

Fotogrametri ve Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Peyzaj Mimarlığına Entegrasyonu

Integration of Photogrammetry and Virtual Reality Applications in Landscape Architecture

Talha Aksoy^{1*}, Şevval Özlü²

¹Kırklareli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 39000, Kırklareli/Türkiye.

²Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, 39000, Kırklareli/Türkiye.

DERLEME MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Talha Aksoy
talha.aksoy@klu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1632100

Yayın süreci

Geliş tarihi: 03.02.2025
Kabul tarihi: 29.05.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Fotogrametri, üç boyutlu modelleme ve sanal gerçeklik teknolojilerinin peyzaj mimarlığındaki uygulamaları, disiplinin evriminde önemli bir yere sahiptir. Bu teknolojiler, özellikle doğal çevrenin sayısal ortamlarda hassas bir şekilde modellenmesi, peyzaj tasarım süreçlerinin daha verimli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Fotogrametrik veriler, bitki modelleme süreçlerine entegrasyonu, çevresel unsurların daha gerçekçi bir biçimde simüle edilmesine imkân verirken, bu teknolojilerin birleşik kullanımı, tasarımın doğruluğunu ve interaktifliğini artırmaktadır. Sanal gerçeklik, sayısal ortamda üç boyutlu modellerin etkileşimli olarak deneyimlenmesini sağlayarak, tasarım süreçlerini daha erişilebilir kılmakta ve kullanıcıların tasarım üzerinde daha bilinçli ve etkili bir şekilde etkileşimde bulunmalarına olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, peyzaj mimarlığında sayısallaşmanın sunduğu yeni fırsatları ve bu süreçlerin gelecekteki araştırma ve uygulamalara nasıl bir temel oluşturabileceğini incelemeyi amaçlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Fotogrametri, 3B modelleme, Bitki modelleme, Sanal gerçeklik, Peyzaj mimarlığı

Abstract

The applications of photogrammetry, three-dimensional modeling and virtual reality technologies in landscape architecture have an important place in the evolution of the discipline. These technologies, especially the precise modeling of the natural environment in digital environments, allow landscape design processes to be carried out more efficiently and effectively. Photogrammetric data, with its integration into plant modeling processes, allows environmental elements to be simulated more realistically, while the combined use of these technologies increases the accuracy and interactivity of the design. Virtual reality makes design processes more accessible by allowing three-dimensional models to be experienced interactively in a digital environment, and allows users to interact with the design more consciously and effectively. These developments aim to examine the new opportunities offered by digitalization in landscape architecture and how these processes can form a basis for future research and practice.

Keywords: Photogrammetry, 3D modeling, Plant modeling, Virtual reality, Landscape architecture

1. Giriş

Günümüzde fotogrametri ve sanal gerçeklik (VR) uygulamaları, peyzaj mimarlığı alanında önemli değişiklikler ve yenilikler getirmektedir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, peyzaj tasarımı ve uygulaması süreçlerinin daha verimli, detaylı ve etkileşimli bir biçimde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Fotogrametri, gerçek dünyadaki nesnelerin ve alanların üç boyutlu modellerinin oluşturulmasını mümkün kılarken, sanal gerçeklik ise bu modellerin etkileşimli ve kullanıcı dostu bir ortamda deneyimlenmesine olanak tanımaktadır. Genel olarak, bu teknolojiler, peyzaj mimarlığı eğitiminden profesyonel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Sanal gerçeklik uygulamalarının etkileşimli ortamlar oluşturma yeteneği, bu ortamlarda kullanılacak nesne ve mekanların modellenmesini zorunlu kılar.

İşte bu noktada fotogrametri, VR teknolojilerinin altyapısını oluşturan en önemli yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Fotogrametri, özellikle gerçek dünyadaki üç boyutlu (3B) hemen hemen her nesnenin modellenmesini sağlayabilmektedir. Modellenen bu çizimler, artırılmış gerçeklik ile görselleştirilerek peyzaj mimarlığında devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Örnek olarak; Yiğit ve Uysal (2021)'in çalışması, fotogrametri yönteminin 3B modelleme, sayısal belgeleme ve sanal müzeler oluşturma konularındaki faydalarını detaylı bir şekilde incelemektedir. Fotogrametri ile elde edilen fotogerçekçi 3B modeller, kullanıcıların bu modelleri sanal ortamlarda daha iyi anlamalarına yardımcı olur ve aynı zamanda peyzaj mimarlığı uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilir (Yiğit & Uysal, 2021). Sanal gerçeklik uygulamaları, peyzaj mimarlığında interaktif deneyimler oluşturmak için kullanılmaktadır. Öğrenciler ve tasarımcılar, sanal gerçeklik ortamları aracılığıyla tasarımlarını daha canlı bir şekilde deneyimleyebilirler. Örneğin, Küçük kara ve arkadaşlarının çalışması (Küçük kara vd., 2024), mimarlık öğrencilerinin restorasyon derslerinde SG teknolojisi kullanarak tarihi yapıları inceleme deneyimlerini ele almıştır. Bu tür uygulamalar, öğrencilere uzaktan erişim ile daha önce erişemedikleri yapılara yakınlaşma imkânı tanımakta ve deneyimlerini zenginleştirmektedir (Küçük kara vd., 2024).

Peyzaj mimarlığı uygulamalarında fotogrametri ve sanal gerçeklik entegrasyonunun diğer bir avantajı, projelerin daha geniş kitlelere tanıtılmasını mümkün kılmaktır. Özeren ve arkadaşları, sanal gerçekliğin eğitimde ve tanıtımda nasıl etkili bir şekilde kullanılabileceğine dikkat çekmektedir (Özeren vd., 2021). Sanal gerçeklik, kullanıcıların mekanları dönüşümlü olarak deneyimlemelerine olanak tanırken, aynı zamanda öğrencilerin ve tasarımcıların alan üzerinde daha iyi bir kavrayış geliştirmesine yardımcı olmaktadır. Entegre uygulamalar, peyzaj tasarımı süreçlerini optimize ederken aynı zamanda yapılan işlerin daha kaliteli olmasını sağlamaktadır. Artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik gibi teknolojiler, peyzaj tasarımında kullanılacak materyalleri ve çevreyle olan etkileşimi simüle edebilmekte, bu sayede tasarımcıların önlerinde daha bilinçli kararlar almalarını sağlamaktadır (Özeren vd., 2021).

Bunun yanı sıra, fotogrametri sayesinde oluşturulan veri setleri, tarihsel ve kültürel bağlamda önemli eserlerin korunması ve restorasyonu için de kullanılabilmektedir. Fidan ve Ulvi'nin çalışması, bu tür uygulamaların eğitim ve uygulama süreçlerindeki önemine vurgu yapmaktadır; bu araştırmalar, fotogrametrik verilerin sanal gerçeklik ortamında nasıl değerlendirildiğini göstermektedir (Fidan & Ulvi, 2022). Bu, peyzaj mimarlığı alanında kavramsal bilgilerin ve uygulamalı becerilerin gelişimine destek olurken, aynı zamanda kültürel mirasın korunmasına katkı sağlamaktadır. Öte yandan, sanal gerçeklik ortamlarında gerçek dünya ile sanal dünya arasındaki etkileşimi artırmak, peyzaj mimarlığı öğrencilerinin tasarım düşünme süreçlerini daha etkili hale getirdiği de gözlemlenmiştir. Eğitim alanında yapılan araştırmalar, sanal gerçekliği kullanan öğrencilerin karmaşık kavramları daha iyi anlama yetisine sahip olduklarını göstermiştir (Kahveci & Sondaş, 2023; Dilek, 2022). Bu bağlamda, sanal gerçeklik uygulamaları, eğitim sürecinde öğrenmeyi zenginleştirdiği gibi, öğrencilere daha yenilikçi tasarım yaklaşımları geliştirme fırsatı sunar.

Teknolojinin peyzaj mimarlığı eğitimine ve uygulamalarına etkisi üzerine kafa yorulduğunda, sanal gerçeklik tabanlı araçların motivasyon artışı sağladığı ve öğrenme süreçlerini macera dolu hale getirdiği aşikâr olmaktadır. Öğrencilerin sanal ortamlarda yer aldıkları ve kendi tasarımlarını görmek ve deneyimlemek için kaliteli bir deneyim yaşadıkları çalışmalardan elde edilen veriler, bu durumun doğruluğunu destekler niteliktedir (Dilek, 2022). Bununla beraber, bu dönüşüm, geleneksel eğitim sistemlerinin sınırlarını zorlayarak daha etkileşimli ve katılımcı bir öğrenme atmosferi sunmaktadır (Kahveci & Sondaş, 2023).

Özetlemek gerekirse, fotogrametri ve sanal gerçeklik uygulamaları, peyzaj mimarlığına entegrasyon süreçlerinde önemli birer araç haline gelmiştir. Bu teknolojiler, peyzaj tasarımında hem eğitsel hem de uygulayıcı boyutlarda önemli katkılar sağlamaktadır. Kullanıcıların düşünsel ve pratik becerilerini geliştirmekte, tarihi mirası koruma çabalarına katkıda bulunmakta ve mimari tasarımların daha geniş kitleler tarafından erişilebilir olmasını sağlamaktadır. Fotogrametri ve sanal gerçeklik araçlarının birleşimi, peyzaj mimarlığı pratiğini ve eğitimini yeni ve etkili yollarla şekillendirmeye devam edecektir.

Fotogrametri tekniği hem üretim süreçleri hem de uygulama alanları açısından her geçen gün daha da genişleyerek kullanıcılarına fayda sağlamak amacıyla hızla gelişmeye devam etmektedir (Uysal, 2023). Fotogrametri tekniği, objeye doğrudan temas etmeksizin, 2B görsellerden güvenilir, doğru ve fotogerçekçi 3B modeller elde etmek için ekonomik ve etkili bir yöntem sunduğu için belgeleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Uslu, 2021). Fotogrametri tekniğiyle oluşturulan 3B modeller, gerçek boyut ve görselleriyle şekillenir (Şenol & Kaya, 2019).

Son yıllarda, 3B sayısal kültürel miras modellerinin uzun süreli depolanması ve yayılması için SketchFab, TurboSquid ve P3d.in gibi çevrimiçi platformlar ortaya çıkmıştır. Bu modellerin web tabanlı platformlarda uzun vadeli depolanması, kültürel mirasın korunması ve daha geniş kitlelere sunulması açısından önemlidir (Nihsanbaev, 2020).

2. Çalışmanın Kapsamı ve Derleme Yaklaşımı

Giriş bölümünde peyzaj mimarlığı disiplininin günümüzdeki zorlukları ve sayısal teknolojilerle olan artan etkileşimi genel hatlarıyla ortaya konulmuştur. Bu derleme makalesinde, söz konusu sayısal dönüşümün önemli bir bileşeni olan ve alana yenilikçi çözümler sunma potansiyeli taşıyan teknolojilere odaklanılmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, özellikle fotogrametri, 3B modelleme ve bu teknolojilerin ileri bir uygulaması olarak sanal gerçeklik ve dijital ikiz kavramlarının peyzaj mimarlığındaki yerini, mevcut uygulamalarını, avantajlarını, zorluklarını ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir literatür taramasıyla ortaya koymaktır.

