



Türkiye Fotogrametri Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tufod>

e-ISSN 2687-6590



Eğik Resim Fotogrametrisi: Kentsel 3B Modellemede Yeni Yaklaşımlar

Hacı Murat Yılmaz^{*1} & Murat Yakar²

^{1*} Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye; (hmyilmaz@aksaray.edu.tr)

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye; (myakar@mersin.edu.tr)



*Sorumlu Yazar:
hmyilmaz@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi

Alıntı: Yılmaz H. M. & Yakar, M. (2025). Eğik Resim Fotogrametrisi: Kentsel 3B Modellemede Yeni Yaklaşımlar. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 7(2), 47-63.

Geliş : 16.10.2025
Revize : 28.10.2025
Kabul : 31.10.2025
Yayınlama : 31.12.2025

Özet

Son yıllarda hızlı kentleşme, kentsel planlama, afet yönetimi, akıllı şehir uygulamaları ve altyapı yönetimi gibi alanlarda detaylı ve güncel 3B kent modellerine olan ihtiyacı önemli ölçüde artırmıştır. Bu bağlamda, eğik resim fotogrametrisi (oblique photogrammetry), geleneksel dikey (nadir) hava görüntülerinin sınırlı kaldığı kentsel ortamlarda öne çıkan bir veri toplama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Eğik görüntüler, bina cepheleri, köprüler, anıtlar ve sokak seviyesindeki unsurlar gibi dikey detayların modellenmesini mümkün kılmakta ve böylece daha gerçekçi ve ayrıntılı 3B kentsel modellerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu derleme çalışması, eğik fotogrametrinin tarihsel gelişimini, temel teknik prensiplerini, veri toplama ve işleme süreçlerini detaylı şekilde ele almaktadır. Ayrıca, modern uygulamalarda kullanılan yeni algoritmalar, çok sensörlü veri entegrasyonu (LiDAR, multispektral ve termal görüntüler) ve yapay zekâ tabanlı otomatik modelleme yaklaşımları tartışılmaktadır. Çalışma, kentsel 3B modellemede eğik fotogrametrinin avantajlarını ve sınırlılıklarını vurgulamakta ve gelecekteki araştırma yönelimleri ile olası teknolojik gelişmelerin önemini irdelemektedir. Sonuç olarak, eğik fotogrametri, günümüz kentsel analiz ve planlama çalışmalarında vazgeçilmez bir araç olarak kabul edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eğik Resim Fotogrametrisi, 3B Modelleme, Kentsel Analiz, İHA, Görüntü İşleme.

Oblique Image Photogrammetry: New Approaches in Urban 3D Modeling

*Corresponding Author:
hmyilmaz@aksaray.edu.tr

Research Article

Citation: Yılmaz H. M. & Yakar, M. (2025). Oblique Image Photogrammetry: New Approaches in Urban 3D Modeling. *Turkish Journal of Photogrammetry*, 7(2), 47-63 (in Turkish).

Received : 14.10.2025
Revised : 21.10.2026
Accepted : 31.10.2025
Published : 31.12.2025

Abstract

In recent years, rapid urbanization has significantly increased the demand for detailed and up-to-date 3D city models in areas such as urban planning, disaster management, smart city applications, and infrastructure monitoring. In this context, oblique photogrammetry has emerged as an effective data acquisition technique, particularly in urban environments where traditional vertical imagery is insufficient. Oblique images enable the modeling of vertical structures, including building facades, bridges, monuments, and street-level details, facilitating the creation of more realistic and detailed 3D urban models. This review comprehensively examines the historical development of oblique photogrammetry, its fundamental technical principles, and the data acquisition and processing workflows. Furthermore, it discusses recent advancements such as novel algorithms, multi-sensor data integration (LiDAR, multispectral, and thermal imagery), and AI-based automatic modeling approaches. The study highlights both the advantages and limitations of oblique photogrammetry in urban 3D modeling and explores future research directions and potential technological developments. Overall, oblique photogrammetry is recognized as an indispensable tool for contemporary urban analysis and planning.

Keywords: Oblique Photogrammetry, 3D Modeling, Urban Analysis, 3D Modelling, Image Processing.

1. Giriş

Fotogrametri, tarih boyunca haritacılık, mühendislik, arkeoloji ve çevresel izleme gibi çeşitli disiplinlerde, görüntülerden geometrik ve tematik bilgi çıkarma amacıyla kullanılan köklü bir bilim dalıdır. Temel olarak, fotogrametri nesnelerin ölçülerini ve konumlarını iki boyutlu görüntülerden çıkararak üç boyutlu modeller oluşturmaya olanak tanır[1,2,3]. Geleneksel hava fotogrametrisi, çoğunlukla nadir (dikey) hava görüntülerine dayanmakta olup, geniş alanlarda arazi yüzeyinin planimetrik ve topografik özelliklerini yüksek doğrulukla temsil etmede etkili olmuştur [4,5,6]. Bununla birlikte, yerel ölekte yapılan çalışmalar için yersel fotogrametri (terrestrial photogrammetry) de önemli bir yöntem olarak kullanılmaktadır [7,8,9]. Yersel fotogrametri, kameraların yer seviyesinden veya tripod üzerinde konumlandırılması ile elde edilen görüntülerden, özellikle yapıların cephe detayları, arkeolojik kalıntılar, köprüler ve diğer dikey yapılar hakkında yüksek çözünürlüklü ve detaylı veriler sunmaktadır [10,11].

Fotogrametrinin kullanım alanları oldukça geniştir. Haritacılık ve kentsel planlamada arazi ve yapısal detayların haritalanmasında, mühendislik ve inşaat projelerinde yapıların ölçümlerinin ve deformasyon analizlerinin yapılmasında, arkeolojide tarihi eserlerin belgelenmesinde ve restorasyon çalışmalarında, çevresel izleme ve doğal afet yönetiminde arazi değişimlerinin incelenmesinde fotogrametri etkin bir şekilde kullanılmaktadır [12-14]. Ayrıca, ormancılık, tarım ve madencilik gibi alanlarda da arazi örtüsü, bitki sağlığı ve yüzey değişimlerinin izlenmesi amacıyla fotogrametri yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu çeşitlilik, fotogrametriyi hem geniş ölçekli hava görüntüleme uygulamalarında hem de küçük ölçekli yersel ve laboratuvar çalışmaları için vazgeçilmez bir araç hâline getirmiştir.

Ancak, kent merkezlerinde özellikle yüksek binaların yoğun olduğu alanlarda, dikey hava görüntüleri bina cephelerinin detaylarını yeterince yakalayamamaktadır. Bu durum, üç boyutlu kent modellemesinde önemli veri eksikliklerine ve mimari elemanlar, anıtlar ve diğer dikey yapıların kaybolmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, fotogrametrinin farklı ölçek ve perspektiflerde kullanımı, sayısal arazi modeli üretiminden, kentsel analiz ve modelleme çalışmalarında doğruluk ve detay açısından kritik öneme sahiptir [15-22].

Bu eksiklikler, özellikle dikey hava görüntülerinin yüksek yapı yoğunluğu olan kent merkezlerinde sınırlı kaldığı durumlarda, eğik resim fotogrametrisinin (ERF) geliştirilmesiyle giderilmeye başlanmıştır [23,24]. ERF, kameranın optik ekseninin düşeyden belirli bir açıyla sapacak şekilde konumlandırılması

prensibine dayanmaktadır ve bu açı genellikle 15° – 45° arasında değişmektedir [25,26]. Bu düzenleme, hem yatay hem de düşey yüzeylerin aynı anda görüntülenmesini mümkün kılarak, geleneksel nadir görüntülerle elde edilemeyen bina cepheleri, köprüler, anıtlar ve şehir içindeki düşey yapılar gibi dikey yapı detaylarının üç boyutlu olarak modellenmesine olanak sağlamaktadır [27-29].

Eğik görüntüleme yöntemi, özellikle yüksek yoğunluklu kentsel alanlarda veri eksikliğini önemli ölçüde azaltmakla kalmayıp, dokusal ve geometrik doğruluk açısından da geleneksel dikey görüntülere kıyasla belirgin avantajlar sunmaktadır [30-33]. Bu avantaj, bina cepheleri ve mimari unsurların daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini mümkün kılarak, karmaşık kentsel alanlarda topoğrafik ve yapısal detayların daha eksiksiz bir biçimde elde edilmesini sağlar. Eğik fotogrametri verileri, üç boyutlu modelleme süreçlerinde hem detay zenginliği hem de ölçüm doğruluğu açısından kritik katkılar sunmakta; mimari analiz, kentsel planlama, altyapı yönetimi, afet yönetimi, kültürel miras belgelenmesi ve sanal şehir uygulamaları gibi çeşitli disiplinlerde yüksek kullanım potansiyeline sahiptir [34,35].

Ayrıca, ERF yönteminin veri işleme süreçlerinde kullanılan gelişmiş algoritmalar ve otomatik modelleme teknikleri, büyük veri setlerinde bile hızlı ve güvenilir sonuçlar üretilebilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, karmaşık kent dokularının üç boyutlu dijital modelleri, hem görsel kalite hem de ölçümsel doğruluk açısından geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir. Sonuç olarak, eğik fotogrametri, günümüz kentsel modelleme çalışmalarında vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmakta ve özellikle çok sensörlü veri entegrasyonu ve yapay zekâ destekli otomatik modelleme yaklaşımları ile birlikte kullanıldığında, kentleşmenin hızla arttığı ortamlarda detaylı ve güvenilir 3B veri üretiminin temelini oluşturmaktadır [36,37].

Günümüzde, eğik fotogrametri verilerinin LiDAR (Light Detection and Ranging) ölçümleriyle entegrasyonu, üç boyutlu kentsel modellemede doğruluk ve detay zenginliğini önemli ölçüde artıran gelişmeler arasında yer almaktadır [17,18]. LiDAR teknolojisi, yoğun nokta bulutu üretme kapasitesi sayesinde özellikle dikey yapılar, karmaşık arazi şekilleri ve engellerin hassas yükseklik bilgilerinin elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır [19,20]. Bu teknolojinin iki temel uygulama biçimi bulunmaktadır: Hava LiDAR sistemleri (Airborne LiDAR), geniş alanlarda yüksek doğruluklu topografik ve kentsel veri elde etmek için kullanılırken; yersel lazer tarayıcılar (Terrestrial Laser Scanning, TLS) ise binaların cepheleri, anıtlar, köprüler ve sokak mobilyaları gibi yer seviyesindeki detayların yüksek çözünürlüklü ve

hassas bir biçimde modellenmesine olanak tanımaktadır [23,25].

Eğik fotogrametri, renk ve doku bilgisi sağlayarak üç boyutlu modelin görselleştirme kalitesini artırmakta ve LiDAR tarafından sağlanan geometrik doğruluğu tamamlamaktadır. Bu çok sensörlü yaklaşım, yalnızca bina cepheleri ve mimari detayların daha güvenilir bir biçimde modellenmesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda altyapı elemanları, yol ve sokak mobilyaları, köprüler ve kentsel açık alanların detaylı temsilini mümkün kılmaktadır [38,39]. Hava LiDAR'ın geniş alan kapsamı ile yersel lazer tarayıcıların detay hassasiyeti, eğik fotogrametri verileriyle birleştirildiğinde, hem makro ölçekte kentsel planlama ve arazi kullanımı analizlerinde hem de mikro ölçekte mimari ve altyapı incelemelerinde yüksek doğruluk ve detay sağlanmaktadır.

