August 2019), 51–61. doi:10.1016/j.comcom.2019.09.021
- Helms, M. M. ve Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis – where are we now? *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215–251. doi:10.1108/17554251011064837
- Hillier, B. (2007). *Space is the machine*. London: Space Syntax. doi:978-0-9556224-0-3
- Khosiawan, Y. ve Nielsen, I. (2016). A system of UAV application in indoor environment. *Production and Manufacturing Research*, 4(1), 2–22. doi:10.1080/21693277.2016.1195304
- Li, Y. ve Liu, C. (2019). Applications of multirotor drone technologies in construction management. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 401–412. doi:10.1080/15623599.2018.1452101
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I. ve Alsharif, M. H. (2022). Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*, 6(6), 147. doi:10.3390/drones6060147
- Pereira da Silva, N. ve Eloy, S. (2021). Robotic Construction: Robotic Fabrication Experiments for the Building Construction Industry. *Advances in Science, Technology and Innovation* içinde (ss. 97–109). doi:10.1007/978-3-030-35533-3_14
- Sadler, S. (2005). *Archigram Architecture Without Architecture*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results> adresinden erişildi.
- Saçgöçak, A. M. D. (1999). *Mimarlığı Anlama ve Yorumlama Bağlamında Kavramsal Bir Model*. <https://tez.yok.gov.tr> adresinden erişildi.

- Schroth, L. ve Bödecker, H. (2021). *Drone Market Report 2021-2026*. Hamburg.
<https://droneii.com/product/drone-market-report> adresinden erişildi.
- Solly, J., Vasey, L., Knippers, J., Menges, A., Felbrich, B., Früh, N., ... Saffarian, S. (2017). Multi-Machine Fabrication. *ACADIA 2017: Disciplines & Disruption* içinde (ss. 248–259). Cambridge, Massachusetts: MIT. http://papers.cumincad.org/data/works/att/acadia17_248.pdf adresinden erişildi.
- Weissenböck, R. (2015). Robotic Design-Fabrication - Exploring Robotic Fabrication as a Dynamic Design Process. *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* içinde (C. 2, ss. 309–318). doi:10.52842/conf.ecaade.2015.2.309
- Wigglesworth, S. (2005). Critical practice. *The Journal of Architecture*, 10(3), 335–346.
doi:10.1080/13602360500162238
- Wood, D., Yablonina, M., Aflalo, M., Chen, J., Tahanzadeh, B. ve Menges, A. (2019). Cyber Physical Macro Material as a UAV [re]Configurable Architectural System. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018* içinde (ss. 320–335). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-92294-2_25
- Xu, M., David, J. M. ve Kim, S. H. (2018). The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. *International Journal of Financial Research*, 9(2), 90–95. doi:10.5430/ijfr.v9n2p90
- Yıldız, S., Kıvrak, S. ve Arslan, G. (2021). Using drone technologies for construction project management: A narrative review. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 4(4), 229–244.
doi:10.31462/jcemi.2021.04229244
- Zhang, K., Chermprayong, P., Xiao, F., Tzoumanikas, D., Dams, B., Kay, S., ... Kovac, M. (2022). Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots. *Nature*, 609(7928), 709–717.
doi:10.1038/s41586-022-04988-4
- URL-1 (2022). <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/icditke-research-pavilion-2016-17/> (Son Erişim Tarihi: 07.12.2022)
- URL-2 (2022). <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/projekte/209.html> (Son Erişim Tarihi: 09.12.2022)
- URL-3 (2022). <https://www.icd.uni-stuttgart.de/teaching/master-theses/cyber-physical-macro-material-as-a-uav-reconfigurable-architectural-system/> (Son Erişim Tarihi: 11.12.2022)
- URL-4 (2022). <https://www.bath.ac.uk/announcements/3d-printing-drones-work-like-bees-to-build-and-repair-structures-while-flying/> (Son Erişim Tarihi: 13.12.2022)
- URL-5 (2022). <https://idsc.ethz.ch/research-dandrea/research-projects/aerial-construction.html> (Son Erişim Tarihi: 14.12.2022)
- URL-6 (2022). <https://uclouvain.be/en/research-institutes/immc/gce/drone-based-construction.html> (Son Erişim Tarihi: 17.12.2022)
- URL-7 (2022). <https://www.muddarchitects.com/mudshell> (Son Erişim Tarihi: 18.12.2022)