Bu amacı gerçekleştirmek üzere, öncelikle ilgili anahtar kelimeler (örneğin, "peyzaj mimarlığı", "fotogrametri", "3B modelleme", "bitki modelleme", "sanal gerçeklik", "dijital ikiz", "İHA", "SfM") kullanılarak ulusal ve uluslararası akademik veri tabanları (Scopus, Web of Science, Google Scholar, DergiPark vb.), konferans bildirileri, kitap bölümleri ve teknik raporlar taranmıştır. Literatür tarama süreci sonucunda toplam 95 kaynak incelenmiş, ancak içerik bakımından yetersiz, konu dışı ya da yeterli bilimsel niteliğe sahip olmayan bazı popüler dergi makaleleri, kısa blog yazıları ve yalnızca ürün tanıtımı yapan teknik belgeler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Seçilen kaynaklar, ilgili teknolojilerin peyzaj mimarlığı disiplindeki tarihsel gelişimini, teorik temellerini, farklı uygulama alanlarını (tasarım, planlama, belgeleme, analiz, eğitim, sunum) ve kullanılan yazılım/donanım altyapılarını kapsayacak şekilde değerlendirilmiştir. Derleme süreci, sadece mevcut durumu betimlemekle kalmayıp, aynı zamanda teknolojiler arasındaki ilişkileri, entegrasyon olanaklarını ve disiplinin geleceğine yönelik etkilerini analiz etmeyi hedefleyen tematik bir sentezleme yaklaşımı üzerine kurulmuştur.

Makalenin ilerleyen bölümleri, bu derleme yaklaşımı doğrultusunda yapılandırılmıştır. İlk olarak, peyzaj mimarlığında temel bir veri toplama, analiz ve belgeleme aracı olarak fotogrametri teknolojisinin yeri detaylandırılacaktır. Bu bölümde, fotogrametrinin peyzaj tasarımı, planlaması ve kaynak geliştirme gibi alt alanlardaki kullanımı, geleneksel ve modern yöntemlerle ilişkisi ve disiplinde kullanılan temel yazılım türleri (piksel, vektör, obje tabanlı) ele alınacaktır.

Ardından, fotogrametri tekniğinin tanımı, tarihsel süreci ve farklı sınıflandırmaları (yersel, hava, obje odaklı vb.) aktarılacaktır. Bu bölüm, fotogrametrinin temel prensiplerini anlamak için bir zemin oluşturduktan sonra, teknolojinin en önemli çıktılarından biri olan 3B modellemeye odaklanacaktır. Özellikle peyzaj mimarlığı için kritik öneme sahip olan bitkilerin fotogrametri kullanılarak nasıl modellendiği, bu süreçte kullanılan popüler yazılımların (Agisoft Metashape, Autodesk 123D Catch, 3DF Zephyr, RealityCapture vb.) karşılaştırmalı analizi ve bu yaklaşımın avantajları ile zorlukları tartışılacaktır. Bu kısım, fotogrametriden elde edilen verilerin nasıl somut sayısal varlıklara dönüştüğünü ve bu modellerin önemini vurgulayacaktır.

Son olarak, fotogrametri ve 3B modelleme ile oluşturulan sayısal içeriklerin, peyzaj mimarlığında daha etkileşimli ve sürükleyici deneyimler sunmak üzere nasıl kullanılabileceği ele alınacaktır. Bu bağlamda, sanal gerçeklik (VR) teknolojisinin tanımı, peyzaj mimarlığındaki kullanım alanları (tasarım görselleştirme, analiz, katılımcı süreçler) ve dijital ikiz kavramıyla olan ilişkisi incelenecektir. Bu bölüm, mevcut teknolojilerin gelecekteki potansiyelini ve peyzaj mimarlığı pratiğini nasıl dönüştürebileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

3. Peyzaj Mimarlığında Fotogrametri Teknolojisinin Yeri

Peyzaj mimarlığında fotogrametri teknolojisi üç başlık altında incelenmiştir;

- Peyzaj Tasarım Çalışmaları,
- Peyzaj Planlama Çalışmaları,
- Kaynak Geliştirme ve Eğitim (Kurum & Çabuk, 1998).

Peyzaj tasarımı yapan kişi 2B çalışabileceği gibi 3B olarak çalışır, bilgisayar destekli tasarım teknolojilerinin ve görselleştirme teknolojilerinden yararlanır (Kurum & Çabuk, 1998). Tasarım sürecinde; çizim, 3B modelleme, animasyon, aydınlatma gibi unsurların simülasyonları yapılabilir, metraj hesaplamaları çıkarılabilir, çizimler şantiyeye anında aktarılabilir ve işverenle eşzamanlı çevrimiçi toplantılar düzenlenebilir. Bu sayede modern teknolojilerle birçok olanak sağlanmaktadır. Peyzaj mimarlığı ve mimarlık disiplini "Grafik" amaçlı yazılımlar "Piksel Bazlı Yazılımlar, Vektör Bazlı Yazılımlar ve Obje Bazlı Yazılımlar üç ana başlık altında incelenmiştir (Yılmaz, 2011).

3.1. Piksel Tabanlı Yazılımlar

Bilgisayarların tasarımcıyla etkileşimde bulunduğu ekranlar, çözünürlük adı verilen matris yapısına sahiptir. Bu matrisin her bir hücresi, düzlemdeki karelerden oluşan piksellerden meydana gelir. 2B en küçük birim olan piksellerin sıralanarak renklerin atanmasıyla grafikler oluşturulabilen yazılımlar, "Piksel Tabanlı" yazılımlar olarak adlandırılır. Bu yazılım türü, genellikle iki boyutlu grafikler oluşturmak için kullanılır. Mimari tasarım sürecinde bu yazılımlar genellikle uygun değildir, ancak son aşamada grafiklere efektler eklemek amacıyla kullanılabilirler (Yıldırım, 2004). Piksel bazlı yazılım programları arasında Photoshop, Corel Draw ve Corel Paintshop Pro yer almaktadır.

3.2. Vektör Tabanlı Yazılımlar

Vektör tabanlı yazılımlar, "çizgi" ögesini kullanarak "tel çerçeve" (wireframe) veya "ızgara" (mesh) biçiminde çizimler üretir. Bu yazılımlarda çizgiler, düz olabileceği gibi eğrisel (Spline) de olabilir. Geleneksel kalem yerine, tasarımda klavye, fare veya sayısallaştırıcı (digitizer) gibi giriş araçları kullanılır. 2B düzlemsel veya 3B Kartezyen uzayda, tasarımlar çizgiler ve düğümler aracılığıyla modellenir (Yıldırım, 2004). Vektör bazlı yazılım programları arasında AutoCAD, NetCAD, Landcadd, 3ds Max, Maya, SketchUp, Vectorworks Landmark, Vue, Cinema 4D, Blender ve Archicad yer almaktadır.

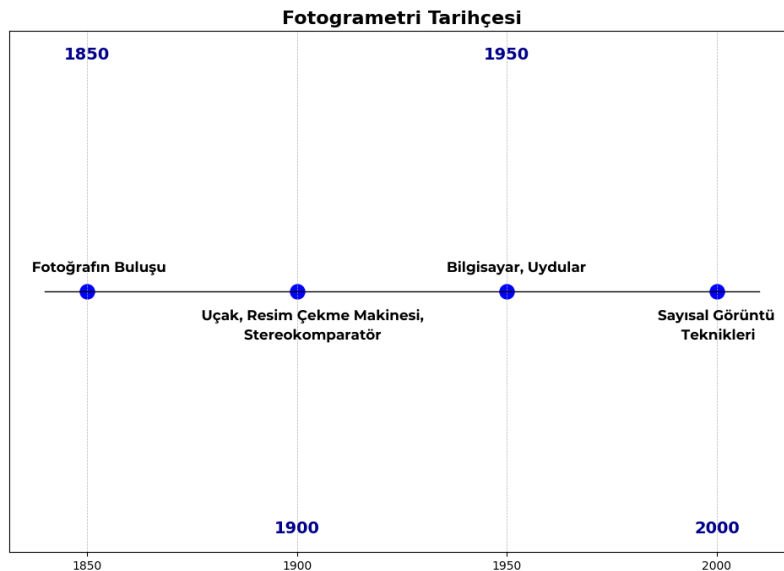
3.3. Obje Tabanlı Yazılımlar

Obje tabanlı yazılımlar, temel geometrik formlar ile taşıyıcı sistemler, duvarlar, kapılar, pencereler gibi yapı elemanlarının blok kütüphaneler şeklinde yazılımda mevcut olduğu ve tasarımcı tarafından parametrik olarak seçilerek mimari kompozisyonun oluşturulduğu yazılımlardır (Yıldırım, 2004). Obje bazlı yazılım programları arasında 3D Home Landscape Architecture, Allplan yer almaktadır.

Üstte bahsedilen Piksel, Vektör ve Obje bazlı yazılımlar peyzaj mimarlığında kullanılan geleneksel çizimlere destek olmakta ve tasarımcı/plancının işini büyük ölçüde kolaylaştırmaktadır. Genel olarak kullanılan bu yöntemlere fotogrametrinin dahil edilmesi alan bazında genellikle büyük çalışılan peyzaj mimarlığı için günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Peyzaj mimarlığında fotogrametri, özellikle mimari ve kültürel mirasın belgelenmesi ve korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, bu teknolojinin peyzaj disiplininde bütünleşik ve sistematik bir şekilde kullanımı hala yeterince yaygın değildir. Piksel bazlı fotogrametri entegrasyonunun avantajları; veri tutarlılığı, gerçekçi tasarımlar elde etme ve etkileyici sunum teknikleri olarak sıralanabilir. Bu çalışmanın çıkış noktası, fotogrametrinin peyzaj mimarlığı alanındaki mevcut kullanımını analiz ederek, bu teknolojinin disiplinin her aşamasına entegre edilmesinin geleceğe yönelik yenilikçi tasarım ve planlama süreçlerine nasıl katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktır.

4. Fotogrametri Tekniği ve Uygulamaları

Fotogrametrinin ana hedefi plan ve harita üretimi olmakla birlikte, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte pek çok farklı alanda da kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 1). Bu sistemin temel avantajları arasında, sayısal görüntü işleme ve Structure from Motion (SfM) algoritmalarının entegrasyonu sayesinde, manuel müdahaleye gerek kalmadan otomatik fotoğraf ölçümünün gerçekleştirilmesi ve bu sayede nesne ya da alanın 3B modellenmesine yönelik verilerin eş zamanlı ve yüksek doğrulukla elde edilebilmesi yer almaktadır.



Şekil 1. Fotogrametrinin tarihsel gelişimi (Kılınçoğlu (2016)'dan esinlenilmiştir)

- Grafik Fotogrametri: Çizim ile yapılan, daha çok teorik olan fotogrametridir.
- Analog Fotogrametri: Değerlendirmelerin genellikle harita çizimlerinin analog aletlerle (Şekil 2) yapıldığı fotogrametridir.

- Analitik Fotogrametri: Matematiksel yöntemlerle yapılan çözümlerle, bilgisayar destekli (Şekil 3) fotogrametri uygulamalarına denir.
- Sayısal (Dijital) Fotogrametri: Sayısal fotoğraflarla çalışan fotogrametriye denir (Marangoz, 2012).