Ayrıca, LiDAR ve eğik fotogrametri verilerinin birlikte kullanımı, tek başına her bir yöntemde ortaya çıkabilecek veri boşluklarını minimize ederek, kentsel planlama, altyapı yönetimi, afet simülasyonları, kültürel miras dokümantasyonu ve sanal şehir uygulamaları gibi farklı disiplinlerde kapsamlı ve güvenilir analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır [40-42]. Bu çok sensörlü entegrasyon, modern kentsel analiz ve üç boyutlu modelleme çalışmalarında vazgeçilmez bir yöntem olarak kabul edilmekte ve gelecekteki akıllı şehir uygulamaları ile dijital ikiz projelerinde de kritik bir rol oynamaktadır [43,44].

2. Eğik Resim Fotogrametrisi

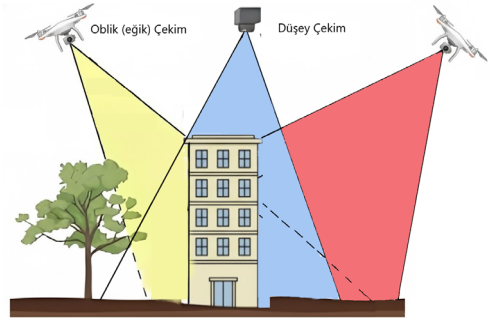
2.1. Kavramsal Çerçeve

Eğik resim fotogrametrisi (Oblique Photogrammetry), günümüz kentsel planlama, mimari analiz, kültürel miras belgelenmesi ve dijital şehir modelleme uygulamalarında giderek daha kritik bir rol oynayan üç boyutlu görüntüleme yöntemlerinden biridir. Bu yaklaşım, genellikle beş kameradan oluşan sistemler aracılığıyla uygulanır; sistemde bir dikey kamera, çalışma alanının genel planimetrik ve topografik görünümünü sağlarken, dört eğik kamera farklı açılardan bina cepheleri, köprüler, anıtlar ve sokak seviyesindeki diğer kentsel detayları kaydeder. Eğik kameraların konumlandırıldığı eğim açıları tipik olarak 35°-45° arasında değişmektedir ve bu sayede her nesne hem üstten hem de yanlardan görüntülenerek daha homojen, eksiksiz ve detaylı bir üç boyutlu model elde edilebilmektedir [5,6,22,24].

Bu çok perspektifli görüntüleme yaklaşımı, özellikle yüksek yoğunluklu kentsel alanlarda geleneksel nadir (dikey) hava görüntülerinin yetersiz kaldığı durumlarda önemli avantajlar sunar. Eğik görüntüler, binaların dikey cephelerini, mimari detaylarını ve sokak seviyesindeki altyapı elemanlarını

doğru biçimde yakalayarak, üç boyutlu modelin geometrik doğruluğunu ve detay zenginliğini artırır. Ayrıca, farklı bakış açılarından veri toplanması, örtüşme ve görünüm eksikliklerini minimize eder; böylece modelleme sürecindeki hata payı azalır ve görsel gerçeklik ile dokusal kalite önemli ölçüde yükselir.

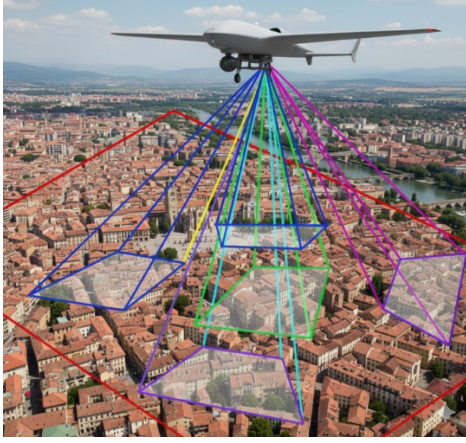
Eğik fotogrametri, modern algoritmalar ve otomatik modelleme teknikleri ile desteklendiğinde, büyük veri setlerinde bile hızlı ve güvenilir veri işleme imkânı sunar. Bu yöntem, yalnızca mekânsal doğruluk açısından değil, aynı zamanda görselleştirme ve dokusal zenginlik açısından da geleneksel nadir görüntüleme yöntemlerine kıyasla üstünlük sağlar. Bu özellikler, eğik fotogrametriyi özellikle kentsel dokuların yoğun olduğu alanlarda, dijital şehir modellerinin oluşturulmasında, detaylı mekânsal analizlerde ve kültürel mirasın dijital dokümantasyonunda vazgeçilmez bir araç hâline getirmektedir. Ayrıca, çok sensörlü entegrasyonlarla (LiDAR, multispektral ve termal veriler) kullanıldığında, eğik fotogrametri hem geometrik doğruluk hem de veri kapsamı açısından kapsamlı ve güvenilir üç boyutlu modeller üretmektedir (Şekil 1) [17,18,26,33].



Şekil 1. Eğik ve Düşey Çekim.

2.2. Sistem Bileşenleri

Eğik fotogrametri sistemleri, yüksek doğruluklu ve detaylı üç boyutlu modeller üretme kapasitesine sahip bir dizi teknolojik bileşeni bir araya getirir. Bu sistemlerin temel bileşenleri arasında yüksek çözünürlüklü kamera sensörleri, GNSS/INS (Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System) tabanlı hassas pozisyonlama birimleri, platform stabilizasyon sistemleri ve çoklu kamera modülleri yer almaktadır. Yüksek çözünürlüklü sensörler, hem dikey hem de eğik açılardan elde edilen görüntülerin ayrıntılı ve net olmasını sağlayarak üç boyutlu modelin dokusal ve geometrik doğruluğunu artırır. GNSS/INS tabanlı pozisyonlama birimleri, her bir görüntünün konum ve yönelim bilgilerini hassas bir şekilde belirler; böylece görüntüler doğru biçimde hizalanarak eksiksiz bir 3B model oluşturulabilir (Şekil 2).



Şekil 2. Eğik resim çekimi.

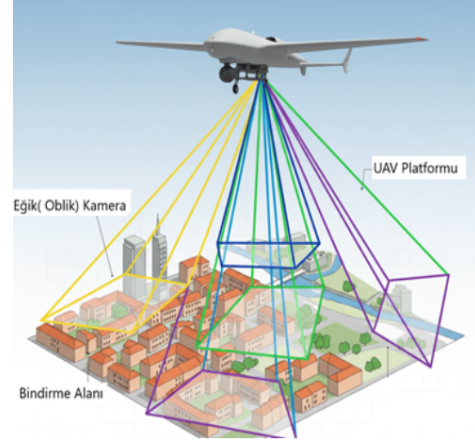
Kameralar genellikle mekanik veya elektronik olarak stabilize edilmiş platformlar üzerinde konumlandırılır. Bu stabilizasyon sistemleri, uçuş sırasında meydana gelebilecek titreşim, sallanma veya rüzgar etkisi gibi faktörlerden kaynaklanan görüntü bozulmalarını minimize eder. Özellikle insansız hava araçları (İHA) ve sabit kanatlı uçak platformlarında kullanılan bu sistemler, farklı yükseklik ve hızlarda bile yüksek doğruluklu veri elde edilmesini mümkün kılar [17,45].

Günümüzde modern eğik fotogrametri sistemleri, bu donanım bileşenlerini gelişmiş yazılım ve algoritmalarla destekleyerek, otomatik görüntü hizalama, nokta bulutu oluşturma ve üç boyutlu model üretimi süreçlerini verimli ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, eğik fotogrametri verileri, hava ve yersel LiDAR (Terrestrial Laser Scanning – TLS) ölçümleriyle birleştirildiğinde hem geometrik doğruluk hem de görselleştirme kalitesi önemli ölçüde artırılmaktadır. Hava LiDAR sistemleri geniş alanlarda topografik ve kentsel veri sağlarken, TLS sistemleri binaların cepheleri, anıtlar ve sokak mobilyaları gibi detaylar için yüksek çözünürlüklü nokta bulutu üretir. Bu çok sensörlü entegrasyon, kentsel planlama, altyapı yönetimi, afet simülasyonları ve kültürel miras belgelenmesi gibi uygulamalarda veri eksikliklerini minimize ederek kapsamlı ve güvenilir analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır (Şekil 3) [18,19,46,47].

Modern eğik fotogrametri sistemleri, donanım, pozisyonlama teknolojileri, stabilizasyon sistemleri ve çok sensörlü veri entegrasyonu ile desteklendiğinde, kentleşmenin hızla arttığı bölgelerde yüksek doğruluklu ve detaylı üç boyutlu veri üretiminin temelini oluşturmaktadır. Bu durum, özellikle dijital şehir modellerinin oluşturulması, ileri düzey mekânsal analizler ve sanal şehir uygulamaları için kritik bir avantaj sağlamaktadır.

Son yıllarda, Phase One iXM-RS ve Trimble Aerial Oblique System gibi ticari eğik fotogrametri sistemleri, hem metrolojik doğrulukta hem de yüksek

çözünürlükte veri üretimi sağlayabilme kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu sistemler, insansız hava araçları (İHA) ve sabit kanatlı uçak platformlarına entegre edilerek, farklı ölçeklerde kentsel ve kırsal alanların üç boyutlu modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [48]. Yüksek çözünürlüklü kamera sensörleri, eğik ve dikey görüntülerin eşzamanlı olarak yakalanmasını sağlayarak hem geometrik doğruluk hem de dokusal detay açısından üstün veri üretimi sunmaktadır (Şekil 4).

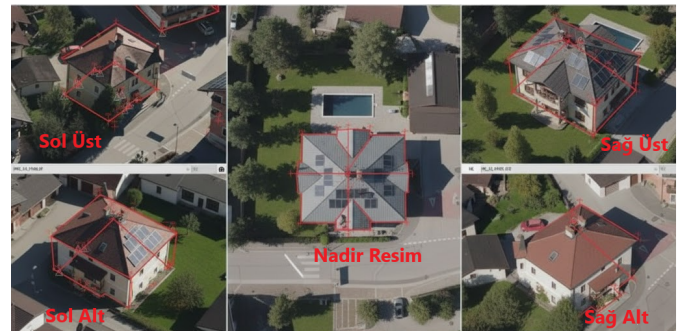


Şekil 3. Eğik resim platformları.



Şekil 4. Eğik (oblik) çekim kameraları.

Gelişmiş yazılım ve algoritmalar sayesinde, bu sistemlerden elde edilen görüntüler otomatik olarak hizalanmakta, nokta bulutlarına dönüştürülmekte ve üç boyutlu modelleme sürecinde doğrudan kullanılabilir hâle getirilmektedir. Otomatik yapı tanıma, doku kaplama ve hata düzeltme algoritmaları, özellikle yoğun kentsel dokularda veri bütünlüğünü artırmakta ve modelin doğruluk seviyesini yükseltmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Eğik (oblik) kamera ile çekilmiş resimler.

