

Yerinde Yapısal Denetime Alternatif Olarak Dijital İkiz Kullanarak Otomatik Çatlak Tespiti ve WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik ile Görselleştirme

Abdurahman Yasin Yiğit^{*1}, Murat Uysal^{2,3},

^{*1}Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, MERSİN

²Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, AFYONKARAHİSAR

²Afyon Kocatepe Üniversitesi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, AFYONKARAHİSAR

(Alınış / Received: 07.05.2024, Kabul / Accepted: 10.07.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.08.2024)

Anahtar Kelimeler

Yapısal Denetim,
Çatlak Tespiti,
SfM,
Dijital İkiz,
Sanal Gerçeklik

Öz: Yerinde denetimin ve analizinin zor olduğu nesne ve yapıları 3B bir ortamda görselleştirmek yapısal denetimlere farklı bakış açıları kazandırmaktadır. Bu çalışmada, yapısal denetimler için dijital ikiz çerçevesini kullanan yeni bir araştırma konusu önerilmektedir. Bunu uygulanabilir kılmak için ilk önce fotogrametri yöntemi aracılığıyla seçilen test nesnesinin dijital 3B modeli oluşturulmuştur. Üretilen 3B modelden daha sonra Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini makine öğrenimi ve derin öğrenme dedektörleri algoritmaları ile, 3B model içindeki yüzey farklılıkları analiz edilerek çatlaklar tespit edilmiştir. Ardından 3B model ile tespit edilen çatlaklar birleştirilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Üretilen hasarla artırılmış dijital ikiz son olarak WEB tabanlı sanal gerçeklik ortamına aktarılarak çeşitli uzmanlara hızlı bir analiz yapma imkânı sağlanmıştır. Bu sayede yerinde denetimlere bir çözüm sunulmasının yanı sıra çeşitli uzman görüşlerine hızlı denetim gerçekleştirilmiştir. Önerilen metodolojiyi modern bir yapı parçasında uygulanmış ve doğruluk analizinde 3B modelin geometrik doğruluğunun yanı sıra tespit edilen çatlakların doğruluğu da incelenmiştir. Sonuç olarak 0.97 cm'lik bir RMSE ile otomatik çatlak tespit doğruluğu sağlanmıştır.

Automated Crack Detection Using Digital Twin as An Alternative to In-Situ Structural Inspection and Visualization with WEB-Based Virtual Reality

Keywords

Structural Inspection,
Crack Detection,
SfM,
Digital Twin,
Virtual Reality

Abstract: Visualising objects and structures in a 3D environment, which are difficult to inspect and analyse in situ, brings different perspectives to structural inspections. In this paper, a new research topic using the digital twin framework for structural inspections is proposed. In order to make it feasible, a digital 3D model of the selected test object is first created through photogrammetry method. From the generated 3D model, cracks are then detected by analysing the surface differences within the 3D model with Neighborhood Aggregation and Curvature Estimation machine learning and deep learning detectors algorithms. Then, the cracks detected with the 3D model were merged and a damage-augmented digital twin was produced. Finally, the produced damage-augmented digital twin was transferred to the WEB-based virtual reality environment and various experts were provided with the opportunity to make a quick analysis. In this way, in addition to providing a solution for on-site inspections, rapid inspection was carried out for various expert opinions. The proposed methodology was applied to a modern building part and the accuracy of the detected cracks as well as the geometric accuracy of the 3D model was examined in the accuracy analysis. As a result, automatic crack detection accuracy with an RMSE of 0.97 cm was achieved.