Şekil 2. Analog fotogrametri (Marangoz, 2012)



Şekil 3. Analitik fotogrametri (Marangoz, 2012)

Geçmişte yeryüzüne ait bilgilerin ve fotoğrafların toplanması ve haritalandırılması için hava fotoğrafçılığı kullanılmıştır. Fotogrametri, görüntü işleme sistemleri kullanarak yeryüzü ve çevresi hakkında doğru veriler elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Elde edilen görseller, harita üretiminin yanı sıra askeri uygulamalar ve uzay bilimleri gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır (Bilgi, 2007). Fotogrametrinin ilk amacı yalnızca harita ve plan yapımı iken, teknolojinin ilerlemesiyle kullanım alanları hızla genişlemiştir. Bu kapsamda fotogrametri Tablo 1’de sınıflandırılmıştır (Toprak, 2014).

Tablo 1. Fotogrametrinin sınıflandırılması (Toprak (2014)’den esinlenilmiştir)

1.Resim Çekilen Yerin Konumuna Göre	2.Değerlendirmede Kullanılan Resim Sayısına Göre	3. Değerlendirme Yöntemine Göre	4.Uygulama Alanına Göre	5.Obje Büyüklüğüne Göre
-Yersel Fotogrametri -Hava Fotogrametrisi -Uydu Fotogrametrisi -Yakın Resim Fotogrametrisi	-Tek Resim Fotogrametrisi -Çift Resim Fotogrametrisi	-Plançete Fotogrametrisi -Analog Fotogrametri -Analitik Fotogrametri -Dijital Fotogrametri	-Topografik Fotogrametri -Topografik Olmayan Fotogrametri • Foto-Yorumlama • Mühendislik Fotogrametrisi • Mimarlık Fotogrametrisi • Ortofotograf • Endüstri Fotogrametrisi • Jeodezik Fotogrametri • Kadastro Fotogrametrisi	-Mikro Fotogrametri -Makro Fotogrametri

Fotogrametri, görüntüleme ve veri toplama yöntemleri arasında önemli bir yere sahip olup, çeşitli uygulamalarda farklı türlere ayrılmaktadır. Şekil 1’de çekim yapılan yerin konumuna göre sınıflandırma incelendiğinde; yersel fotogrametri, hava fotogrametri, uydu fotogrametrisi ve yakın mesafe fotogrametrisi bu çalışma kapsamında ayrıca açıklanmıştır. Her bir fotogrametri türü, belirli avantajları ve dezavantajları ile birlikte çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Yersel Fotogrametri: Yer yüzeyine yakın noktalardan yapılan görüntülemeleri içerir. Genellikle tripod üzerine sabitlenmiş bir DSLR kamera ile gerçekleştirilir ve pozlama ayarları ile çekim aralıkları dikkatlice planlanmalıdır. Yersel fotogrametri, detaylı ve yüksek çözünürlüklü 3D modeller oluşturmak amacıyla kullanılmaktadır (Kronig vd., 2022). Örneğin, tarihi yapıların korunması ve restorasyonu gibi konularda, yersel fotogrametrinin hızı ve erişilebilirliği büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, kullanıcıların yararlanabileceği yüksek hassasiyet sunan ölçüm verileri sağlamaktadır. Ayrıca, karmaşık yüzeylerin ve yapısal özelliklerin detaylı analizleri için de uygundur (Cova vd., 2023).

Hava Fotogrametrisi: Hava araçları veya dronlar aracılığıyla yapılan görüntüleme işlemlerini kapsar. Yeryüzünden belirli bir yükseklikte ve geniş alanları kapsayacak şekilde yapılan çekimler, genellikle büyük ölçekli haritalama ve topografik analizler için kullanılır. Dronlar sayesinde, zorlu ve ulaşılması güç alanların görüntülenmesi, hava fotogrametrisini daha çekici hale getirir (Fan vd., 2023). Bu tür fotogrametri, doğa olaylarının analizi, orman envanteri, tarım uygulamaları ve çevresel izleme gibi alanlarda yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Szostak vd., 2024). Dron tabanlı hava fotogrametrisi, veri toplamada hız ve etkinlik sağlarken maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır (Mondino vd., 2022). Peyzaj mimarlığında yüksek çözünürlüklü sayısal veriye ulaşmak için sıklıkla kullanılır hale gelmiştir.

Uydu Fotogrametrisi: Uydu fotogrametrisi, doğrudan uzaydaki uydu görüntüleme sistemlerinden elde edilen verilerin kullanılmasıyla oluşur. Bu kategori, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile birlikte analiz edilerek büyük ölçekli alanların incelenmesine olanak tanır. Uydu görüntüleri, geniş coğrafi alanların izlenmesi, tarım ve çevre yönetimi gibi pek çok alanda kullanılabilirken; yüksek çözünürlük ve geniş kapsam sunmaktadır (Li vd., 2022). Çeşitli uydu sistemleri, farklı spektral bantlarda görüntü alarak yer yüzeyinin çeşitli özelliklerini ortaya koyabilir (Färcaş vd., 2023). Bununla birlikte, uydu fotogrametrisinin sınırlamaları arasında bulut örtüsü ve yoğun bitki örtüsü gibi engeller nedeniyle görüntü elde etmede karşılaşılan zorluklar bulunmaktadır.

Yakın Mesafe Fotogrametri: Yakın mesafe fotogrametrisi, 3D modelleme ve ölçümleme için kullanılan bir tekniktir ve tipik olarak bir nesne ile kamera arasında 10 metreden az bir mesafede gerçekleştirilir. Yakın mesafe uygulamaları, mimari, arkeolojik veya endüstriyel nesnelerin detaylı analizini yapabilme olanağı sunar. Bu tür, bilgisayarlı görüş ve yapay zeka yöntemleri ile birleştiğinde daha da güçlü hale gelmektedir (Cova vd., 2023). Örneğin, bir projenin detaylı tasarımında, küçük yüzey detaylarının hassas modellemesi söz konusu olduğunda bu teknik önemli avantajlar sunmaktadır. Yakın mesafe fotogrametrisi sayesinde, çeşitli yapıların yüzeyi üzerinden üç boyutlu modeller elde edilebilir, bu da yapının mimari özelliklerinin korunmasını kolaylaştırır (An vd., 2021).

Kimya, mühendislik, arkeoloji ve doğa bilimleri gibi geniş bir yelpazede uygulama potansiyeline sahip olan fotogrametri, modern teknolojilerin gelişmesi ile daha yaygın bir hale gelmektedir. Örneğin, yapay zeka destekli süreçlerin kullanımı fotogrametrik veri setlerinin işlenmesini hızlandırmakta ve daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır (Jäger-Klein vd., 2023). Bunun yanı sıra, kullanıcıların çeşitli ortamlarda bu teknolojiyi kullanarak veri toplamayı ve görselleştirmeyi kolaylaştıran otomasyon yöntemleri de geliştirilmektedir (Kong vd., 2023).

Fotogrametrinin çeşitlendirilmesi ve spesifik ihtiyaçlara göre uygulama alanlarının genişletilmesi, bu teknolojinin gelecekteki gelişimleri için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Her bir fotogrametri türü, belirli koşul ve ihtiyaçlar doğrultusunda en uygun çözümü sunabilmekte, bu sayede hem akademik hem de pratik alanlarda fayda sağlamaktadır.

Bir başka fotogrametri yöntemi, sayısal fotogrametri yöntemidir. Bu yöntem, günümüzde yoğun olarak kullanıldığı için fotogrametri çeşitli parametreler doğrultusunda sınıflandırılmıştır (Uysal, 2023). Bu yöntem aşağıda bulunan üç başlıktan oluşmaktadır.

- Yersel Fotogrametri: Yer yüzeyinde çekilen fotoğraflarla yapılan fotogrametri uygulamaları.
- Hava Fotogrametrisi: Bir hava aracındaki kamera ile çekilen fotoğrafların kullanıldığı fotogrametri uygulamaları.
- Obje Odaklı Fotogrametri; İç mekanlarda veya dış mekanlarda kontrollü ortamlarda gerçekleştirilen, arkeolojik buluntular, sanat eserleri veya oyun/sinema için yapılan fotogrametri türüdür.

Bir diğer sınıflandırma, kullanım alanlarına göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma, yalnızca ölçme, biçimlendirme ve konumlandırma ile sınırlı kalmayıp, aynı zamanda bir nesnenin önceki ve sonraki hallerini değerlendirme gibi farklı işlevleri de kapsayan fotogrametri türüdür. Bu türler, yalnızca ölçme, biçimlendirme ve konumlandırma gibi temel işlevlerle sınırlı kalmaz; aynı zamanda nesnelerin önceki ve sonraki hallerini değerlendirme gibi farklı amaçlara da hizmet eder. Yakın Fotoğraf Fotogrametrisi, nesne ile kamera arasındaki mesafe 300 m’yi geçmeyen uygulamalar için kullanılırken, Topoğrafik Fotogrametri topoğrafik harita üretimi için kullanılır. Topoğrafik Olmayan Fotogrametri ise topoğrafik harita yapımı dışında kalan uygulamaları kapsar. Kadastro Fotogrametrisi, kadastro haritalarının üretiminde, Jeodezik Fotogrametri ise jeodezik noktaların üretiminde kullanılır. Mühendislik Fotogrametrisi, mühendislik projelerinde, Mimarlık Fotogrametrisi ise tarihi yapıların belgelenmesinde önemlidir. Tek Resim Fotogrametrisi, tek bir fotoğrafla metrik bilgiler üretirken, Çift Resim Fotogrametrisi, iki fotoğrafla ölçüm yaparak üç boyutlu görüş sağlar (Avşar, 2006.). Bilgisayar Oyunu Fotogrametrisi, oyunlardaki objelerin üç boyutlu dünyaya entegrasyonunu sağlar.

Sanatsal Fotogrametri ise sanat eseri yaratmak amacıyla uygulanır. Son olarak, Sinematografik Obje Fotogrametrisi, sinema sektöründe görsel efektlerle objelerin üretiminde kullanılır. Bu fotogrametri türleri, farklı sektörlerde çeşitli ihtiyaçlara yönelik çözümler sunar (Külür, 2002; Uysal, 2023).

4.1. Fotogrametri ve 3B Modelleme

Fotogrametri, peyzaj mimarlığında önemli bir tekniktir ve detaylı üç boyutlu (3B) modeller oluşturmak için 2B görüntü verilerini kullanır. Bu uygulama, insansız hava araçları (İHA) ve Hareketten Yapı (SfM) örtüşen 2B görüntülerden otomatik olarak kamera pozisyonlarını ve seyrek 3B nokta bulutlarını oluşturan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Bu ilk 3B çıktı, genellikle ek adımlarla daha detaylı ve yüksek çözünürlüklü 3B modellere dönüştürülmektedir ve jeoloji bilimlerinde geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir (Carrivick vd., 2016). Bu teknolojiler, çağdaş peyzaj mimarlığı uygulamaları için gerekli olan yüksek kaliteli coğrafi ve topoğrafik verilerin hızlı bir şekilde edinilmesini sağlar. Bu yöntemler sayesinde, uygulayıcılar Dijital Yükseklik Modelleri (DYM), Dijital Ortofoto Haritaları (DOH) ve peyzajların kapsamlı 3B temsillerini etkili bir şekilde üretebilirler. Bu modeller, peyzaj tasarımı ve yönetiminde bilinçli kararlar almak için kritik öneme sahiptir (Luo vd., 2020; O'Driscoll, 2018).