Buna ek olarak, modern eğik fotogrametri sistemleri, çoklu sensör entegrasyonunu desteklemekte; multispektral, termal ve LiDAR verilerini bir araya getirerek veri çeşitliliğini ve model doğruluğunu artırmaktadır. Hava LiDAR sistemleri geniş alanlarda topografik ve kentsel veriler sağlarken, yersel lazer tarayıcılar (TLS) binaların cepheleri, anıtlar ve sokak mobilyaları gibi detaylar için yüksek çözünürlüklü nokta bulutları üretmektedir. Bu çok sensörlü yaklaşım, kentsel planlama, altyapı yönetimi, afet simülasyonları, kültürel miras dokümantasyonu ve sanal şehir uygulamaları gibi farklı alanlarda veri eksikliklerini minimize ederek yüksek güvenilirlikte analizler yapılmasına olanak tanımaktadır [17,18].

Sonuç olarak, ticari eğik fotogrametri sistemlerinin yüksek çözünürlük, hassas pozisyonlama ve çok sensörlü entegrasyon yetenekleri, günümüz kentsel modelleme ve mekânsal analiz çalışmalarında vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, kentleşmenin yoğun olduğu alanlarda eksiksiz ve güvenilir üç boyutlu veri üretimi sağlayarak, dijital şehir modellerinin oluşturulması ve ileri düzey mekânsal uygulamalar için kritik bir temel oluşturmaktadır.

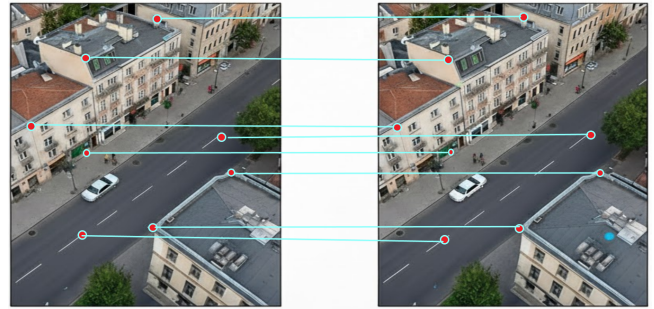
3. Veri İşleme ve 3B Modelleme Süreci

Eğik görüntülerin işlenmesi, klasik hava fotogrametrisi akışına kıyasla bazı temel farklılıklar göstermektedir. Bu süreç, genellikle aşağıdaki adımları kapsamaktadır:

Görüntü Eşleme (Image Matching): Eğik açılardan elde edilen çoklu görüntülerde ortak özelliklerin tespiti ve eşleştirilmesi, üç boyutlu rekonstrüksiyon sürecinin temel adımlarından biridir. Bu işlem, her bir görüntüdeki belirgin yapısal ve dokusal özelliklerin karşılaştırılmasını ve eşleştirilmesini içerir; dolayısıyla elde edilen yoğun nokta bulutunun doğruluğu doğrudan bu eşleşme kalitesine bağlıdır. Yüksek binaların yoğun olduğu kentsel alanlar, karmaşık mimari yapılar ve sokak seviyesindeki detaylar söz konusu olduğunda, görüntü eşlemede yüksek doğruluk kritik öneme sahiptir. Eşleşme hataları, cephelerin, köprülerin, anıtların ve diğer dikey yapı elemanlarının geometrik temsilde sapmalara yol açabilir ve modelin genel güvenilirliğini düşürebilir (Şekil 6) [49].

Modern eğik fotogrametri yazılımları, Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), Speeded-Up Robust Features (SURF) ve benzeri gelişmiş özellik çıkarım algoritmalarını kullanarak çok perspektifli görüntülerdeki ortak noktaları otomatik olarak tanır ve eşleştirir. Bu yaklaşımlar, farklı bakış açıları, ölçekler ve ışık koşulları altında bile tutarlı eşleşmeler elde edilmesini sağlar. Böylece, veri işleme süresi azalırken üç boyutlu modelin geometrik ve dokusal doğruluğu

da önemli ölçüde artar. Ayrıca, bu algoritmaların kullanımı, büyük veri setlerinde otomatik ve tekrarlanabilir bir iş akışı sağlayarak, yoğun kentsel alanlarda kapsamlı ve detaylı 3B model üretimini mümkün kılmaktadır.



Şekil 6. Görüntü eşleme.

Demosaicing: Ham sensör verilerinin renk ve doku bilgisine dönüştürülmesi işlemi, eğik fotogrametri veri işleme sürecinin kritik adımlarından biridir. Modern kamera sensörleri, genellikle Bayer filtresi veya benzeri renk filtre matrisleri kullanır; bu nedenle her piksel yalnızca tek bir renk kanalını (kırmızı, yeşil veya mavi) kaydeder. Demosaicing işlemi, bu eksik renk bilgilerini interpolasyon ve algoritmik tahmin yöntemleriyle tamamlayarak her piksele tam renk değeri atar. Bu süreç, yalnızca görüntülerin görsel bütünlüğünü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda üç boyutlu modelleme sürecinde yüzeylerin dokusal özelliklerinin doğru ve tutarlı biçimde temsil edilmesi için de gereklidir.

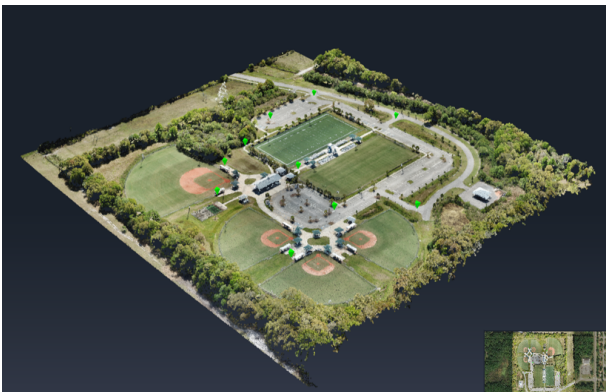
Özellikle yüksek detay gerektiren mimari cepheler, tarihi anıtlar ve karmaşık kentsel dokular söz konusu olduğunda, doğru demosaicing, üç boyutlu modelin hem görsel gerçekliğini hem de dokusal doğruluğunu doğrudan etkiler. Yetersiz veya hatalı renk interpolasyonu, yüzey modeline doku kaplama aşamasında hatalara yol açabilir ve nihai 3B modelin görsel kalitesini düşürebilir. Modern fotogrametri yazılımları, demosaicing aşamasında gelişmiş algoritmalar kullanarak renk hatalarını minimize eder ve yüksek çözünürlüklü, detaylı ve tutarlı dokuların elde edilmesini sağlar.

Yöneltme ve Hizalama (Orientation & Alignment): Bu aşama, eğik fotogrametri veri işleme sürecinde kritik öneme sahiptir ve her bir görüntünün üç boyutlu koordinat sistemine doğru biçimde yerleştirilmesini sağlar. GNSS/INS (Global Navigation Satellite System / Inertial Navigation System) tabanlı pozisyon ve yönelim verileri, her bir görüntünün coğrafi konum ve yönelim bilgilerini yüksek doğrulukla belirler. Bu bilgiler, çoklu görüntülerin geometrik olarak doğru bir şekilde hizalanmasına imkân tanır ve yoğun nokta bulutu üretiminde oluşabilecek hata payını minimize eder.

Yönelme süreci, genellikle iki ana adımdan oluşur: **iç Yönelme** ve **dış Yönelme**. İç Yönelme, kamera lens distorsiyonları, odak uzaklığı, sensör geometrisi ve diğer iç parametreleri düzelterek görüntülerin ölçümsel doğruluğunu artırır. Dış Yönelme ise her bir görüntünün dünya koordinat sistemi içerisindeki konum ve yönelimini belirler; bu sayede özellikle yüksek binaların yoğun olduğu kentsel alanlarda cepheler, köprüler ve anıtlar gibi dikey yapı elemanlarının doğru geometrik temsili sağlanır.

Modern fotogrametri yazılımları, Yönelme ve hizalama aşamasında Demet dengelemesi (Bundle Adjustment) gibi optimizasyon algoritmalarını kullanarak tüm görüntü setinin konum ve yönelim hatalarını minimize eder. Bu yaklaşım, modelin geometrik doğruluğunu önemli ölçüde artırmakla kalmaz, aynı zamanda sonraki yoğun nokta bulutu üretimi, yüzey modelleme ve doku kaplama adımlarının başarısını doğrudan etkiler. Dolayısıyla, doğru Yönelme ve hizalama, eğik fotogrametri ile elde edilen üç boyutlu modellerin hem geometrik hem de görsel kalite açısından güvenilirliğini teminat altına alır.

Yoğun Nokta Bulutu Üretimi (Dense Point Cloud Generation): Eğik fotogrametri veri işleme sürecinde üç boyutlu modellemenin temel yapı taşlarından biri olan bu aşama, çoklu eğik görüntülerin işlenmesiyle yüksek çözünürlüklü ve yoğun nokta bulutlarının üretilmesini kapsar. Bu amaçla Structure-from-Motion (SfM) ve Multi-View Stereo (MVS) algoritmaları kullanılır. SfM, görüntüler arasındaki eşleşmeleri temel alarak her bir kameranın pozisyonunu ve sahne geometrisini tahmin ederken, MVS algoritması bu geometrik bilgileri kullanarak görüntü detaylarını yoğun nokta bulutuna dönüştürür (Şekil 7).



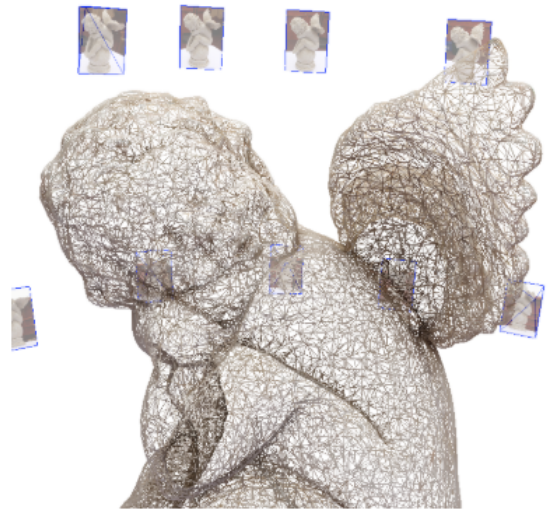
Şekil 7. Yoğun nokta bulutu.

Oluşturulan nokta bulutları, binaların cepheleri, köprüler, anıtlar ve sokak seviyesindeki diğer kentsel objeler için üç boyutlu geometrik temel sağlar. Yoğun nokta bulutları yalnızca yüzey geometrisini temsil etmekle kalmaz; dokusal analizler, yapısal incelemeler

ve mimari değerlendirmeler için de kritik veriler sunar. Özellikle yüksek yoğunluklu kentsel alanlarda, karmaşık yapılar ve dikey elemanların doğru modellenmesi, bu aşamadaki doğruluk ve detay yoğunluğuna doğrudan bağlıdır.

Modern fotogrametri yazılımları, nokta bulutu üretiminde gelişmiş filtreleme, hata düzeltme ve gürültü azaltma tekniklerini entegre ederek geometrik doğruluğu artırır ve sonraki yüzey modelleme ile doku kaplama adımlarının kalitesini garanti altına alır. Bu yaklaşım, üç boyutlu modelin hem yapısal hem de görsel gerçekliğini optimize ederek, kentsel analiz, altyapı planlaması ve sanal şehir uygulamaları gibi ileri düzey uygulamalarda güvenilir veri sağlar

Yüzey Modelleme (Surface Modeling): Yoğun nokta bulutlarından üçgenler veya mesh yapıları oluşturularak elde edilen yüzey modeli (3D mesh), eğik fotogrametri veri işleme sürecinin kritik bir aşamasıdır. Bu adım, nokta bulutunun ham geometrik verilerini tutarlı ve sürekli bir yüzey hâline dönüştürerek modelin geometrik bütünlüğünü sağlar. Üçgenleme veya diğer mesh oluşturma teknikleri, noktalar arasındaki ilişkileri optimize ederek boşlukları doldurur ve yüzeyin düzgün, analiz edilebilir bir yapıya kavuşmasını mümkün kılar (Şekil 8) [43,51].