*İlgili Yazar, email: abdurahmanyasinyigit@gmail.com

1. Giriş

Altyapı sistemleri ve yapılar, düzenli olarak veya bir doğal afetin hemen ardından yapısal yönetmeliğe göre sorumlu mühendisler tarafından görsel olarak yerinde denetlenmektedir [1]. Uygun bir uzman değerlendirme süreci, hasarlı yapıların potansiyel arızalarını önlemekte olup insan yaşamı ve ekonomik kayıplar için herhangi bir tehlike oluşturabilecek sonuçları en aza indirmektedir [2]. Bir inceleme sırasında mühendisler, yapısal bileşenlerdeki hasarları görsel olarak yerini belirlemeye çalışır ve ardından bu yapının hizmet vermeye uygun olup olmadığını, ek analiz gerektirip gerektirmediğini, güçlendirme gerektirip gerektirmediğini veya yıkılması gerekip gerekmediğini belirlemeye çalışmaktadır [3]. Özellikle çatlaklar, beton veya duvar gibi kırılabilir yapılarda inceleme sırasında en sık gözlemlenen hasar şeklidir ve bu da çatlakları yapısal denetimde çok önemli hale getirmektedir. Bu yüzden çatlakların sürekli olarak denetlenmesi gerekmekte olup bu süreç uzun yıllardır geleneksel yöntemlerle yapılmaktadır. Fakat geleneksel yapı denetimlerinin başlıca sınırlamaları bulunmaktadır. Özellikle nesnellikten yoksun olması, uzun uygulama süresi, önemli maliyetler ve zararları belgelemenin zorluğu ön plana çıkmaktadır. Bu dezavantajlar çatlak tespitinde yardımcı olacak yeni değerlendirme metodolojilerine olan ihtiyacı giderek artırmaktadır.

Yapıların hızlı bir şekilde denetlenmesine yönelik mevcut prosedürler subjektif, zaman alıcı ve belgelenmesi külfetli olduğundan dolayı süreci otomatikleştirmek ve eksiklikleri ortadan kaldırmak için yeni teknolojiler kullanılmalıdır [4]. Görüntü ve menzil tabanlı veri toplama yöntemleri ve bilgisayar görüşü gibi yapay zekadaki son gelişmeler henüz yapı ve altyapı uygulamalarına bütünleşmiş çalışmaları yoğun olmasa da bunun için gerekli çalışmalar hız kazanmış durumdadır ve olumlu katkılar alınmaktadır [5]. Hasar değerlendirmesinde mevcut en son teknoloji olarak derin öğrenme ve fotogrametri (görüntü tabanlı yöntem) yöntemleri [6] dâhil olmak üzere bilgisayarla görme teknikleri ile görüntü verilerini kullanan Sanal Gerçeklik (SG) destekli dijital ikiz teknolojisi karşımıza çıkmaktadır [2]. Bu teknolojilerin en önemli avantajı geleneksel denetimler sırasında özelliği, maliyeti ve operasyon süresini azaltması gösterilmekte olup sürecin olabildiğince hızlı ve doğru olmasının başında tam ve eksiksiz bir üç boyutlu (3B) model üretmek gelmektedir. 3B modeller dijital ikiz oluşturmanın ilk aşaması olup bu modellerin doğruluğu denetimin doğruluğunu da direkt etkilemektedir. Bu noktada özellikle görüntü tabanlı yöntemlerden olan fotogrametri yöntemi 3B model üretiminde ilk başta gelmektedir [7-9]. Teknolojinin gelişmesi ve fotogrametri yönteminde kullanılan hareket tabanlı yapısal algılama (Structure from motion/SfM) ve çoklu-görüntü stereo (Multi View Stereo/MVS) algoritmaları ile bir nesnenin yüksek kaliteli fotogerçekçi 3B sahneleri yeniden oluşturmak için dokulu kafesler olarak ayrıntılı modeller hızlı bir şekilde üretebilmektedir [10, 11]. Bu algoritmalar ile üretilen modellerin doğruluğu kanıtlanmasına rağmen [12] ortaya çıkan verinin boyutu önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden üretilen 3B modellerin diğer kullanıcılara aktarımında büyük veri problemi ortaya çıkmaktadır. Modellerin diğer kullanıcılara aktarımında SG kullanılması özellikle yapılar için SG destekli dijital ikizler ile, geometrik bilgilerin yanı sıra hasar koşullarına ve karakterizasyonlarına ilişkin verileri içeren uçtan uca bir çözüm oluşturabilmektedir [13].