İHA teknolojisinin yüksek taşınabilirliği ve zamanında veri toplama yeteneği, peyzaj mimarları ve planlamacılarının geniş alanlarda hızlı anketler yapmasına olanak tanır, böylece veri toplama süreçlerini daha verimli hale getirir (Luo vd., 2020). Bu gerçek zamanlı veri edinimi, özellikle peyzaj değişiklikleri veya müdahaleleri ile ilgili olarak, analiz ve koruma için yüksek çözünürlüklü görüntülere ihtiyaç duyulduğunda çok önemlidir. Bu tür yetenekler, İHA fotogrametrisinin arkeolojik alanlar ve kentsel çevrelerin belgelenmesinde nasıl etkili olduğuna dair çeşitli vaka çalışmalarında görülmektedir; bu da onun çok yönlülüğünü ve uyarlanabilirliğini gösterir (Carvajal-Ramírez vd., 2019; O'Driscoll, 2018).

Planlama, mimarlık, çevresel değerlendirmeler ve turizm gibi alanlarda üç boyutlu veri ihtiyacı giderek artmaktadır (Lerma & Garcia, 2004). Fotogrametrik ve mesafe ölçme tabanlı sistemler, sadece gerçek objenin geometrisinin belirlenmesine değil, aynı zamanda objenin coğrafi referansı ile birlikte modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu teknolojiler, özellikle objenin gerçek görüntüsünü alarak, bu görüntünün doku olarak modellere aktarılmasına imkan sağlayarak ek avantajlar sunmaktadır (Yakar & Mirdan, 2017). Günümüzde sayısal fotogrametri, yüksek bir teknoloji seviyesine ulaşmıştır. Klasik fotogrametrinin aksine, burada görüntüler film üzerine kaydedilmek yerine piksel tabanlı sayısal fotoğraflar üzerinden işlenmektedir. Bu fotoğraflar, bilgisayar ortamında depolanarak çeşitli yazılımlar aracılığıyla farklı alanlarda fotogrametrik uygulamalar yapılabilir (Ceylani & Yavuz, 2023).

Peyzaj mimarlığında bitkilerin 3B olarak kullanılması hem görsel estetik değerlere, hem de iklim, coğrafya ile alakalı tasarım/planlamada kullanılan parametreler için büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, fotogrametri ve diğer sayısal modelleme tekniklerinin entegrasyonu, peyzajın daha gerçekçi ve fonksiyonel bir biçimde analiz edilmesine olanak tanıyarak, gelecekte daha kapsamlı, doğru ve etkileşimli tasarım süreçlerinin gelişmesine olanak sağlayacak bir temel oluşturmaktadır. Çalışmanın devam eden bölümlerinde bitkilerin fotogrametri ile modellenmesine ve kullanımına odaklanılmaktadır.

4.1.1. Fotogrametri Tekniklerinin 3B Bitki Modelleme Süreçlerindeki Uygulamaları

Son yıllarda bitki bilimi, ıslah ve yetiştiricilik çalışmalarında bitki fenotiplemesi önemli bir gelişim göstermektedir. Buna karşın 3B modellemeye yönelik teknik yöntemler ve uygulamalar daha çok bilgisayarlı görme alanı ile ilişkilendirilmektedir (Okura, 2022). Benzer şekilde, Peyzaj Mimarlığı disiplininde bitkisel tasarım projelerinde ağaçlar tasarımın temel ögesini oluşturmasına rağmen, 3B modelleme programlarında yer alan bitkisel materyaller çoğu zaman yetersiz kalmakta; bu durum özellikle artan üç boyutlu tasarım uygulamalarında gerçekçi ağaç görsellerine duyulan ihtiyacı daha görünür kılmaktadır (Uzun, 2015). Bu bağlamda, farklı 3B modelleme programlarının bitkisel materyalleri oluşturma ve görselleştirme konusundaki performansları aşağıda karşılaştırılmıştır:

Agisoft PhotoScan (Metashape), Autodesk 123D Catch, 3DF Zephyr ve RealityCapture programların, 3B modelleme yazılımlarını yapay zeka teknikleri ve kullanım özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Fotoğraflardan oluşturulan 3B modellerin kalitesi, çalışma prensipleri ve sağladıkları avantajlar değerlendirilmiştir (Tablo 2).

• Agisoft PhotoScan (Metashape)

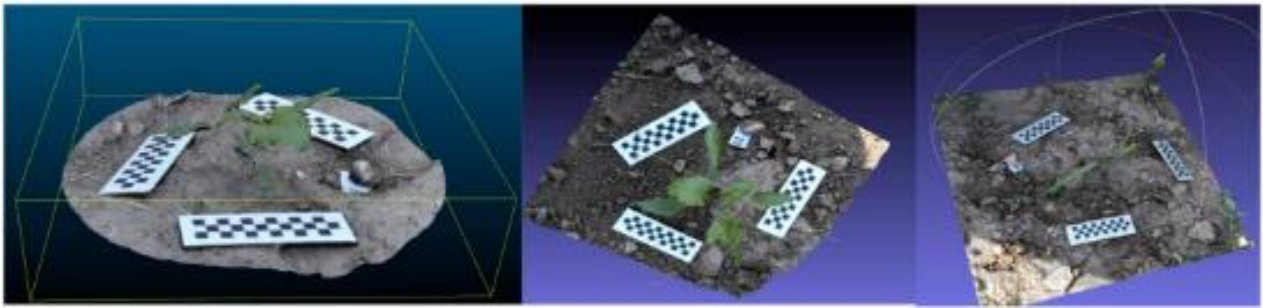
Temel Mantık: Agisoft PhotoScan, gelişmiş bir fotogrametri algoritması kullanır. Kullanıcıya daha fazla kontrol imkânı tanır ve büyük veri setleriyle daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesine olanak sağlar (Şekil 5 ve Şekil 6).

Yapay Zeka Kullanımı: Yapay zeka, fotoğraflardaki dokular, derinlikler ve kenarlar gibi ince detayların işlenmesinde önemli bir rol üstlenir. Nokta bulutları oluşturulurken ve detaylı işleme yapılırken yüksek hassasiyet sağlar.

Avantajlar: Kullanıcılar, çeşitli ayarlarla modellerini optimize edebilirler. Fotoğraf sayısı konusunda bir kısıtlama bulunmaz ve elde edilen modelin detay seviyesi oldukça yüksektir.



Şekil 4. Agisoft Photoscan uygulaması ile modellenen bitki (Uçar & Ergün, 2004)



Şekil 5. Agisoft Photoscan uygulaması ile modellenen bitki (Andújar, vd. 2018)

- **Autodesk 123D Catch**

Temel Mantık: Autodesk 123D Catch, fotogrametri temelli bir sistemle çalışmaktadır. Yazılım, yüklenen fotoğraflardaki (Benliay & Akbiyik, 2016). Ortak noktaları tespit ederek bu noktaları birleştirir ve bir nokta bulutu oluşturur. Çevrimiçi olarak çalışan bu uygulama, modelleme sürecini bulut üzerinde gerçekleştirir. Ancak, bu süreçte en fazla 70 fotoğraf karesiyle sınırlı kalınması, özellikle karmaşık modellerin oluşturulmasında zorluklar yaratabilir. Modelleme süreci tamamen otomatik olarak işlediği için, kullanıcı müdahalesi oldukça sınırlıdır (Şekil 7).

Yapay Zeka Kullanımı: Autodesk 123D Catch, temel düzeyde yapay zeka algoritmalarından yararlanarak çalışır. Bu algoritmalar, kullanıcı tarafından yüklenen fotoğraflar arasındaki ortak noktaları tespit eder ve bu noktaları kullanarak 3B modeller oluşturur. Ancak, karmaşık yapıları ve ince detayları işleme konusunda yapay zekanın katkıları sınırlıdır. Yazılım, gelişmiş yapay zeka algoritmaları yerine daha basit bir yaklaşım benimsediğinden, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren projelerde detay seviyesi düşük kalmakta ve modelin doğruluğu istenilen düzeyde olmamaktadır. Bu durum, yazılımın özellikle profesyonel ve ileri düzey projelerde yeterli performansı sergileyememesine yol açmaktadır.

Avantajlar: Yazılımın en belirgin avantajı, kullanıcı dostu bir arayüze sahip olmasıdır. Basit ve anlaşılır menü yapısı, özellikle amatör kullanıcıların programı kolaylıkla kullanabilmesini sağlar. İnternet erişimi olan ve temel düzeyde modelleme yapmak isteyen kullanıcılar için hızlı ve ücretsiz bir çözüm sunan bu yazılım, küçük ölçekli projeler için verimli ve pratik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleriyle, özellikle başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için tercih edilebilir bir seçenek oluşturur.



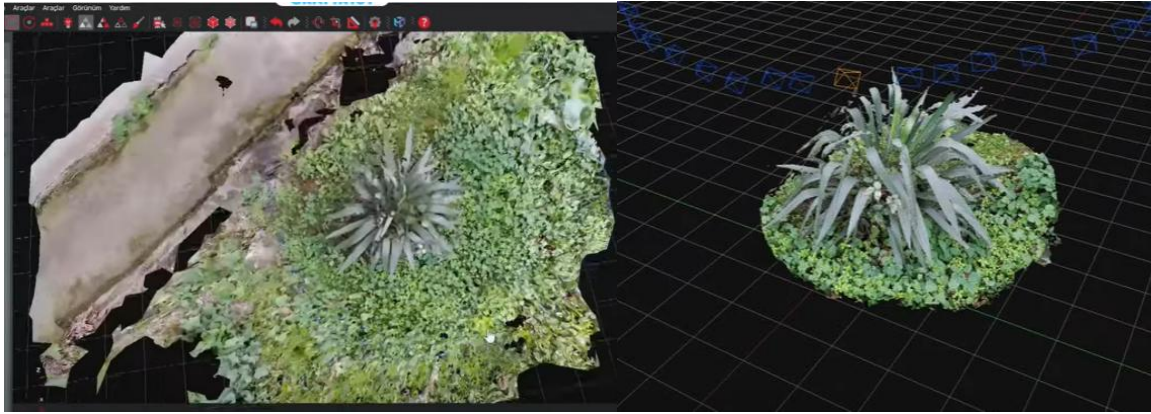
Şekil 6. Autodesk 123D Catch programının 3B bitki modellemesi (Benliay & Akbiyik, 2016)

- **3DF Zephyr**

Temel Mantık: 3DF Zephyr, fotogrametri ve yapay zeka teknolojilerini birleştirerek 3B modeller oluşturur. Otomatik işlem süreciyle birlikte, kullanıcılara manuel düzeltmeler yapma imkânı da sunar (Şekil 8).

Yapay Zeka Kullanımı: Yapay zeka, görüntü işleme ve modelin detaylandırılması aşamalarında etkin bir şekilde kullanılır. Ancak, karmaşık yapıların işlenmesi süreci daha uzun sürebilir.