Şekil 8. Mesh model.

Yüzey modelleme aşaması, özellikle karmaşık kentsel yapılar, yüksek binalar ve dikey mimari elemanlar için önemlidir; çünkü doğru mesh yapısı olmadan, binaların cepheleri, köprüler, anıtlar ve diğer kentsel detayların üç boyutlu temsili eksik veya hatalı olabilir. Modern fotogrametri yazılımları, bu aşamada geometriyi koruyarak veri gürültüsünü azaltan ve mesh kalitesini artıran algoritmalar uygular. Böylece elde edilen 3D mesh modeller, yalnızca görselleştirme amaçlı değil, aynı zamanda yapısal analizler, mimari değerlendirmeler ve kentsel planlama çalışmaları için de güvenilir veri sağlar.

Bununla birlikte, yüzey modelleme süreci, doku kaplama (texture mapping) aşaması ile tamamlandığında üç boyutlu model hem geometrik hem de görsel olarak gerçekçi hâle gelir. Eğik fotogrametri ile elde edilen renk ve doku bilgileri, mesh üzerine kaplanarak binaların cephe detayları, anıtlar ve sokak mobilyaları gibi öğeler yüksek görsel doğrulukla temsil edilir. Bu entegrasyon, dijital şehir modellerinin görselleştirme kalitesini artırmakta ve mimari analiz, kültürel miras dokümantasyonu ile sanal şehir uygulamaları için değerli bir veri kaynağı sağlamaktadır.

Doku Kaplama (Texture Mapping): Eğik fotogrametri sürecinde üretilen 3B mesh modellerinin görsel gerçekliğini artırmak amacıyla doku kaplama aşaması kritik bir rol oynar. Bu süreçte, eğik görüntülerden elde edilen renk ve dokusal bilgiler mesh yüzeyine hassas bir biçimde uygulanır. Doku kaplama, yalnızca estetik bir iyileştirme sağlamakla kalmaz; aynı zamanda modelin mimari analizlerde, sanal şehir uygulamalarında, kültürel miras dokümantasyonu ve restorasyon çalışmalarında kullanılabilirliğini de artırır (Şekil 9).



Şekil 9. Doku kaplama.

Modern fotogrametri yazılımları, bu aşamada perspektif düzeltme, renk tutarlılığı ve dokusal uyum algoritmalarını entegre ederek farklı açılardan elde edilen eğik görüntülerin tek bir bütün hâlinde mesh üzerine doğru biçimde yerleştirilmesini sağlar. Bu sayede, binaların cepheleri, köprüler, anıtlar ve sokak seviyesindeki altyapı elemanları gibi detaylar hem geometrik hem de görsel olarak doğru şekilde temsil edilir. Yüksek çözünürlüklü ve tutarlı dokular, kullanıcıların model üzerinde ayrıntılı inceleme yapmasına, mimari ve kentsel analizler gerçekleştirmesine ve planlama kararlarını daha güvenilir şekilde almasına imkân tanır.

Ayrıca, doku kaplama, yüzey modelleme aşamasının sağladığı geometrik doğruluk ile

birleştiğinde, üç boyutlu kentsel modellerin hem yapısal hem de görsel bütünlüğünü maksimize eder. Bu entegrasyon, dijital şehir modellerinin görselleştirme kalitesini artırmakta, simülasyon ve sanal gerçeklik uygulamalarında yüksek düzeyde gerçekçilik sağlamaktadır. Böylece, doku kaplama, eğik fotogrametri tabanlı 3B modelleme sürecinde son derece kritik bir adım olarak kabul edilmektedir.

Modern fotogrametri yazılımları, Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, ContextCapture ve RealityCapture gibi platformlar, çoklu eğik görüntülerden otomatik olarak yüksek çözünürlüklü 3B mesh modeller üretme kapasitesine sahiptir. Bu yazılımlar, Structure-from-Motion (SfM) ve Multi-View Stereo (MVS) algoritmalarını entegre ederek, veri işleme sürecini büyük ölçüde otomatikleştirir ve kullanıcı müdahalesini minimuma indirir. SfM algoritması, çoklu görüntüler arasındaki eşleşmeleri kullanarak kamera pozisyonlarını ve sahne geometrisini tahmin ederken, MVS algoritması bu konum bilgilerini kullanarak yoğun nokta bulutları ve detaylı yüzeyler üretir.

Buna ek olarak, modern yazılımlar, LiDAR ve diğer çok sensörlü veri kaynaklarıyla entegrasyonu destekleyerek geometrik doğruluk ve model detaylarını artırır. LiDAR verileri, özellikle dikey yapı elemanları ve karmaşık arazi şekilleri için hassas yükseklik bilgisi sağlarken, eğik fotogrametri görsel ve dokusal bilgiyi modele ekler. Bu çok sensörlü yaklaşım, üç boyutlu kentsel modellerin hem geometrik hem de görsel doğruluğunu maksimize eder.

Sonuç olarak, bu yazılımlar, elde edilen verileri otomatik olarak hizalayarak nokta bulutlarına dönüştürür ve 3B modelleme sürecinde kullanılabilir hâle getirir. Bu süreç, kentsel planlama, altyapı yönetimi, afet simülasyonları ve kültürel miras dokümantasyonu gibi uygulamalarda yüksek performans, güvenilirlik ve detay zenginliği sağlar.

4. Kentsel 3B Modellemede Uygulama Alanları

4.1. Kentsel Planlama ve Mimari Analiz

Eğik fotogrametri, bina cepheleri, çatılar, açık alanlar ve çevresel öğelerin doğru biçimde modellenmesini sağlayarak kentsel planlamada kullanılabilir yüksek doğruluklu 3B modeller üretir. Bu modeller, gölgeleme ve güneşlenme analizleri, rüzgâr etkileri değerlendirmesi, görüş ve görünürlük analizi, bina yoğunluğu ve kentsel estetik değerlendirmeleri gibi mimari ve şehir planlama uygulamalarında etkin biçimde kullanılmaktadır [1,5,52]. Ayrıca, bu modeller altyapı tasarımı, yapı yenileme planları ve kentsel dönüşüm projelerinde karar destek sistemi olarak işlev görmektedir.

4.2. Kültürel Miras ve Belgeleme

Tarihi yapılar, anıtlar ve arkeolojik alanların belgelenmesinde eğik görüntüler, özellikle karmaşık cephe geometrilerine sahip yapılar için yüksek doğrulukta veri sağlar. Bu sayede tahribatsız ve düşük maliyetli dijital arşivleme gerçekleştirilebilir. Elde edilen 3B modeller, restorasyon ve konservasyon planlamasında, sanal müze uygulamalarında ve kültürel mirasın halka sunulmasında önemli rol oynamaktadır [2,4,6,53]. Ayrıca, kültürel miras alanlarında afet risk yönetimi ve hasar simülasyonu çalışmalarında da kullanılabilir.

4.3. Akıllı Şehir Uygulamaları ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)

Eğik fotogrametri, modern akıllı şehir projelerinde binaların, yolların, yeşil alanların, köprüler ve diğer altyapı elemanlarının üç boyutlu veri tabanlarının oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu yüksek doğruluklu ve detaylı 3B modeller, yalnızca kentsel mekânın geometrik temsili için değil, aynı zamanda enerji tüketimi analizi, trafik ve ulaşım simülasyonları, afet yönetimi, şehir içi görüş ve navigasyon sistemleri, hava kirliliği ve gürültü haritalaması gibi CBS tabanlı uygulamalara doğrudan entegre edilebilmektedir [3,17]. Bu modeller, kentsel dokunun mekânsal karmaşıklığını yüksek doğrulukla yansıtarak, mimari ve mühendislik analizleri için gerekli olan detay ve hassasiyeti sağlamaktadır. Özellikle yüksek yoğunluklu kentsel alanlarda, geleneksel dikey hava görüntüleri ile elde edilemeyen cephe ve sokak seviyesi detayları, eğik fotogrametri sayesinde eksiksiz olarak elde edilebilmektedir.

Bu bağlamda, eğik fotogrametri verileri, şehir planlamacıları ve karar vericiler için hem kısa vadeli operasyonel kararların alınmasında hem de uzun vadeli stratejik planlama süreçlerinde sağlam ve güvenilir bir mekânsal veri altyapısı sunmaktadır. Örneğin, ulaşım ağlarının optimizasyonu, enerji verimliliği projeleri, afet risk analizleri ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi gibi çok disiplinli planlama süreçlerinde, eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller temel veri kaynağı olarak kullanılabilir [52]. Ayrıca, bu modellerin CBS tabanlı analitik platformlarla entegrasyonu, veri tabanlı simülasyonlar, mekânsal analizler ve karar destek sistemleri için daha doğru ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, eğik fotogrametri, modern kentsel yönetim ve akıllı şehir uygulamalarında sadece görselleştirme ve dokümantasyon amacıyla değil, aynı zamanda stratejik planlama, operasyonel yönetim ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Buna ek olarak, eğik fotogrametri verileri IoT tabanlı sensör sistemleriyle bütünleştirilerek dinamik şehir yönetimi ve gerçek zamanlı karar destek sistemlerinde etkin biçimde kullanılabilir. Örneğin, akıllı trafik yönetimi ve hareketli nesne takibi gibi uygulamalarda, 3B modeller temel veri altyapısını sağlayarak analizlerin doğruluk ve hızını artırmaktadır. Benzer şekilde, sürdürülebilir şehir tasarımı, yeşil alan optimizasyonu, kentsel ısı adası ve mikroiklim analizleri gibi çevresel simülasyonlarda da eğik fotogrametri tabanlı veriler kritik öneme sahiptir; böylece şehirler enerji verimliliğini artırmakta ve çevresel kaliteyi optimize edebilmektedir.

Eğik fotogrametri ile oluşturulan detaylı 3B şehir modelleri, otonom araç navigasyonu, akıllı ulaşım sistemleri ve kentsel lojistik optimizasyonu gibi ileri düzey teknolojiler için de kritik veri sağlamaktadır. Yol geometrisi, engel tespiti, yol güvenliği analizleri ve dinamik trafik simülasyonları, bu modellerin sunduğu yüksek doğruluk ve detay seviyesinden doğrudan faydalanmaktadır. Ayrıca, kültürel miras ve turizm uygulamalarında sanal turlar, interaktif şehir deneyimleri ve dijital miras dokümantasyonu için gerçekçi ve detaylı dijital şehir ortamları oluşturulabilir.

Bu çok boyutlu kullanım potansiyeli, eğik fotogrametri tabanlı modelleri, akıllı şehir vizyonunu destekleyen ve mekânsal analizleri daha güvenilir, hızlı ve kapsamlı hâle getiren vazgeçilmez bir veri altyapısı hâline getirmektedir. Bu bağlamda, eğik fotogrametri yalnızca mevcut şehir dokusunun dijital temsili için değil, aynı zamanda geleceğe dönük şehir planlaması, sürdürülebilirlik ve akıllı altyapı yönetimi stratejilerinde de kritik bir rol oynamaktadır.

4.4. Afet Yönetimi ve Hasar Analizi

Deprem, sel, yangın veya diğer doğal afetler sonrası eğik fotogrametri tabanlı üç boyutlu modeller, yıkımın mekânsal dağılımını hızlı, doğru ve detaylı bir şekilde değerlendirme imkânı sunmaktadır. Bu yüksek çözünürlüklü 3B modeller, afet sonrası müdahale planlarının hazırlanması, hasar tespiti ve acil durum lojistiği çalışmalarında kritik bir veri altyapısı sağlamaktadır. Özellikle kentsel alanlarda, binaların cepheleri, altyapı elemanları, köprüler ve yollar gibi detayların doğru bir şekilde modellenmesi, müdahale ekiplerinin hangi alanlara öncelik vereceğini belirlemesini kolaylaştırmaktadır.

Buna ek olarak, eğik fotogrametri verileri, afet öncesi risk analizleri ve senaryo simülasyonları için de kullanılabilir. Örneğin, deprem veya sel riskine maruz alanlarda binaların ve altyapının dayanıklılığı, farklı senaryolara göre modellenerek potansiyel hasar dağılımları tahmin edilebilir. Yangın riskine karşı yapılacak kentsel planlamalarda, binaların

yükseklikleri, cephe malzemeleri ve çevresel unsurlar dikkate alınarak yangının yayılma olasılığı analiz edilebilir. Ayrıca, bu modeller afet sonrası yeniden inşaa planlaması, şehir rehabilitasyonu ve sigorta sektöründe hasar tespiti gibi uygulamalarda da kullanılabilir.

Sonuç olarak, eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller, afet yönetimi süreçlerinde hem önleyici hem de müdahale odaklı stratejilerin geliştirilmesini mümkün kılmakta, kentsel risklerin daha etkin ve veri odaklı yönetilmesine olanak tanımaktadır [18].

4.5. Altyapı ve Ulaşım Yönetimi

Eğik fotogrametri, köprüler, yollar, tüneller, enerji hatları, su ve kanalizasyon sistemleri ile raylı ulaşım altyapısı gibi kritik kentsel ve kırsal altyapı elemanlarının üç boyutlu modellenmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek doğruluklu ve detaylı 3B modeller, altyapı bakım ve denetim süreçlerini optimize etmek için güvenilir bir veri altyapısı sağlar; örneğin köprülerde yapısal deformasyonlar, yolların bozulma düzeyi veya tünel iç yüzeylerinin durumu gibi unsurlar düzenli aralıklarla analiz edilebilir.

Buna ek olarak, eğik fotogrametri ile oluşturulan modeller, altyapı planlaması ve genişletme projeleri için güncel ve doğru verinin temin edilmesini mümkün kılar. Yeni yol ve raylı sistem hatlarının tasarımında, mevcut altyapı ile entegrasyon ve çakışma analizi gibi mühendislik çalışmalarında bu modeller kritik rol oynar. Ayrıca, ulaşım simülasyonları, trafik yönetimi ve güvenlik analizleri için 3B veri tabanı olarak kullanılabilmekte, yol geometrisi, köprü açıklıkları, kavşak düzenlemeleri ve diğer altyapı elemanlarının detaylı ve koordinatlı temsili sayesinde simülasyonların doğruluk ve güvenilirliği artırılmaktadır.

Sonuç olarak, eğik fotogrametri tabanlı altyapı modelleri, hem operasyonel yönetim hem de uzun vadeli planlama süreçlerinde karar destek mekanizmalarını güçlendirerek, şehirlerin ve kritik altyapı sistemlerinin sürdürülebilir ve güvenli bir şekilde yönetilmesine katkı sağlamaktadır.

4.6. Sanal ve Artırılmış Gerçeklik Uygulamaları

Elde edilen yüksek çözünürlüklü 3B modeller, sanal şehir turları, eğitim simülasyonları, oyun ve artırılmış/gerçeklik (AR/VR) tabanlı kültürel miras deneyimlerinde giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller, binaların cephe detaylarından tarihi anıtların mimari öğelerine kadar yüksek doğruluklu ve ayrıntılı geometrik veriler sunar; kullanıcılar, fiziksel mekâna erişim sağlamadan üç

boyutlu ortamda dolaşabilir, yapısal elemanları inceleyebilir ve etkileşimli deneyimler yaşayabilir.

Eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller, özellikle eğitim alanında önemli bir rol oynar. Mimarlık, şehir planlama veya mühendislik öğrencileri, bu modeller aracılığıyla mekânsal farkındalıklarını artırabilir ve simülasyon temelli interaktif ders içerikleriyle öğrenim süreçlerini zenginleştirebilir. Oyun ve sanal tur uygulamalarında, gerçek dünyaya yüksek derecede benzerlik gösteren ortamlar oluşturularak kullanıcıların hem keşif hem de öğrenme deneyimleri geliştirilebilir. Kültürel miras bağlamında ise, erişimi sınırlı veya korunması gereken tarihi yapıların sanal ziyaretleri ve etkileşimli dokümantasyonu mümkün hâle gelir; bu sayede hem kültürel değerlerin korunması hem de geniş kitlelere ulaştırılması sağlanır.

Buna ek olarak, AR/VR uygulamalarında kullanılan eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller, dijital içerik üreticileri, şehir planlamacıları ve yöneticileri için planlama ve karar destek süreçlerinde de değerli bir araç sunar. Fiziksel alanın kısıtlamalarından bağımsız olarak, eğitim, kültürel deneyim ve şehir simülasyonu gibi çok boyutlu uygulamalarda yüksek doğruluklu, etkileşimli ve görsel olarak gerçekçi ortamlar yaratmak mümkün olur. Bu çok yönlü kullanım potansiyeli, eğik fotogrametri tabanlı modelleri modern dijital şehircilik ve kültürel miras yönetiminde vazgeçilmez bir veri altyapısı hâline getirmektedir.

4.7. Çevresel İzleme ve Arazi Analizi

Eğik fotogrametri, kentsel yeşil alanların, parkların, ağaç dokusunun ve arazi şekillerinin yüksek doğruluklu üç boyutlu olarak modellenmesini sağlayarak çevresel analiz ve sürdürülebilir şehir planlamasında kritik bir veri altyapısı sunar. Bu modeller, bitki örtüsünün dağılımı, ağaç türleri ve yoğunluğu, peyzaj elemanları, topografik özellikler ve mikro-ölçekli arazi morfolojisi hakkında detaylı mekânsal bilgiler sağlar ve arazi kullanım kararlarının bilimsel temele dayanmasını mümkün kılar.

Elde edilen 3B veriler, sel, erozyon ve taşkın risklerinin değerlendirilmesi, toprak kayması ve arazi deformasyonlarının izlenmesi ile kentsel ısı adası etkilerinin analiz edilmesi gibi çevresel izleme çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılabilir. Bunun yanı sıra, yeşil alan optimizasyonu, ekolojik koridor planlaması, biyolojik çeşitlilik analizi, şehir içi hava kalitesi ve mikroklima simülasyonları gibi sürdürülebilirlik odaklı uygulamalarda eğik fotogrametri tabanlı modeller doğrudan veri sağlar. Bu sayede şehir yönetimleri ve planlamacılar, çevresel riskleri daha etkin bir şekilde öngörebilir, sürdürülebilir peyzaj tasarımları geliştirebilir ve

kentsel ekosistemlerin korunmasını destekleyen veri odaklı, stratejik ve bütüncül kararlar alabilir.

Ayrıca, eğik fotogrametri verileri zaman serisi analizleri ile birleştirilerek arazi ve bitki örtüsündeki değişimlerin izlenmesini, afet sonrası hızlı durum değerlendirmesini ve uzun vadeli çevresel değişim modellerini mümkün kılar; böylece hem proaktif hem de reaktif yönetim stratejilerinin desteklenmesine olanak tanır.

4.8. Enerji ve Sürdürülebilirlik Analizleri

Enerji ve Sürdürülebilirlik Analizleri: Eğik fotogrametri tabanlı yüksek doğruluklu 3B modeller, binaların çatı yüzeyleri, cepheleri ve çevresel engelleri dikkate alarak güneş enerjisi potansiyeli analizlerinde etkin şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller, çatılarda ve uygun yüzeylerde güneş panellerinin optimal yerleşimini belirlemek için gerekli geometrik ve topografik verileri sağlar. Böylece, enerji üretim kapasitesinin maksimuma çıkarılması, bina enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir şehir tasarımının desteklenmesi mümkün hâle gelir. Ayrıca, binaların gölgeleme durumları, yıl boyunca güneş ışınlamı değişimleri ve mikroklima etkileri gibi faktörler de eğik fotogrametri verileri kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilebilir.

Eğik fotogrametri verileri, yalnızca yenilenebilir enerji projelerinin planlanmasında değil, aynı zamanda kentsel enerji yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde de kritik bir rol oynar. Bu sayede şehir planlamacıları ve enerji yöneticileri, veri odaklı ve hassas kararlar alarak enerji verimliliğini artırabilir, karbon ayak izini azaltabilir ve çevresel kaynak kullanımını optimize edebilir. Sürdürülebilirlik perspektifinden bakıldığında, eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller, kentsel ölçekte enerji tasarrufu, binaların termal performans analizleri ve sürdürülebilir altyapı planlaması gibi uygulamalara doğrudan katkı sağlayan güvenilir bir veri altyapısı sunar. Bu durum, şehirlerin çevresel etkilerini minimize eden, kaynakları etkin kullanan ve geleceğe dönük enerji planlaması için sağlam temeller sunan entegre bir sürdürülebilirlik yaklaşımını mümkün kılar.

4.9. Otonom Araç ve Mobilite Sistemleri

Otonom Araç ve Mobilite Sistemleri: Eğik fotogrametri tabanlı yüksek doğruluklu ve detaylı 3B kentsel modeller, otonom araç navigasyonu, akıllı ulaşım ve mobilite sistemleri için kritik bir veri altyapısı sağlamaktadır. Bu modeller, yol geometrisi, kavşak düzenlemeleri, kaldırımlar, trafik işaretleri ve diğer kentsel engellerin üç boyutlu temsillerini

sunarak araçların güvenli ve verimli hareket etmesine olanak tanır.

Detaylı 3B veriler, trafik yönlendirme, yol güvenliği analizleri, dinamik trafik simülasyonları ve hareketli nesne tespiti gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle yoğun şehir içi trafiği, dar sokaklar ve karmaşık kavşaklar gibi zorlayıcı ortamlarda, eğik fotogrametri tabanlı modeller otonom sistemlerin çevresel farkındalığını artırır. Ayrıca, bu modeller, akıllı mobilite çözümlerinin geliştirilmesi, rotaların optimize edilmesi ve şehir içi ulaşımın enerji verimliliğinin artırılması için de veri sağlar.

Bunun yanında, 3B kentsel modeller, araç-simülasyon ortamlarının oluşturulmasında, sanal test sahalarının kurulmasında ve otonom sürüş algoritmalarının doğrulanmasında da kullanılabilir. Eğik fotogrametri verilerinin sağladığı yüksek geometrik doğruluk ve detay seviyesi, hem güvenlik hem de performans açısından otonom araç sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir avantaj sunar.