Avantajlar: Farklı veri türlerini destekler ve çeşitli detay seviyelerinde çıktı sağlar.



Şekil 7. 3DF Zephyr ile modellenen bitkinin 3B yapısı (GRAFIK101, 2024)

- **RealityCapture**

Temel Mantık: RealityCapture, fotogrametri algoritmalarını ileri düzey yapay zeka teknikleriyle birleştirerek, büyük veri setlerini hızlı bir şekilde işleyip yüksek doğrulukta sonuçlar üretir (Şekil 9).

Yapay Zeka Kullanımı: Gelişmiş yapay zeka algoritmaları, modelin detaylandırılması ve yüksek hassasiyetle nokta bulutlarının oluşturulması aşamalarında etkin bir şekilde kullanılır.

Avantajlar: Büyük veri setleriyle hızlı işlem yapabilme yeteneği ve yüksek detay seviyesiyle sağlanan üst düzey sonuçlar, bu yazılımın öne çıkan özelliklerindendir.



Şekil 8. RealityCapture ile modellenen bitkinin 3B yapısı (Yusuf, 2022)

Tablo 2. Yukarıda incelenen 3B model programlarının karşılaştırması

Özellikler/Programlar	Autodesk 123D Catch	Agisoft Photoscan (Metashape)	3DF Zephyr	RealityCapture
Yapay Zeka Hassasiyeti	Düşük	Yüksek	Orta	Çok Yüksek
Fotoğraf Sınırı	70	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız
Detay Seviyesi	Düşük	Yüksek	Orta	Çok Yüksek
Fiyat	Ücretsiz	Lisans Gerekir	Lisans Gerekir	Lisans Gerekir
Kullanıcı Müdahalesi	Sınırlı	Esnek	Esnek	Esnek
Performans (hız)	Hızlı	Orta	Orta	Hızlı

Karşılaştırılan yazılımlar, peyzaj mimarlığı ve fotogrametri alanında yapılan güncel literatür taraması sonucunda en yaygın kullanılan programlar arasından seçilmiştir. Seçimde kullanım yaygınlığı, literatürdeki örnek çalışmalarda yer alma sıklığı ve bitki modelleme süreçlerine uygunluk kriterleri esas alınmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda (Tablo 2);

Agisoft Metashape, fotogrametri alanında profesyonel uygulamalar için son derece güçlü ve kapsamlı bir yazılım platformudur. Gelişmiş algoritmalar ve yüksek derecede özelleştirilebilir parametre seçenekleri sunarak, büyük ve karmaşık veri setlerinin işlenmesine olanak tanır. Bu sayede, yüksek çözünürlükte ve büyük detay içeren üç boyutlu modellerin oluşturulması mümkündür. Yazılım, kullanıcıların model üzerinde derinlemesine ince ayarlar yapmalarına imkan tanıyarak, çeşitli projelere uyarlanabilir olmasını sağlar. *Agisoft Metashape*, özellikle büyük ölçekli projelerde ve yüksek hassasiyet gerektiren fotogrametrik analizlerde tercih edilen bir çözüm sunmakta olup, profesyonel kullanıcılar için idealdir.

Autodesk 123D Catch, fotogrametri temelli bir yazılım olarak, özellikle temel düzeyde 3B modelleme işlemleri gerçekleştirmek isteyen kullanıcılar için tasarlanmıştır. Bulut tabanlı bir sistem olarak çalışan bu yazılım, yüklenen fotoğraflardaki ortak referans noktalarını analiz ederek, otomatik olarak sayısal modeller oluşturur. Programın basit yapısı ve erişilebilir olması, küçük ölçekli projelerde ve amatör kullanıcılar için cazip bir çözüm sağlar. Bununla birlikte, fotoğraf sayısının sınırlı olması ve modelleme sürecinde ortaya çıkan düşük detay seviyesi, karmaşık ve yüksek hassasiyet gerektiren projelerde yazılımın etkinliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, internet bağlantısı gereksinimi ve kullanıcı müdahalesine izin vermemesi gibi kısıtlamalar, yazılımın esneklik açısından bazı dezavantajlara yol açmaktadır. Ancak, *Autodesk 123D Catch*, temel düzeydeki hızlı modelleme ihtiyaçlarını karşılayabilen ve erişilebilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

3DF Zephyr: *3DF Zephyr*, farklı kullanıcı seviyelerine hitap edebilecek bir fotogrametri yazılımıdır. Orta düzeyde performans sağlayan bu yazılım, veri işleme esnekliği ve geniş parametre seçenekleri ile çeşitli projelere uygulanabilir. Ancak, yüksek çözünürlük ve karmaşıklık gerektiren projelerde yazılımın performansında sınırlamalar görülebilir.

RealityCapture: *RealityCapture*, fotogrametri ve yapay zeka teknolojilerini birleştirerek büyük veri kümelerini yüksek hızda işleyebilme ve yüksek doğrulukla sonuç elde etme kapasitesine sahip bir yazılımdır. Gelişmiş algoritmalar sayesinde karmaşık verilerden yüksek hassasiyetle 3D modeller oluşturulabilmektedir. Yazılım, sağladığı hız ve verimlilik ile endüstriyel ve akademik projelerde tercih edilmekte olup, profesyonel modelleme gereksinimlerini en yüksek düzeyde karşılayabilmektedir.

4.1.2. 3B Bitki Modellemede Fotogrametrinin Avantajları

Gerçek dünya bitkilerinden 3B yapılar çıkarmak, sanal bitkileri modellemenin hızlı bir yoludur. Bu hedefe ulaşmak için, 3B tarayıcılarla elde edilen nokta bulutları (Livny vd., 2010), çoklu görünüm görüntüleri (Isokane vd., 2018; Neubert vd., 2007) veya tek bir görüntü kullanılarak çeşitli yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemler, şimdiye kadar büyüme simülasyonları veya grafiksel uygulamalar için kullanılabilir olmuştur. Ancak, yeniden yapılandırmanın amacı, uygulamaların gereksinimlerine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, grafiksel uygulamaların amacı, makul ve fotogerçekçi 3B modeller oluşturmak olduğundan, bazı yöntemler, gerçek nesnelere sadık 3B modeller gerektiren bitki yetiştirme uygulamaları için uygun olmayabilir.

Metashape, 3DF Zephyr ve RealityCapture gibi fotogrametri yazılımları, çoklu görünüm görüntülerini kullandığı için kullanışlı ve kolaylık sağladığı söylenebilir. Ancak, bitki ve ağaçların fotogrametrisi zorlayıcı olabilir çünkü benzer dokuların tekrarı, düşük kaliteli sonuçlara veya 3B yeniden yapılandırmanın başarısız olmasına yol açabilir. Bu nedenle, yüksek verimli fenotipleme için 3B modellerin daha iyi ve daha hızlı yeniden yapılandırılmasını sağlamak amacıyla bazı çalışmalar, çoklu görünüm görüntüleme sistemlerinin geliştirilmesi veya uygun görüntülerin seçilmesi konusunda çözümler önermektedir.

4.2. 3B Modelleme ve Fotogrametrinin Peyzaj Mimarlığındaki Geleceği

Peyzaj mimarlığında üç boyutlu bitki modellerinin kullanımı, teknolojik gelişmelerle birlikte önemli bir evrim geçirmiştir. Teknolojinin ilerlemesi, peyzaj mimarlığında 3B modelleme ve sanal gerçeklik uygulamalarının entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Tasarım tanımlarında yer alan "değişim" ve "geliştirme" gibi eylem terimlerinin kullanımı, bu süreci somut sonuçlara yol açan bir dönüşüm olarak tanımlar ve üretken bir biçimde şekillendirir (Boradkar, 2014). Mimarlık, içerisinde önemli insan müdahalesini barındıran bir alan olarak ele alınırken, peyzaj planlaması ise daha az insan müdahalesiyle şekillenen, büyük ölçüde doğal sistemlerin öne çıktığı bir alan olarak tanımlanmaktadır (Guo & Yang, 2013). Sayısal simülasyon yazılımlarının peyzaj mimarlığı uygulamalarında kullanımının yaygınlaşması, zamanla artan bir eğilim göstermiştir (Lange, 2011; Orland vd., 2001) ve bu süreç, 3B simülasyon ve sanal gerçeklik (VR) uygulamalarının gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Sayısal peyzaj görselleştirmelerinin başlangıcı, peyzaj planlama ve tasarımının erken dönemlerine denk gelmektedir (Lange, 2011). O zamandan bu yana, peyzaj VR uygulamaları, saha planlaması, peyzaj restorasyonu, parklar ve rekreasyon alanları, yeşil altyapı planlaması, konut peyzajları ve diğer birçok alanda, mesleğin çeşitli dallarında ilerlemelere katkıda bulunmuştur (Lange, 2011).

Peyzaj mimarlığında fotogrametrinin kullanımı, basit modelleme görevlerinin ötesine geçebilir ve çevresel özelliklerin karmaşık simülasyonlarını içerebilir. Örneğin, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve fotografik haritalama sistemleriyle peyzaj mimarlarına, farklı peyzaj bileşenlerinin çeşitli koşullar altında nasıl etkileşimde bulunduğuna dair içgörüler sunar (Edelman vd., 2023; Popescu vd., 2017). Dahası, fotogrametri ve diğer teknolojilerin, örneğin CBS entegrasyonu, peyzaj analizine çok boyutlu bir yaklaşım sunar ve peyzajdaki mekânsal dağılımları, desenleri ve ilişkileri daha derinlemesine anlamaya olanak tanır (O'Driscoll, 2018; Sánchez vd., 2022). Peyzaj mimarlığında sanal gerçeklik kullanımının en belirgin özelliği VR ile Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (CBS) entegrasyonudur (Duymuş, 2025). Bu entegrasyon, CBS tabanlı modelleme ile gerçekçi bir peyzajın temsili arasındaki bağlantıyı kurarak birkaç yıl boyunca yaşanabilecek zamansal değişimlerini görselleştirmeye imkân tanır (Ghadirian & Bishop, 2008). Sanal peyzaj tasarımı, bitkiler, dallar, çiçekler, yapraklar gibi unsurların ayrıntılı bir şekilde gösterilmesini gerektiren botanik açıdan gerçekçi bir bitki örtüsünü içermelidir. Bu unsurların detaylı bir ölçekte yürüyüş simülasyonunu oluşturmak, gelişmiş teknolojilerin yanı sıra yüksek teknik beceriler ve insan algısına dair derin bir anlayış geliştirilmesini zorunlu kılar (Honjo & Lim, 2001; Ware, 2013). Sayısal araçlar hızla gelişmekte olup, yakın gelecekte peyzaj mimarlığı alanında önemli ilerlemeler kaydedileceği açıktır. Gelecekte, peyzaj mimarlığı alanında en yeni araçlarla desteklenen eğitim odaklı sayısal araç programlarına ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (Mengots, 2016).