4.10. İnşaat ve Proje Yönetimi

İnşaat ve Proje Yönetimi: Eğik fotogrametri tabanlı yüksek doğruluklu 3B modeller, inşaat sahalarının detaylı dijital temsiliyi sağlayarak proje yönetimi ve denetim süreçlerinde etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu modeller, şantiyedeki mevcut yapılaşmayı, arazi morfolojisini ve geçici altyapı elemanlarını üç boyutlu olarak belgeleyerek, inşaat süresince gerçek zamanlı izleme ve kontrol imkânı sunar.

Elde edilen 3B veriler, proje ilerleme takibi, kalite kontrol, malzeme yerleşimi ve iş gücü planlaması gibi yönetim süreçlerinin optimize edilmesini sağlar. Örneğin, tamamlanan yapı elemanlarının planlanan proje ile uyumu karşılaştırılarak sapmalar hızlı bir şekilde tespit edilebilir ve gerekli düzeltici önlemler alınabilir. Ayrıca, eğik fotogrametri tabanlı modeller, inşaat sahasında güvenlik analizleri, vinç ve ekipman yerleşim planlaması, kazı ve dolgu miktarlarının hesaplanması ve yapıların geometrik doğruluğunun denetlenmesi gibi operasyonel süreçlerde de kritik veri sunar.

Buna ek olarak, bu veriler ilerleyen aşamalarda bakım, onarım ve yaşam döngüsü yönetimi (Facility Management) için de referans niteliğinde kullanılabilir. Eğik fotogrametri, inşaat ve proje yönetiminde hem maliyet etkinliği hem de veri doğruluğunu artırarak, şantiyede planlama ve kontrol süreçlerini dijitalleşmiş, güvenilir ve sürdürülebilir bir temele oturtmaktadır.

4.11. Turizm ve Kültürel Etkileşim

Dijital olarak oluşturulan detaylı şehir ve kültürel miras modelleri, sanal turlar ve etkileşimli turizm uygulamaları için kullanılmaktadır. Kullanıcılar fiziksel mekâna erişim olmadan kültürel alanları inceleyebilir ve deneyimleyebilir.

4.12. Eğitim ve Araştırma

Eğik fotogrametri tabanlı yüksek doğruluklu 3B modeller, şehir planlama, mimarlık, inşaat mühendisliği, jeoloji, arkeoloji ve çevre bilimleri gibi disiplinlerde eğitim ve araştırma amaçlı kapsamlı bir veri kaynağı sunar. Bu modeller, öğrencilerin ve araştırmacıların karmaşık kentsel yapı, altyapı ve doğal arazi sistemlerini dijital ortamda detaylı bir şekilde incelemelerine olanak tanır.

Eğitim bağlamında, 3B modeller; mekânsal farkındalığın artırılması, yapı elemanlarının ve arazi morfolojisinin analitik olarak incelenmesi, simülasyon tabanlı ders içeriklerinin geliştirilmesi ve sanal saha gezileri gibi uygulamalarda kullanılabilir. Mimarlık ve şehir planlama öğrencileri, binaların cephe detayları, alan kullanımı ve kentsel dokular üzerinde etkileşimli çalışmalar yapabilirken, jeoloji ve çevre bilimleri öğrencileri arazi yapısı, eğim analizleri ve erozyon risklerini değerlendirebilir.

Araştırma bağlamında ise, eğik fotogrametri modelleri; tarihi yapıların dijital dokümantasyonu, kentsel gelişim ve dönüşüm analizleri, afet sonrası hasar değerlendirmeleri, ekolojik ve çevresel simülasyonlar gibi çok çeşitli çalışmalarda güvenilir veri sağlar. Bu sayede, fiziksel mekâna erişimin sınırlı veya riskli olduğu durumlarda bile, araştırmacılar karmaşık yapı ve arazi sistemlerini yüksek doğruluklu dijital ortamda analiz edebilir ve deneysel çalışmalarını sürdürebilir.

Modern eğitim ve araştırma ortamlarında, eğik fotogrametri tabanlı 3B modeller, interaktif görselleştirme, sanal laboratuvarlar ve AR/VR uygulamalarıyla birleştirilerek, öğrenme ve araştırma deneyimini zenginleştiren güçlü bir araç hâline gelmektedir.

4.13. Acil Durum Simülasyonları ve Risk Yönetimi

Eğik fotogrametri tabanlı yüksek doğruluklu 3B modeller, afet ve acil durum yönetimi süreçlerinde kritik bir veri altyapısı sunar. Bu modeller, şehir ölçeğinde mevcut binaların, yolların, köprülerin, yeşil alanların ve diğer altyapı elemanlarının üç boyutlu detaylı temsillerini sağlayarak, afet senaryolarının simülasyonunda etkin şekilde kullanılabilir.

Özellikle yangın, sel, deprem veya kentsel kazalar gibi acil durum senaryolarında, eğik fotogrametri

verileri; yangın yayılımı analizi, acil durum tahliye yollarının planlanması, trafik tıkanıklığının öngörülmesi, altyapı hasar tespiti ve müdahale lojistiğinin optimize edilmesi gibi uygulamalarda kullanılabilir. Bu sayede, afet yönetimi birimleri ve şehir planlamacıları, senaryoları dijital ortamda hızlıca test edebilir, riskli bölgeleri belirleyebilir ve kaynak dağılımını veri odaklı olarak planlayabilir.

Ayrıca, eğik fotogrametri ile elde edilen 3B modeller, dinamik simülasyonlar için temel veri setini sağlayarak, gerçek zamanlı veya önceden planlanmış acil durum müdahale stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunar. Bu kapsamda, risk yönetimi ve afet hazırlık çalışmaları daha güvenilir, hızlı ve kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilebilmekte; şehirlerin dayanıklılığı ve müdahale kapasitesi artırılmaktadır.

5. Yeni Yaklaşımlar ve Teknolojik Eğilimler

5.1. Yapay Zekâ ve Derin Öğrenme Tabanlı Otomasyon

Günümüzde eğik fotogrametri veri işleme süreçlerinde yapay zekâ (YZ) ve derin öğrenme (DL) algoritmalarının entegrasyonu, hem veri üretiminde otomasyonu artırmak hem de üç boyutlu model doğruluğunu yükseltmek açısından kritik bir dönüşümü temsil etmektedir. Özellikle Convolutional Neural Networks (CNN), U-Net ve Mask R-CNN gibi derin öğrenme mimarileri, karmaşık kentsel sahnelerde binaların cephe detayları, yollar, yeşil alanlar, köprüler ve diğer altyapı elemanlarının otomatik olarak tanımlanması, segmentasyonu ve sınıflandırılmasında yüksek performans göstermektedir. Bu yöntemler, klasik manuel müdahaleye dayalı model düzeltme ve veri temizleme süreçlerine olan ihtiyacı önemli ölçüde azaltmakta ve insan kaynaklı hata payını minimize etmektedir.

Derin öğrenme tabanlı algoritmalar, aynı zamanda görüntüler arasındaki eşleşme doğruluğunu artırarak yoğun nokta bulutu ve üç boyutlu model üretiminde daha tutarlı ve yüksek hassasiyetli sonuçların elde edilmesine imkân tanımaktadır. Özellikle karmaşık geometrik yapılar, cephe detayları, ağaç gövdeleri ve ince altyapı öğeleri gibi detaylar, otomatik olarak segment edilip sınıflandırılabilir; bu durum hem model kalitesini hem de veri bütünlüğünü artırmaktadır. Ayrıca, bu yöntemler, farklı perspektiflerden elde edilen eğik görüntülerde ortaya çıkabilecek örtüşme sorunlarını çözmede ve görüntü gürültüsünü azaltmada etkin bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve derin öğrenme destekli otomasyon, eğik fotogrametri veri işleme süresini önemli ölçüde kısaltmakta, büyük ölçekli kentsel ve kültürel miras modellerinin üretimini pratik

ve ölçeklenebilir hâle getirmekte, ayrıca şehir planlama, afet yönetimi, akıllı şehir uygulamaları ve sürdürülebilir kentsel tasarım gibi ileri düzey analizlerde güvenilir ve detaylı veri altyapısı sağlamaktadır. Bu teknolojik eğilimler, gelecekte üç boyutlu kentsel modelleme ve mekânsal veri analizi süreçlerinde hem doğruluk hem de veri üretim verimliliği açısından standardın yükselmesini öngörmektedir.

5.2. LiDAR ile Veri Füzyonu

Eğik fotogrametri verileri, hava veya kara tabanlı LiDAR (Light Detection and Ranging) ölçümleri ile entegre edildiğinde, üç boyutlu modellemede geometrik doğruluk ve yüzey detayında kayda değer iyileşmeler sağlanmaktadır [10,54]. Bu veri füzyonu yaklaşımı, özellikle yüksek binaların cepheleri, köprüler, tüneller ve karmaşık altyapı elemanları gibi dikey ve heterojen yapıların modellenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. LiDAR verileri, yüksek doğruluklu mesafe ve koordinat bilgisi sağlayarak eğik fotogrametri verilerinden elde edilen renk ve doku bilgisi ile birleştirildiğinde, hem geometri hem de görsellik açısından zenginleştirilmiş üç boyutlu modellerin üretilmesine olanak verir. Bu sayede, yalnızca mekânsal doğruluk artmakla kalmaz, aynı zamanda modelin görsel bütünlüğü ve dokusal detayları da optimize edilmiş olur.

Veri füzyonunun bir diğer kritik katkısı, klasik fotogrametrik rekonstrüksiyonlarda sıkça gözlemlenen yüzey boşlukları, çarpıtmalar ve düzensiz mesh oluşumlarını minimize etmesidir. LiDAR destekli entegrasyon sayesinde, binaların cephe düzlemleri, köprü ayakları, tünel girişleri ve diğer dikey altyapı elemanları daha düzgün ve gerçeğe yakın yüzeylerle temsil edilebilir. Bu, yoğun nokta bulutu ve mesh üretimi sırasında veri tutarlılığını artırmakta ve hata payını azaltmakta, böylece elde edilen üç boyutlu modeller hem sayısal analiz hem de görselleştirme uygulamaları için yüksek güvenilirlik sağlamaktadır.

LiDAR ve eğik fotogrametri verilerinin kombinasyonu, kentsel modelleme, akıllı şehir uygulamaları, afet ve risk yönetimi, altyapı denetimi ve kültürel miras dokümantasyonu gibi çok çeşitli alanlarda veri kalitesini ve analiz potansiyelini önemli ölçüde yükseltmektedir. Ayrıca, bu yaklaşım, büyük ölçekli şehir ve endüstriyel alan modellerinin hızlı, tutarlı ve doğru bir şekilde üretilmesini destekleyerek veri işleme süreçlerinde otomasyonu güçlendirmektedir. Sonuç olarak, eğik fotogrametri ve LiDAR veri füzyonu, üç boyutlu mekânsal modellemede doğruluk, detay zenginliği, veri bütünlüğü ve kullanım esnekliği açısından modern

veri işleme paradigmasının vazgeçilmez bir bileşeni hâline gelmiştir.

6. Karşılaşılan Zorluklar

Eğik fotogrametri, özellikle kentsel alanların üç boyutlu olarak yüksek doğrulukta modellenmesini sağlayan yenilikçi bir yöntemdir. Bununla birlikte, yöntemin sunduğu detay ve gerçekçilik düzeyine rağmen, veri toplama, işleme ve modelleme aşamalarında çeşitli teknik, operasyonel ve metodolojik zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklar, özellikle yoğun yapısal çeşitliliğe sahip, gölge etkilerinin belirgin olduğu ve yansıtıcı yüzeylerin yoğun bulunduğu büyük ölçekli kentsel alanlarda daha kritik hâle gelmektedir.

6.1. Radyometrik Bozulmalar ve Yansımalar

Eğik görüntüler, güneş ışığının geliş açısına daha duyarlıdır. Bu durum, özellikle yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeylerde (örneğin cam cepheler, metal kaplamalar, su yüzeyleri) radyometrik tutarsızlıklar ve yansıma kaynaklı bozulmalara yol açmaktadır. Renk doygunluğundaki değişimler, doku kaplama aşamasında görsel uyumsuzluklara neden olurken, fotogrametrik eşleştirme algoritmalarının performansını da düşürmektedir. Ayrıca, yansıma etkileri fotogrametrik bağlama (tie-point) süreçlerinde yanlış eşleştirmelere yol açarak, 3B model geometrisinde sistematik hatalar oluşturabilir. Bu sorunların azaltılması için radyometrik düzeltme algoritmaları, çoklu ışık koşullarına duyarlı derin öğrenme modelleri ve polarize filtre tabanlı çekim teknikleri geliştirilmektedir. Bu yöntemler, özellikle renk tutarlılığının korunması ve yansıma kaynaklı deformasyonların azaltılması açısından etkili sonuçlar vermektedir.

6.2. Gizlenme (Occlusion) ve Karmaşık Yapı Sorunları

Yoğun kentsel dokularda, özellikle dar sokaklar, yüksek binalar ve köprü altı gibi bölgelerde gizlenme (occlusion) önemli bir problem oluşturmaktadır. Eğik çekimlerde, kameranın görüş açısına bağlı olarak bazı yüzeylerin tamamen görünmemesi veya kısmen kapatılması, nokta bulutu üretiminde boşluklara (data voids) ve mesh yüzeylerinde düzensizliklere neden olur. Bu durum, özellikle bina cepheleri ve çatılar arasındaki geçiş bölgelerinde belirgindir. Gizlenme sorunlarının giderilmesi için çok yönlü (multi-angle) görüntüleme stratejileri, otomatik görüş planlaması ve görüş çizgisi (line-of-sight) analizi temelli uçuş optimizasyonu yöntemleri önerilmektedir. Ayrıca, derin öğrenme tabanlı yüzey

tamamlama (surface completion) algoritmaları, eksik alanların semantik bilgiyi kullanarak yeniden oluşturulmasını sağlamaktadır. Bu tür yaklaşımlar, kentsel alanların bütüncül ve kesintisiz olarak modellenmesine olanak vermektedir.

6.3. Büyük Veri Hacimleri ve İşlem Yüğü

Eğik fotogrametri uygulamalarında kullanılan yüksek çözünürlüklü kameralar ve çok sayıda çekim pozisyonu, milyonlarca veri noktasından oluşan devasa nokta bulutlarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu veri hacmi, özellikle büyük şehir modelleri oluşturulurken, hem depolama hem de işleme açısından önemli zorluklar doğurur. Uzun işlem süreleri, yüksek donanım gereksinimi ve veri yönetiminde ölçeklenebilirlik sorunları, sistemin etkinliğini sınırlandırır.

Son dönemde bu soruna yönelik olarak paralel işlemeye dayalı veri işleme mimarileri, bulut tabanlı fotogrametri platformları ve veri sıkıştırma algoritmaları geliştirilmiştir. Ayrıca, akıllı görüntü seçim teknikleri sayesinde, örtüşme oranı ve bilgi içeriği düşük görüntüler süreç dışı bırakılarak işlem yükü azaltılmaktadır. Böylece hem veri bütünlüğü korunmakta hem de işlem süresi önemli ölçüde kısalmaktadır.

6.4. Sensör Entegrasyonu ve Kalibrasyon Uyumsuzlukları

Eğik fotogrametri sistemleri, yüksek doğruluk ve çok yönlü veri elde etme gereksinimlerini karşılamak amacıyla sıklıkla çoklu sensör entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu sistemlerde, RGB, multispektral, termal veya LiDAR sensörleri, aynı platform üzerinde veya birbirini tamamlayıcı farklı sistemlerde kullanılabilir. Ancak, bu tür çoklu sensör konfigürasyonları, kalibrasyon uyumsuzlukları ve veri hizalama hataları gibi önemli zorlukları beraberinde getirmektedir. Her bir sensörün hem iç (intrinsik) hem de dış (ekstrinsik) parametrelerinin doğru biçimde belirlenmemesi, elde edilen modelin geometrik doğruluğunu, ölçüm hassasiyetini ve dokusal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle sensörler arası zaman senkronizasyonu, lens distorsiyonu ve koordinat dönüşüm parametrelerindeki küçük hatalar bile, üç boyutlu modelin genel tutarlılığında belirgin bozulmalara yol açabilmektedir.

Bu zorlukların giderilmesi için son yıllarda ortak kalibrasyon modelleri ve çok sensörlü veri füzyonu yöntemleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ortak kalibrasyon modelleri, farklı sensörlerin iç parametrelerini tek bir matematiksel çerçevede optimize ederek sistematik hataları azaltmayı

amaçlamaktadır. Buna karşılık, veri füzyonu yaklaşımları sensörlerin birbirini tamamlayan özelliklerinden yararlanır: LiDAR sistemleri yüzey geometrisini yüksek doğrulukla yakalarken, RGB veya multispektral kameralar dokusal ve spektral detayları sağlar. Bu iki veri türünün bütünleştirilmesiyle hem metrik doğruluk hem de görsel gerçekçilik aynı anda elde edilebilmektedir.

Özellikle LiDAR-fotogrametri entegrasyonu, karmaşık kentsel alanlarda öne çıkan en etkin hibrit yaklaşımlardan biridir. LiDAR verileri, eğik fotogrametri modellerinde sıklıkla karşılaşılan gölge ve gizlenme (occlusion) kaynaklı eksiklikleri gidermede önemli avantajlar sunar. Bunun yanında, RGB görüntülerden elde edilen renk ve doku bilgisi, LiDAR nokta bulutlarının görsel anlamda zenginleştirilmesini sağlar. Böylece, yüzey geometrisinin LiDAR'dan, dokusal bilginin ise fotogrametrik verilerden alınmasıyla yüksek doğruluk ve görsel bütünlük aynı anda sağlanabilmektedir.

Bu entegrasyon sürecinde, otonom kalibrasyon algoritmaları da giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Makine öğrenimi temelli bu algoritmalar, sensör parametrelerini dinamik olarak ayarlayarak manuel kalibrasyon ihtiyacını azaltmakta ve saha koşullarına bağlı hataları minimize etmektedir. Böylece eğik fotogrametri sistemleri, farklı sensör türlerinden gelen heterojen veriyi tutarlı, optimize edilmiş ve analize hazır bir bütün hâline getirebilmektedir.

7. Gelecekte Beklentiler ve Araştırma Alanları

Eğik fotogrametri, önümüzdeki yıllarda kentsel modelleme, akıllı şehir uygulamaları ve dijital şehir yönetimi alanlarında daha entegre ve otomatik hâle gelmesi beklenen kritik bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Özellikle otonom İHA'lar aracılığıyla veri toplama süreçlerinin hızlanması, esnekleşmesi ve maliyet etkin hâle gelmesi, büyük ölçekli kentsel alanların kısa sürede üç boyutlu olarak modellenmesini mümkün kılacaktır. Bu gelişmeler, veri toplama sürelerini önemli ölçüde azaltırken, farklı yüksekliklere ve erişim zorluklarına sahip bölgelerde modelleme kapasitesini artıracak, aynı zamanda saha operasyonlarının güvenliğini iyileştirecektir.

Buna paralel olarak, bulut tabanlı işlem altyapıları ve yüksek performanslı veri işleme servisleri, yoğun nokta bulutu üretimi, mesh oluşturma ve doku kaplama gibi işlem yoğun süreçleri daha ölçeklenebilir ve otomatik hâle getirecektir. Bu sayede, büyük şehirler veya geniş kentsel alanlar için veri işleme süreleri azalacak ve kullanıcı müdahalesi minimuma indirilecektir. Aynı zamanda, bulut tabanlı işleme, farklı kullanıcıların eş zamanlı erişimi ve veri

paylaşımını kolaylaştırarak işbirlikçi şehir planlama süreçlerini destekleyecektir.

3B veri standardizasyonu (ör. CityGML, 3D Tiles) ile eğik fotogrametri tabanlı modeller, farklı CBS platformları, simülasyon araçları ve akıllı şehir uygulamalarıyla uyumlu hâle gelecektir. Standart veri formatları, farklı veri kaynaklarının ve sensörlerin entegrasyonunu kolaylaştırarak, çok katmanlı analizler, model güncellemeleri ve uzun dönemli şehir yönetimi çalışmalarında esnek bir altyapı sunacaktır. Böylece, veri tekrar kullanımını ve disiplinler arası entegrasyonu artıran, sürdürülebilir bir şehir veri ekosistemi oluşturulacaktır.

Gelecekte, eğik fotogrametri ile üretilen yüksek doğruluklu ve detaylı 3B modeller, AR/VR platformları ile bütünleşerek kentsel planlama, halk katılımı, eğitim ve kültürel miras uygulamalarında daha aktif bir rol oynayacaktır. Sanal şehir turları, interaktif planlama simülasyonları ve halkın katılımını artıran dijital platformlar, karar alma süreçlerini destekleyecek ve planlama şeffaflığını artıracaktır. Ayrıca, bu modeller eğitim amaçlı kullanımlarda öğrencilerin mekânsal farkındalığını artırmak ve karmaşık kentsel yapıları dijital ortamda incelemelerini sağlamak için önemli bir araç olarak hizmet edecektir [5,9].

Sonuç olarak, eğik fotogrametri, otonom veri toplama, bulut tabanlı işleme ve veri standardizasyonu ile birleştiğinde, kentsel modelleme ve akıllı şehir uygulamaları için veri kalitesi, analiz doğruluğu ve kullanım esnekliği açısından geleceğin vazgeçilmez teknolojilerinden biri olarak konumlanmaktadır. Bu entegrasyon, hem karar destek sistemlerini güçlendirecek hem de şehirlerin sürdürülebilir ve veri odaklı yönetimi için sağlam bir temel sağlayacaktır.

8. Sonuç

Eğik resim fotogrametrisi, kentsel alanların yüksek doğruluklu, üç boyutlu ve görsel olarak gerçekçi temsili konusunda devrim niteliğinde bir teknolojidir. Bu yöntem, yalnızca estetik bir modelleme aracı olmanın ötesinde, mekânsal analizler, mühendislik uygulamaları, afet yönetimi, altyapı planlaması ve kentsel stratejik karar destek sistemleri için kritik veri sağlamaktadır. Özellikle gelişen sensör teknolojileri ve otonom İHA'lar aracılığıyla hızlı veri toplama imkânı, yapay zekâ ve derin öğrenme tabanlı otomasyon süreçleri ile veri işleme verimliliğinin artırılması, eğik fotogrametriyi büyük ölçekli kentsel modellemede öncelikli bir araç hâline getirmektedir.