5. Fotogrametri, 3B Modelleme ve Etkileşimli Deneyimler: Sanal Gerçeklik

Sanal gerçeklik teknolojileri pek çok farklı alanda hizmet sunmaktadır. Sanal" terimi, gerçeklikte fiziksel olarak var olmayan, ancak dijital ortamda veya zihinde bir karşılığı olan şeyleri ifade eder. Mikro-coğrafyayı oluşturan kıvrımlar gibi, sanal kavramlar da zihinsel süreçler ve dijital yansımalar aracılığıyla varlık bulur. Sanal olan, bir yansımanın veya temsilin ürünü olarak kendini gösterir (Güzel, 2015). Gelişen teknolojilerin bir diğer etkisi, sanal dünyaların algılanması mimarlık ve peyzaj mimarlığı da dahil olmak üzere birçok farklı disiplinin işleyişinde kullanılmaktadır.

Sanal gerçeklik, kullanıcıların 3B bir ortamda hareket edebileceği ve farklı açılardan gözlemleyip etkileşimde bulunabileceği bir deneyim olarak tanımlanabilir. Ayrıca, 2B 360 derece fotoğraflar veya render görüntülerinin yanı sıra, kullanıcının tamamen içine daldığı (immersive) 3B simülasyonlar da sanal gerçeklik olarak kabul edilebilir.

Sanal gerçekliğin temel amacı, kullanıcıya bilgisayar tarafından üretilen nesnelerle ve varlıklarla etkileşime girme fırsatı sunarak, gerçeklik algısını yaratmaktır (Barcelo, 2007).

Bilişim teknolojileri, özellikle mimarlık alanında giderek daha fazla kullanılmakta ve sayısal miras (digital heritage/new heritage) gibi alt dallarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu gelişmeler, mimari tasarım süreçlerinde disiplinler arası çalışmalara zemin hazırlamış ve mimarlık pratiğine yeni bir boyut kazandırmıştır (Varinlioğlu, 2020). 3B modelleme ise, mimari tasarım ve yapı bilgisi araştırmalarının temel unsurlarından biri olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, sayısal deneyimler ve sanal gerçeklik, mimarlık alanında daha derinlemesine analiz ve simülasyon imkânı sağlayarak, bilgisayar mühendisliği disiplindeki alt alanlarla güçlü bir ilişki kurmaktadır (Kalay vd., 2008). Sanal gerçeklik, kullanıcıları sayısal olarak oluşturulmuş bir ortamda etkileşimde bulunmaya davet eden bir deneyim sunar. Mimarlıkta bu teknoloji, binaların tamamlanmadan önce nasıl görüneceği hakkında bir ön izleme yapma fırsatı sağlar. Peyzaj mimarlığı alanında ise sanal gerçeklik, belirli bir bölgenin gelecekteki ekolojik yapısı, altyapısı ve çevresel düzenlemelerini simüle ederek gerçek zamanlı bir analiz imkânı sunar. Fotogrametri ile elde edilen detaylı 3B modellerin sanal gerçeklik platformlarına entegre edilmesi, eğitim, restorasyon ve planlama alanlarında da yenilikçi bir dönüşüm sağlamaktadır. Tarihi alanların sanal turlar aracılığıyla deneyimlenmesi, özellikle turizm ve eğitim gibi sektörlerinde büyük bir potansiyele sahiptir.

Fotogrametri ile elde edilen detaylı 3B modellerin (genellikle yoğun nokta bulutları veya yüksek poligon sayılı ağ modelleri- mesh) VR ortamlarında doğrudan kullanılabilmesi için genellikle ek işlem adımları ve optimizasyonlar gerektirir. Fotogrametri yazılımları (örneğin Agisoft Metashape, RealityCapture) genellikle çıktılarını .obj, .fbx, .ply gibi yaygın 3B dosya formatlarında verirler. Ancak bu ham modeller, milyonlarca poligondan oluşabildiği ve büyük doku haritaları içerebildiği için VR sistemlerinin gerektirdiği gerçek zamanlı (real-time) işleme performansını sağlamakta yetersiz kalabilirler.

Bu nedenle, modellerin VR'a entegrasyonu öncesinde optimizasyon kritik öneme sahiptir. Bu süreçte yaygın olarak şu adımlar izlenir:

- Poligon Sayısının Azaltılması: Modelin görsel kalitesini mümkün olduğunca koruyarak poligon sayısını azaltmak için 'decimation' (seyreltme) veya daha kontrollü bir yaklaşım olan 'retopology' (yeniden topoloji oluşturma) teknikleri kullanılır. Bu işlem, modelin VR motorları tarafından daha akıcı işlenmesini sağlar.
- Doku Optimizasyonu: Fotogrametride sıklıkla çok sayıda ve yüksek çözünürlüklü doku haritası üretilir. VR için bu dokuların boyutları küçültülebilir, formatları (örn. JPEG, PNG yerine sıkıştırılmış formatlar) optimize edilebilir ve 'texture baking' veya 'atlaslama' yöntemleriyle birden fazla doku tek bir haritada birleştirilerek 'draw call' sayısı azaltılabilir.
- LOD (Level of Detail) Oluşturma: Özellikle geniş peyzaj alanlarında, kameranın uzaklığına göre modelin farklı detay seviyelerini (daha az poligonlu versiyonlarını) göstermek, performansı önemli ölçüde artırır.

Optimize edilen modeller, VR deneyimini oluşturmak için kullanılan oyun motorlarına (örneğin Unreal Engine, Unity) veya mimari görselleştirme odaklı gerçek zamanlı platformlara (örneğin Twinmotion, Enscape) aktarılır. Bu platformlara veri aktarımında, endüstri standardı haline gelen ve meta verileri (animasyon, materyal bilgisi vb.) iyi taşıyan .fbx formatı veya özellikle web ve mobil platformlar için optimize edilmiş, modern ve esnek .gltf / .glb formatları sıklıkla tercih edilir. Bu motorlar ve platformlar, optimize edilmiş 3B modelleri alıp, ışıklandırma, materyal atamaları, etkileşim mekanikleri ve VR başlıkları (örn. Oculus Quest, HTC Vive, HP Reverb) ile uyumluluk gibi ayarları yaparak sürükleyici sanal deneyimi oluşturur.

5.1. Sanal Gerçeklik ve Dijital İkiz

Günümüzde dijital ikiz teknolojisi, fiziksel nesneleri ve süreçleri gerçek zamanlı olarak izlemek ve simüle etmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntem, fiziksel dünyadaki öğelerin sanal bir kopyasını oluşturarak, onların davranışlarının dijital ortamda gözlemlenmesine ve analiz edilmesine olanak tanır. Böylece kullanıcılar nesnelerin güncel durumlarını ve performanslarını anlık olarak takip edebilmekte, olası sorunları ise önceden tespit edebilmektedir. Sanayi üretiminden akıllı şehir yönetimine kadar pek çok alanda etkin şekilde kullanılan bu teknoloji, mekânsal analiz ve tasarım süreçlerine de yeni olanaklar sunmaktadır (Duman, 2022).

Teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte 3B mekânsal ve sayısal verilerin üretimi mümkün hale gelmiş, bu verilerin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından anlaşılabilirliği sağlanmıştır. 2B çizimlere kıyasla algıyı büyük ölçüde artıran bu gelişme, 3B kent modellerine olan ilgiyi hızla artırmıştır. 3B kent modelleri; binalar, yollar ve diğer yapay unsurların geometrik bileşenlerini dijital ortamda temsil eden ve kentsel mekânın bütüncül bir şekilde görselleştirilmesine olanak sağlayan modellerdir (Şekil 10). Literatürde bu modeller için farklı terimler bulunsun da en yaygın kullanılan kavramlar “Sanal Şehir” ve “Dijital Şehir”dir.



Şekil 9. Sanal gerçekliği tanımlayan görsel (TİNT Mimarlık, 2021)

Dijital ikiz, fiziksel bir varlık, süreç, sistem veya çevrenin dinamik bir sanal temsildir ve gerçek dünyadaki karşılığıyla benzer şekilde çalışır. Bu, bir ürünün, nesnenin, çevrenin, sürecin veya hizmetin sanal bir modelini ifade eder (Grieves, 2019). Dijital ikiz, gerçek dünya ürünüyle karşılaştığında, olası performans sonuçları ve potansiyel sorunlar önceden tahmin edilebilmektedir (Qi vd., 2021). Dijital ikizler, fiziksel dünyadaki varlıkların hareketlerini, kuvvetlerini ve etkileşimlerini sanal ortamda temsil eden modellerdir. Bu, kullanıcıların üç boyutlu ve gerçek zamanlı olarak eylemlerine yanıt veren dinamik içeriklerle etkileşime girmelerini sağlar (Tuegel vd., 2021). Bu bağlamda, sanal ortamda gerçek dünya koşulları, olasılık senaryoları ve çeşitli durumlar etkili bir şekilde simüle edilebilir; sonuçlar ise mobil cihazlar, bilgisayarlar ve artırılmış, karmaşık ya da sanal gerçeklik platformlarında anında görselleştirilebilir (Yiğit & Uysal, 2023). Deng vd., (2021) dijital ikiz kavramını şu özelliklerle tanımlamaktadır:

- Fiziksel nesnelerin mikro düzeyden makro düzeye kadar tüm verilerini bir araya getirir.
- Fiziksel ürünün yaşam döngüsü boyunca var olur, gelişir ve sürekli olarak bilgi toplar.
- Fiziksel nesnelerin tanımlanmasını ve optimize edilmesini sağlar.

Bu bağlamda dijital ikiz, üç boyutlu modelleme ve sensörler kullanarak sayısal temsiller oluşturan, fiziksel varlıkların sayısal kopyaları olarak tanımlanabilir.

Sanal gerçeklik, bilgisayarlar aracılığıyla oluşturulan, kullanıcıya gerçekmiş gibi bir deneyim sunan ve dinamik bir ortamda karşılıklı etkileşim olanağı sağlayan bir simülasyon modelidir (Şekil 17), (Bayraktar & Kaleli, 2007). Sherman ve Craig (2003), sanal gerçekliği, etkileşimli bilgisayar tabanlı simülasyonlardan oluşan, katılımcının konum ve hareketlerini algılayan, bir ya da daha fazla duyunun geri bildirimini değiştiren veya güçlendiren ve kullanıcının simülasyona ait bir dünyada olduğunu hissettiren bir ortam olarak tanımlamıştır.

5.2. Sanal Gerçekliğin Peyzaj Mimarlığında Kullanımı

Peyzaj mimarlığının çok yönlü ve çeşitli yapısı, disiplinler arası bilgi paylaşımını teşvik ederek, bilgi ve iletişim teknolojilerinin mimarlık alanında yeni kavramların ve değişimlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu teknolojiler, sadece sunum ve görselleştirme değil, aynı zamanda yaratıcı tasarımların oluşturulması ve ifade edilmesinde de önemli bir destekleyici rol oynamaktadır (Adanır, 2023). Sanal gerçeklik peyzaj mimarisinde;

- Özgün düşünebilme,
- Yeni çözümlere ulaşabilme,
- Üç boyutlu düşünebilme,
- Tasarım süreci ve görselleştirme (Adanır, 2023).

Sanal gerçeklik, tasarım sürecinde teknolojik araçlar kullanarak yaratıcı düşüncelerle yeni tasarımların ortaya çıkmasını sağlar. 3B görseller sayesinde, alanla ilgili daha ayrıntılı bilgi edinilir ve tasarım süreci boyunca sayısal ortamda yaratıcı sonuçlar elde edilir. Bu nedenle, sanal gerçeklik tasarım sürecinde yalnızca nihai modelin bir sonucu değil, tasarımcıların düşüncelerinin ve zihinsel süreçlerinin bir parçası olarak baştan sona kadar etkileşimde bulunan bir araçtır (Şekil 11) (Kaya & Özlü, 2022).

Peyzaj Mimarlığı



Şekil 10. Sanal gerçeklik kullanımının peyzaj mimarlığı için oluşturulmuş özet tablosu (Portman vd. (2015)'den esinlenilmiştir)

6. Sonuç ve Öneriler

Sanal gerçeklik ve 3B modelleme teknolojileri, peyzaj mimarlığı tasarım süreçlerinde yenilikçi yaklaşımlar sunmakla birlikte, bu teknolojilerin uygulanmasında çeşitli sınırlamalar ve zorluklar da gözlemlenmektedir. Öncelikle, sanal gerçeklik uygulamalarının doğal peyzaj unsurlarını tam anlamıyla taklit edebilme kapasitesi, özellikle detaylı ağaçlar, çalılar ve diğer bitki örtüsü gibi karmaşık modellerin oluşturulmasındaki maliyet ve zaman gereksinimleri açısından tartışmalıdır. Bu durum, peyzaj tasarımcılarının, doğal manzaraların sayısal temsillerini kullanma konusundaki eğilimlerini sınırlandırabilmektedir.

Fotogrametri ve 3B modelleme teknolojilerinin uygulanabilirliği, büyük ölçüde gerekli teknik donanım ve yazılımın erişilebilirliğine bağlıdır. Özellikle küçük ölçekli veya bütçe kısıtlamalarına sahip projelerde, yüksek kaliteli modelleme süreçlerinin yüksek maliyetleri ve zaman alıcı doğası, bu teknolojilerin yaygın kullanımını kısıtlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, fotogrametri verilerinin doğruluğu ve kalitesi, kullanılan ölçüm araçlarının hassasiyetine ve veri toplama yöntemlerine bağlıdır. Karmaşık doğal peyzaj unsurlarının doğru bir şekilde modellenmesi, yüksek çözünürlükte çoklu görüş açıları gerektirirken, bu gerekliliklerin yerine getirilmesi her zaman mümkün olamamaktadır. Ayrıca, bu teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi, teknik bilgi ve uzmanlık gerektirmektedir. Tasarım ekiplerinin yeterli teknik donanıma ve eğitime sahip olmaması, süreçlerin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, bu yenilikçi teknolojilerin mevcut tasarım süreçlerine entegrasyonu ve kullanıcıların adaptasyon süreçleri de önemli bir zorluk olarak ortaya çıkmaktadır.

Sanal gerçekliğin peyzaj mimarlığında kullanımı, Bölüm 5.2'de belirtilen genel faydaların ötesinde, tasarımcının ve paydaşların karar alma süreçlerine doğrudan ve derinlemesine etki eden önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel 2B çizimler veya ekran tabanlı 3B modeller, mekanın gerçek ölçeğini, atmosferini ve üç boyutlu ilişkilerini tam olarak aktarmada yetersiz kalabilirken, VR kullanıcıyı tasarımın içine sokarak mekansal algıyı kökten değiştirir. Peyzaj mimarı için VR'ın karar alma sürecine temel katkıları şunlardır:

- **Ölçek ve Oran Deneyimi:** Tasarımcı, önerilen bir yapının, bitki grubunun veya oturma alanının gerçek boyutlarını ve çevresiyle olan oranını yerinde deneyimleyebilir. Bu, özellikle bitkilerin olgun boyuttaki hacimsel etkilerini veya yürüme yollarının yeterli genişlikte olup olmadığını değerlendirmede kritik öneme sahiptir. Yanlış ölçeklendirmeden kaynaklanan hatalar erken aşamada fark edilebilir.
- **Mekansal İlişkiler ve Görsel Analiz:** Farklı noktalar arasındaki görsel bağlantıları (vista, sightline), kapalılık/açıklık hissini, mahremiyet düzeyini ve mekanlar arası geçişleri VR içinde yürüyerek veya farklı noktalardan bakarak analiz etmek mümkündür. Bu, alanın kullanım senaryolarını ve kullanıcı deneyimini optimize etmede yardımcı olur.
 - **Atmosfer ve Malzeme Değerlendirmesi:** Farklı ışık koşulları (gün doğumu, öğlen, gün batımı, gece aydınlatması), mevsimsel değişimler veya farklı hava koşulları VR'da simüle edilebilir. Bu, seçilen malzemelerin dokusunun, renginin ve ışık altındaki görünümünün, bitki renk ve formlarının yaratacağı atmosferin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Malzeme ve bitki paleti kararları daha sağlam temellere oturtulur.
 - **Tasarım Alternatiflerinin Hızlı Değerlendirilmesi:** Farklı tasarım seçenekleri (örn. farklı zemin kaplamaları, farklı bitki düzenlemeleri, farklı donatı elemanları) VR ortamında kolayca değiştirilip anında

deneyimlenebilir. Bu, 'ya şöyle olsaydı?' sorusunun cevabını görsel ve mekansal olarak almayı sağlayarak daha verimli bir iterasyon süreci sunar.

- Paydaş İletişimi ve Katılım: VR, teknik çizimleri okumakta zorlanan müşterilere veya diğer paydaşlara tasarım fikrini en etkili şekilde aktarma yöntemlerinden biridir. Tasarımı 'deneyimlemek', soyut planlara bakmaktan çok daha etkilidir, geri bildirimlerin daha net olmasını sağlar, ortak bir anlayış oluşturur ve onay süreçlerini hızlandırabilir.

Sonuç olarak sanal gerçeklik, peyzaj mimarına sadece bir görselleştirme aracı değil, aynı zamanda tasarımı test etme, analiz etme ve kritik kararları daha yüksek bir güvenle alma imkanı sunan deneyimsel bir prototipleme platformu sağlar. Bu da projenin nihai kalitesini ve kullanıcı memnuniyetini artırma potansiyeli taşır.

Sanal gerçeklik teknolojilerinin peyzaj tasarımında önemli bir rolü de insan deneyimlerini simüle etme kapasitesidir. İnsanların doğal çevrelerle olan etkileşimlerini gerçekçi bir şekilde yansıtmaya yeteneği, sanal gerçeklik uygulamalarının başarısını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Bunun yanı sıra, fotogrametri ve 3B modelleme süreçleri, otomasyon ve yapay zeka gibi ileri teknolojilerle sürekli gelişim göstermektedir. Bu tür yenilikler, hem mevcut sınırlamaların aşılmasını sağlayacak hem de tasarım süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirecek potansiyel taşımaktadır.

Sonuç olarak, sanal gerçeklik ve fotogrametri teknolojileri, peyzaj mimarlığı tasarım süreçlerinde hem yaratıcı hem de işlevsel olanaklar sunarken, bunların etkili bir şekilde uygulanabilmesi için teknik bilgi, kaynak erişimi ve kullanıcı adaptasyonunun önemi büyüktür.

Bu doğrultuda, gelecekteki uygulamalar ve araştırmalar için bazı somut öneriler geliştirilmesi gereklidir:

- Peyzaj mimarlığı lisans ve yüksek lisans programlarına, VR destekli tasarım ve fotogrametri modüllerinin entegre edilmesi sağlanmalıdır. Böylece tasarımcı adayları bu teknolojilere daha erken aşamada adapte olabilir.
- Kamuya açık park, meydan ve rekreasyon alanı projelerinde artırılmış gerçeklik (AR) ve sanal gerçeklik (VR) destekli sunumlar teşvik edilmelidir. Bu sayede halkın ve karar vericilerin tasarımları deneyimleyerek geri bildirimde bulunmaları sağlanabilir.
- Fotogrametri ve 3B modelleme süreçlerinde kullanılan donanım ve yazılımlar için daha erişilebilir, düşük maliyetli ve kullanıcı dostu çözümler geliştirilmesi desteklenmelidir.
- Tasarım büroları ve belediyeler için kısa süreli VR ve fotogrametri teknik eğitimleri düzenlenmeli, mevcut çalışanların da bu süreçlere uyumu artırılmalıdır.
- Projelerde tasarım alternatifi değerlendirme süreçlerinin VR ortamında yürütülmesi için prototip uygulamalar ve örnek çalışma raporları hazırlanmalıdır.

Bu tür somut adımlar, yeni teknolojilerin peyzaj tasarım süreçlerine entegrasyonunu hızlandıracak ve projenin hem tasarım kalitesi hem de kullanıcı memnuniyeti açısından daha başarılı sonuçlar doğurmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Adanır, İ. (2023). *Peyzaj mimarlığında sanal gerçekliğin kullanımı* [Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Andújar, D., Calle, M., Fernández-Quintanilla, C., Ribeiro, Á., & Dorado, J. (2018). Three-dimensional modeling of weed plants using low-cost photogrammetry. *Sensors*, 18(4), Article 1077. <https://doi.org/10.3390/s18041077>
- An, P., Fang, K., Jiang, Q., Zhang, H., & Zhang, Y. (2021). Measurement of rock joint surfaces by using smartphone structure-from-motion (SfM) photogrammetry. *Sensors*, 21(3), Article 922. <https://doi.org/10.3390/s21030922>
- Avşar, E. Ö. (2006). *Tarihi köprülerin dijital fotogrametri tekniği yardımıyla modellenmesi* [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Barceló, J. A. (2007). Automatic archaeology: Bridging the gap between virtual reality, artificial intelligence, and archaeology. In F. Cameron & S. Kenderdine (Eds.), *Theorizing digital cultural heritage: A critical discourse* (pp. 437–455). MIT Press.
- Bayraktar, E., & Kaleli, F. (2007, 3 Ocak – 2 Şubat). *Sanal gerçeklik ve uygulama alanları* [Bildiri sunumu]. Akademik Bilişim'07 - IX. Akademik Bilişim Konferansı, Kütahya, Türkiye.
- Benliay, A., & Akbiyik, İ. E. (2016). 3D modelling creating tool for landscape design: Camera. *Digital Landscape Architecture*, 2016, 237–244.
- Bilgi, S. (2007). Fotogrametri ve uzaktan algılamada veri elde etme yöntemlerinin gelişimi ve kısa tarihçeleri. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 96, 48–55.
- Boradkar, P., & Dhadphale, T. (2014). *Visual research methods in the design process*. SAGE Publications.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). *Structure from motion in the geosciences*. John Wiley & Sons.
- Carvajal-Ramírez, F., Navarro, A., Agüera-Vega, F., Martínez-Carricondo, P., & Mancini, F. (2019). Virtual reconstruction of damaged archaeological sites based on unmanned aerial vehicle photogrammetry and 3D modelling: Study case of a southeastern Iberia production area in the Bronze Age. *Measurement*, 136, 225–236.