Ayrıca LiDAR, multispektral ve termal görüntülerle füzyon çoklu veri entegrasyonu verinin geometrik doğruluğunu ve detay zenginliğini artırmakta; 3B şehir modellerinin hem görsellik hem de analitik kullanım açısından çok boyutlu değer

sunmasını sağlamaktadır. Bu yöntem sayesinde, binaların cephe detayları, altyapı elemanları, yeşil alanlar ve karmaşık kentsel dokular, hem görsel hem de ölçümsel olarak yüksek doğrulukla temsil edilebilmektedir.

Gelecek perspektifleri açısından, eğik fotogrametri teknolojisinin bulut tabanlı işleme altyapıları, standart veri formatları (CityGML, 3D Tiles) ve AR/VR platformları ile entegrasyonu, kentsel planlama ve halk katılım süreçlerinde daha aktif ve etkileşimli kullanım olanakları sunacaktır. Bu gelişmeler, şehirlerin veri odaklı yönetimini güçlendirirken, afet ve risk yönetimi, enerji ve sürdürülebilirlik analizleri, ulaşım ve mobilite sistemleri gibi alanlarda daha hızlı, güvenilir ve kapsamlı karar alma süreçlerini destekleyecektir. Sonuç olarak, eğik fotogrametri, doğruluk, detay zenginliği ve kullanım esnekliği açısından, modern kentsel modelleme ve akıllı şehir uygulamalarının merkezinde yer alan kritik bir teknoloji olarak konumlanmaktadır.

Yazarların Katkısı

Hacı Murat Yılmaz: Literatür tarama, Düzenleme,
Murat Yakar: Veri analizi, yorumlama

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Yalçın, G. (2015). 3D city modelling with oblique photogrammetry method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.005>
- [2] Toschi, I. (2017). Oblique photogrammetry supporting 3D urban reconstruction of complex scenarios. *ISPRS Archives, XLII-1/W1*, 519-524. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-W1-519-2017>
- [3] Wang, X. (2023). Oblique photogrammetry supporting procedural tree modeling in urban areas. *Computers, Environment and Urban Systems*, 92, 101875. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101875>
- [4] Oniga, V.-E., Breaban, A.-I., Pfeifer, N., & Diac, M. (2022). 3D modeling of urban area based on

- oblique UAS images—An end-to-end pipeline. *Remote Sensing*, 14(2), 422. <https://doi.org/10.3390/rs14020422>
- [5] Qiao, L. (2025). Research on the refinement of 3D models based on oblique photogrammetry. *Proceedings of SPIE*, 13642, 136421X. <https://doi.org/10.1117/12.3066957>
- [6] Zhang, X. (2024). A 3D urban scene reconstruction enhancement approach using ground panoramic videos. *The Photogrammetric Record*, 39(207), 1–15. <https://doi.org/10.1111/phor.12467>
- [7] Unal, M., Yakar, M., & Yildiz, F. (2004, July). Discontinuity surface roughness measurement techniques and the evaluation of digital photogrammetric method. In *Proceedings of the 20th International Congress for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)* (Vol. 1103, pp. 1103–1108).
- [8] Yilmaz, H. M., Yakar, M., & Yildiz, F. (2008). Digital photogrammetry in obtaining of 3D model data of irregular small objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 125–130.
- [9] Yakar, M., Orhan, O., Ulvi, A., Yiğit, A. Y., & Yüzer, M. M. (2015). *Sahip Ata Külliyesi röle örneği* (p. 10). TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.
- [10] Yilmaz, H. M., Karabörk, H., & Yakar, M. (2000). Yersel fotogrametrinin kullanım alanları. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1.
- [11] Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı fotogrametrik röle alımı ve üç boyutlu modelleme çalışması. *Geomatik*, 2(1), 11–17.
- [12] Alyilmaz, C., Alyilmaz, S., & Yakar, M. (2010). Measurement of petroglyphs (rock of arts) of Qobustan with close range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 5), 29–32.
- [13] Yakar, M., Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2013). 3D modeling of historical doger caravansaries by digital photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 695–698.
- [14] Yakar, M., Yilmaz, H. M., Güleç, S. A., & Korumaz, M. (2009). Advantage of digital close-range photogrammetry in drawing of muqarnas in architecture. *Information Technology Journal*, 8(2), 202–207.
- [15] Yakar, M., Yildiz, F., Alyilmaz, C., & Yilmaz, H. M. (2009). Photogrammetric study for Siricali Medrese Door. In *9th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2009)* (pp. 879–884).
- [16] Şahin, İ., & Yakar, M. (2008). Farklı kaynaklardan elde edilen sayısal yükseklik modellerinin ortofoto doğruluğuna etkilerinin araştırılması. *Harita Dergisi*, 74(140), 45–59.
- [17] Li, Q., Yu, W., & Jiang, S. (2022). Optimized views photogrammetry: Precision analysis and a large-scale case study in Qingdao. *arXiv preprint arXiv:2206.12216*. <https://arxiv.org/abs/2206.12216>
- [18] Xu, J. (2024). Improving real-scene 3D model quality of unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry. *Remote Sensing*, 16(21), 3933. <https://doi.org/10.3390/rs16213933>
- [19] Wu, B. (2021). Photogrammetry for 3D mapping in urban areas. In *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (pp. 199–204). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_23
- [20] Haala, N., & Rothermel, M. (2015). Multi-scale impact of multisensor aerial image datasets for 3D city model generation. *Remote Sensing*, 7(12), 16330–16352. <https://doi.org/10.3390/rs71216330>
- [21] Villi, O., & Yakar, M. (2024). Sensor technologies in unmanned aerial vehicles: Types and applications. *Advanced UAV*, 4(1), 1–18.
- [22] Zhang, X., Zhao, P., Hu, Q., Ai, M., Hu, D., & Li, J. (2020). A UAV-based panoramic oblique photogrammetry (POP) approach using spherical projection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 198–219.
- [23] Tükenmez, F., & Yakar, M. (2023). Production of road maps in highway projects by unmanned aerial vehicle (UAV). *Advanced Engineering Days (AED)*, 6, 94–96.
- [24] Grenzdörffer, G. J., Guretzki, M., & Friedlander, I. (2008). Photogrammetric image acquisition and image analysis of oblique imagery. *The Photogrammetric Record*, 23, 372–386.
- [25] Ünel, F. B., Kuşak, L., Çelik, M., Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Kıyı çizgisinin belirlenerek mülkiyet durumunun incelenmesi. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 2(1), 33–40.
- [26] Jiang, S., & Jiang, W. (2017). Efficient structure from motion for oblique UAV images based on maximal spanning tree expansion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 140–161.
- [27] Kanun, E., Alptekin, A., Karataş, L., & Yakar, M. (2022). The use of UAV photogrammetry in

- modeling ancient structures: A case study of "Kanytellis". *Advanced UAV*, 2(2), 41–50.
- [28] Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik*, 3(2), 129–136.
- [29] Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve sensör tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73–100.
- [30] Yakar, M., & Doğan, Y. (2017). Mersin Silifke Mezgit Kale Anıt Mezarı fotogrametrik röle alımı ve üç boyutlu modelleme çalışması. *Geomatik*, 2(1), 11–17.
- [31] Karataş, L., Alptekin, A., Karabacak, A., & Yakar, M. (2022). Detection and documentation of stone material deterioration in historical masonry buildings using UAV photogrammetry: A case study of Mersin Sarisih Inn. *Mersin Photogrammetry Journal*, 4(2), 53–61.
- [32] Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik*, 3(2), 129–136. Yılmaz, H. M., Mutluoğlu, Ö., Ulvi, A., Yaman, A., & Bilgilioğlu, S. S. (2018). İnsansız hava aracı ile ortofoto üretimi ve Aksaray Üniversitesi kampüsü örneği. *Geomatik*, 3(2), 129–136.
- [33] Petrie, G. (2009). Systematic oblique aerial photography using multiple digital frame cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75, 102–107.
- [34] Mohammed, O., & Yakar, M. (2016). Yersel fotogrametrik yöntem ile ibadethanelerin modellenmesi. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 15(2), 85–95.
- [35] Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve sensör tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73–100.
- [36] Alptekin, A., & Yakar, M. (2020). Heyelan bölgesinin İHA kullanarak modellenmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 17–21.
- [37] Yılmaz, H. M., & Yakar, M. (2006). Yersel lazer tarama teknolojisi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 43–48.
- [38] Yılmaz, H. M., & Yakar, M. (2006). LiDAR (Light Detection and Ranging) tarama sistemi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(2), 23–33.
- [39] Kanun, E., Metin, A., & Yakar, M. (2021). Yersel lazer tarama tekniği kullanarak Ağzıkara Han'ın 3 boyutlu nokta bulutunun elde edilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 3(2), 58–64.
- [40] Kanun, E., Alptekin, A., & Yakar, M. (2021). Cultural heritage modelling using UAV photogrammetric methods: A case study of Karlıdivane archeological site. *Advanced UAV*, 1(1), 24–33.
- [41] Korumaza, A. G., Korumaz, M., Dulgerler, O. N., Karasaka, L., Yıldız, F., & Yakar, M. (2010). Evaluation of laser scanner performance in documentation of historical and architectural ruins: A case study in Konya. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5), 361–366.
- [42] Yılmaz, H. M., Yakar, M., Yıldız, F., Karabork, H., Kavurmacı, M. M., Mutluoğlu, O., & Göktepe, A. (2009). Monitoring of corrosion in fairy chimney by terrestrial laser scanning. *Journal of International Environmental Application & Science*, 4(1), 86–91.
- [43] Yakar, M., & Yılmaz, H. M. (2011). Determination of erosion on a small fairy chimney. *Experimental Techniques*, 35(5), 76–81.
- [44] Yılmaz, H. M., Yakar, M., Yıldız, F., Karabork, H., Kavurmacı, M. M., Mutluoğlu, Ö., & Göktepe, A. (2010). Determining rates of erosion of an earth pillar by terrestrial laser scanning.
- [45] Mesas-Carrascosa, F. J., García María, D. N., de Larriva, J. E. M., & García-Ferrer, A. (2016). An analysis of the influence of flight parameters in the generation of unmanned aerial vehicle (UAV) orthomosaics to survey archaeological areas. *Sensors*, 16, 1838.
- [46] Erenoglu, R. C., Akcay, O., & Erenoglu, O. (2017). An UAS-assisted multi-sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 79–90.
- [47] Wierzbicki, D. (2018). Multi-camera imaging system for UAV photogrammetry. *Sensors*, 18(8), 2433.
- [48] Aicardi, A., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spano, A. (2016). UAV photogrammetry with oblique images: First analysis on data acquisition and processing. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 835–842.
- [49] Cavegn, S., Haala, N., Nebiker, S., Rothermel, P., & Tutzauer, P. (2014). Benchmarking high density image matching for oblique airborne imagery. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3, 45–52.

- [50] Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2017). Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 1–18.
- [51] Li, J., Yao, Y., Duan, P., Chen, Y., Li, S., & Zhang, C. (2018). Studies on three-dimensional (3D) modeling of UAV oblique imagery with the aid of loop-shooting. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9), 356.
- [52] Wu, B., Xie, L., Hu, H., Zhu, Q., & Yau, E. (2018). Integration of aerial oblique imagery and terrestrial imagery for optimized 3D modeling in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 119–132.
- [53] Galeazzi, F. (2017). 3D recording, documentation and management of cultural heritage. *International Journal of Heritage Studies*, 23(7), 671–673.
- [54] Gerke, M. (2010). Dense matching in high resolution oblique airborne images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-3-W4, 77–8



© Author(s) 2025.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>