- Ceylani, M. U., & Yavuz, U. G. (2023). Fotoğrafik modelleme: Fotogrametri tekniği ile video oyunlarında nesne-sahne tasarımı. *EKEV Akademi Dergisi*, 93, 342–358.
- Cova, G., Prichard, S., Rowell, E., Drye, B., Eagle, P., Kennedy, M., ... & Nemens, D. (2023). Evaluating close-range photogrammetry for 3D understory fuel characterization and biomass prediction in pine forests. *Remote Sensing*, 15(19), Article 4837. <https://doi.org/10.3390/rs15194837>
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125–134.
- Dilek, N. (2022). Investigation of user views and experiences on virtual reality technology used in recreation businesses. *GSI Journals Serie A: Advancements in Tourism Recreation and Sports Sciences*, 5(2), 204–222.
- Duman, M. Ç. (2022). İşletmeler için yeni bir verimlilik teknolojisi: Dijital ikiz. *Verimlilik Dergisi*, 2022, 189–206. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.981349>
- Duymuş, H. Coğrafi Bilgi Sistemleri'nin (CBS) Peyzaj Mimarlığı Öğretiminde Kullanımının Önemi ve Gerekliliği. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies*, 8(1), 98–111.
- Edelman, H., Rosén, L., Nyman, E., & Leskinen, P. (2023). Integrating aerial and 3D data into a data-driven decision-making workflow for nature-based stormwater solutions. *Buildings*, 13(12), Article 2983. <https://doi.org/10.3390/buildings13122983>
- Fan, J., Dai, W., Wang, B., Li, J., Yao, J., & Chen, K. (2023). UAV-based terrain modeling in low-vegetation areas: A framework based on multiscale elevation variation coefficients. *Remote Sensing*, 15(14), Article 3569. <https://doi.org/10.3390/rs15143569>
- Fărcaș, R., Naș, S., Rădulescu, M., Vereș, I., & Bondrea, M. (2023). The use of UAVs to obtain necessary information for flooding studies: The case study of Somes River, Floresti, Romania. *Applied Sciences*, 13(21), Article 11688. <https://doi.org/10.3390/app132111688>
- Fidan, Ş., & Ulvi, A. (2022). Tarsus Aziz Pavlus Kilisesinin yersel lazer tarama teknikleri ile üç boyutlu modelinin oluşturularak sanal gerçekliğe hazırlamanın değerlendirilmesi. *Turkey Lidar Journal*, 4(2), 60–70. <https://doi.org/10.51946/melid.1206504>
- Ghadirian, P., & Bishop, I. D. (2008). Integration of augmented reality and GIS: A new approach to realistic landscape visualization. *Landscape and Urban Planning*, 86(3–4), 226–232.
- GRAFİK101. (2024). 3DF Zephyr Fotogrametri – Fotograftan 3D Modele [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=tU8S4j9BHRw>
- Grieves, M. W. (2019). Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. In S. Flumerfelt, K. G. Schwartz, D. Mavris & S. Briceno (Eds.), *Complex systems engineering: Theory and practice* (pp. 175–200). American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Guo, X., & Yang, G. (2013). Animating prairie simulation with shell method in real time. *Journal of Software*, 8(12), 3166–3172.
- Güzel, M. (2015). *Halüsinasyon Mekânları: Sanal-Gerçek Arasında Mimarlık* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>.
- Honjo, T., & Lim, E. M. (2001). Visualization of landscape by VRML system. *Landscape and Urban Planning*, 55(3), 175–183.
- Isokane, T., Okura, F., Ide, A., Matsushita, Y., & Yagi, Y. (2018, June 18–23). Probabilistic plant modeling via multi-view image-to-image translation. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, UT, USA.
- Jäger-Klein, C., Kodžoman, E., & Stampfer, L. (2023). Secondary data collection and heritage documentation: Case study of a remote documentation of Travnik's Varoška Mosque. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, 751–757.
- Kahveci, A., & Sondaş, A. (2023). Eğitimde sanal gerçeklik teknolojisine genel bakış. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 6–13. <https://doi.org/10.53410/koufbd.1134394>
- Kalay, Y. E., Kvan, T., & Affleck, J. (2008). *New heritage: New media and cultural heritage*. Routledge.
- Kaya, M., & Özlü, Z. K. (2022). Yanık nedeniyle tedavi gören hastalarda yenilikçi teknoloji: sanal gerçeklik. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 31(1), 46–51.
- Kılınçoğlu, D. B. (2016). *Farklı insansız hava araçları ile elde edilen görüntülerin otomatik fotogrametrik yöntemlerle değerlendirilmesi ve doğruluk analizi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Kong, L., Chen, T., Kang, T., Chen, Q., & Zhang, D. (2023). An automatic and accurate method for marking ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 278–290. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3224543>
- Kronig, S., Kronig, O., Vrooman, H., & Adrichem, L. (2022). Classification of skull shape deformities related to craniosynostosis on 3D photogrammetry. *Journal of Craniofacial Surgery*, 34(1), 312–317.

- Küçükkara, M., Özacar, K., & Ortakçı, Y. (2024). Mimarlık öğrencilerinin sanal gerçeklik ortamında Safranbolu Tabakhanesi'nde röleve alma deneyimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 36(1), 35–47. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1322782>
- Külür, S. (2002). *Fotogrametri ders notları* (Basılmamış ders notları). İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Kurum, E., & Çabuk, A. (1998, 26–28 Kasım). *Peyzaj mimarlığında bilgisayardan yararlanma olanakları* [Bildiri sunumu]. Çevre Planlama ve Tasarımına Bütüncül Yaklaşım Sempozyumu, Ankara, Türkiye.
- Lange, E. (2011). 99 volumes later: We can visualise. Now what? *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 403–406.
- Lerma, J. L., & Garcia, A. (2004, October 25–27). *3D city modelling and visualization of historic centers* [Workshop presentation]. International Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres, Lisbon, Portugal.
- Livny, Y., Yan, F., Olson, M., Chen, B., Zhang, H., & El-Sana, J. (2010). Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds. *ACM Transactions on Graphics*, 29(6), Article 151. <https://doi.org/10.1145/1866158.1866177>
- Li, Z., Wu, B., Liu, W., Chen, L., Li, H., Dong, J., ... & Dong, J. (2022). Photogrammetric processing of Tianwen-1 HiRIC imagery for precision topographic mapping on Mars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, Article 4601916. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3194081>
- Luo, J., Lei, Z., & Cao, L. (2020). Visual simulation method of runoff in landscape space based on UAV tilt photography. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 249, 363–373.
- Marangoz, A. M. (2012). *Fotogrametri-II ders notları* [Ders notları]. Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak.
- Mengots, A. (2016). Review of digital tools for landscape architecture. *Scientific Journal of Latvia University of Agriculture: Landscape Architecture & Art*, 8(8), 72–77.
- Mondino, E., Petris, S., Sarvia, F., Momo, E., Sussio, F., & Pari, P. (2022). Adoption of digital aerial photogrammetry in forest planning: A case study of Canavese Forestry Consortium, NW Italy with technical and economic issues. *Land*, 11(8), Article 1350. <https://doi.org/10.3390/land11081350>
- Nishanbaev, I. (2020). A web repository for geolocated 3D digital cultural heritage models. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, Article e00139. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00139>
- O'Driscoll, J. (2018). Landscape applications of photogrammetry using unmanned aerial vehicles. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 22, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.09.010>
- Okura, F. (2022). 3D modeling and reconstruction of plants and trees: A cross-cutting review across computer graphics, vision, and plant phenotyping. *Breeding Science*, 72(1), 31–47.
- Orland, B., Budthimedhee, K., & Uusitalo, J. (2001). Considering virtual worlds as representations of landscape realities and as tools for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 54(1–4), 139–148.
- Özeren, E., Tosunoğlu, E., Pekyürek, M., Seyhan, N., & Yılmaz, F. (2021). Virtual reality studies in education: Analysis of trends in current research. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 21(2), 390–401.
- Popescu, D., Ichim, L., & Stoican, F. (2017). Unmanned aerial vehicle systems for remote estimation of flooded areas based on complex image processing. *Sensors*, 17(3), Article 446. <https://doi.org/10.3390/s17030446>
- Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 376–384.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... & Nee, A. Y. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3–21.
- Sánchez, J., Franco, P., & Plata, A. (2022). Achieving universal accessibility through remote virtualization and digitization of complex archaeological features: A graphic and constructive study of the Columbarios of Mérida. *Remote Sensing*, 14(14), Article 3319. <https://doi.org/10.3390/rs14143319>
- Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2003). *Understanding virtual reality*. Morgan Kaufman.
- Szostak, R., Pietroń, M., Wachniew, P., Zimnoch, M., & Cwiakała, P. (2024). Estimation of small-stream water surface elevation using UAV photogrammetry and deep learning. *Remote Sensing*, 16(8), Article 1458. <https://doi.org/10.3390/rs16081458>
- Şenol, H. İ., & Kaya, Y. (2019). İnternet tabanlı veri kullanımıyla yerleşim alanlarının modellenmesi: Çiftlikköy Kampüsü örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 11–16.
- TİNT Mimarlık. (2021, 12 Temmuz). *Mimarlıkta sanal gerçeklik teknolojisi*. <https://www.tintmimarlik.com/mimaride-sanal-gerceklik-teknolojisi/>
- Toprak, A. S. (2014). *Fotogrametrik tekniklerin insansız hava araçları ile mühendislik projelerinde kullanılabilirliğinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Tuegel, E. J., Ingrassia, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, Article 154798. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>

- Ware, C. (2019). *Information visualization: Perception for design*. Morgan Kaufmann.
- Uçar, E., & Ergün, B. (2004). Fotogrametride üç boyutlu şehir modelleme teknikleri ve CBS kullanımı. *Harita Dergisi*, 132, 48–56.
- Uslu, A. (2021). Fotogrametri tekniğine dayalı üç boyutlu baskı uygulaması: Leblebi Anıtı örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 46–52.
- Uysal, T. (2023). Üç boyutlu dijital imge üretim yöntemleri bağlamında fotogrametri. *Ulakbilge Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(82), 249–266.
- Uzun, Ö. F. (2015). *Fotoğraf yardımı ile 3 boyutlu ağaç modellenmesi* [Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Varinlioğlu, G. (2020). Teos üzerinden dijital mirasta sanal gerçeklik uygulamalarını anlamak. *Megaron*, 15(1), 161–170.
- Mırdan, O., & Yakar, M. (2017). Tarihi eserlerin İnsansız Hava Aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. *Geomatik*, 2(3), 118–125.
- Yıldırım, M. T. (2004). Mimari tasarımda biçimlendirme yaklaşımları ile bilgisayar yazılımları ilişkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(1), 59–71.
- Yılmaz, A. A. (2011). *Peyzaj mimarlığında bilgisayar kullanımı* [Yüksek lisans tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2021). Tarihi eserlerin 3B modellenmesi ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 1032–1043. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1011064>.
- Yiğit, A. Y., & Uysal, M. (2023). Dijital ikizlerin geliştirilmesinde fotogrametrinin kullanımı ve artırılmış gerçeklik ile görselleştirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1372–1384.
- Yusuf, A. (2022). *Plant photogrammetry – Reality Capture* [Video]. <https://www.youtube.com/watch?v=lcOsIblboYI>
- Zube, E. H., Simcox, D. E., & Law, C. S. (1987). Perceptual landscape simulations: History and prospect. *Landscape Journal*, 6(1), 62–80. <https://doi.org/10.3368/lj.6.1.62>