Son yıllarda yapılan birçok çalışma, binaların yapısal sağlığını izlemek için dijital ikizleri kullanarak umut verici sonuçlar vermiştir. Örneğin, Barazzetti ve arkadaşları [14], SG uygulamalarında kullanılmak üzere tarihi bina bilgi modellemesi biçiminde dijital ikizler oluşturmak için fotogrametrik bir prosedür tanımladı. Hoskere ve arkadaşları [15], derin öğrenme modelleri tarafından tespit edilen ve fotogrametrik 3B model kullanılarak kusurlara sahip dokulu bir 3B bina modeli içeren yapı modelleri sundular. Yöntemleri, hasar değerlendirme belgeleri için yararlı bir başlangıç noktası olsa da yalnızca tek bir binada test edildi, fakat çalışmada hasar karakterize edilmedi. Jouan ve arkadaşları [16] miras yerlerinin önleyici korumasını desteklemek için tarihi bina bilgi modelleri dijital ikiz olarak kullandılar. Angeliu ve arkadaşları [17], yağma binaların yapısal sisteminin bütünlüğünü incelemek ve önleyici bakım ve olası güçlendirme müdahaleleri dâhil olmak üzere sistem tepkisini spesifik olarak analiz etmek için dijital ikiz kullandı. Ayrıca 2022'deki Zagreb ve Petrinja depremlerinden sonra fotogrametri ve lazer tarama gibi yeni teknolojileri ile doğal afetler ve yapısal bakımdan sonraki hasar değerlendirmeleri için dijital ikizlerin oldukça önemli olduğu Stepinac ve arkadaşları [18] tarafından yapılan çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Çalışmaları, hasar değerlendirmesini iyileştirmek için yeni teknolojilerden toplanan veriler için nesnellik, zaman ve dokümantasyon açısından uygulamanın önemini göstermiştir. Yapısal bakımı izlemek ve tanımlamak için Rainieri ve arkadaşları [19], dijital ikizlerin kullanımını yapı bilgi modellemesi şeklinde sundu. Levine ve arkadaşları [20] insansız hava aracı görüntüleri, bileşen tanımlama ve hasar değerlendirmesi ile deprem sonrası bina değerlendirmesi için bir dijital ikiz çerçevesi önerdi.

Fotogrametri yöntemi ile üretilen dijital ikizler ile SG destekli yapısal analizlerin amacı bir varlığın hizmet ömrü boyunca izlenmesi için otomatik hasar değerlendirmelerine doğru ilerlemektir. Bu metodolojinin bir denetim sırasında toplanan bilgileri daha verimli bir şekilde belgeleyeceğine, nesnelliği artıracaklarını ve operasyon süresini kısaltacağı bilinmektedir [17]. Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B model ile otomatik tespit edilen hasarların entegrasyonundan oluşan hasarla artırılmış dijital ikizler, sayısal yöntemler kullanılarak mekanik analiz gibi daha derinlemesine hasar değerlendirme faaliyetleri için yararlı olabilmektedir. Bu amaç doğrultusunda çatlakları olan

bir yapı varlığının 3B yeniden yapılandırılmış geometrisini ve bunların karakterizasyonunun entegrasyonun getirdiği avantajların SG ile desteklenmesinin yerinde yapı denetimlerine alternatif olması büyük avantajlar sağlamaktadır. Mevcut hasar değerlendirme yöntemleri bu alanlardaki teknikleri kullansa da hasarı tespit etmek veya belirli bir varlık için bir dijital ikiz oluşturmak gibi bazı manuel müdahaleler de gerektirebilecek belirli görevlerle sınırlıdır. Bunun için, 3B bina modelleri oluşturmak ve çatlakları görüntülerden anlamsal olarak bölümlere ayırmak ve karakterize etmek için çok sayıda metodoloji birleştirilmelidir [68]. Örneğin bu çalışmada da 3B model üretimi için kullanılan SfM tabanlı fotogrametri için uygun yapı varlığının çoklu görünüm görüntüleri gerekmektedir. Çalışmamızın temel ayırt edici özelliği, tespit edilen çatlakların iki boyutlu görüntülerin aksine 3B modellerden elde edilmesidir. Bu nedenden dolayı Fotogrametri ile üretilen yüksek kalitedeki fotogerçekçi 3B modeller çalışmanın en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Çatlakları 3B model üzerinden tespit etmek için yapay zekâ algoritmaları kullanılmıştır. Bunun için Bentley tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme araçları kullanılmıştır. Bu araçlar ilk olarak Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmalarıdır ve bunlar makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarını kullanmaktadır. Bu çalışmada, önceden var olan kütüphaneler kullanılmış ve çalışma alanı için en uygun parametreler geliştirilmiştir. Kütüphanedeki ve çalışma alanındaki verilerin uyumluluğu sonuçların doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, 3B model içindeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit edebilmektedir. Kullanılan dedektörler aslında bir nesne algılama aracıdır. Özüde, algoritma üretilen dijital ürünler temelinde çalışır [49-52,68]. İlk olarak 3B modeli bir dizi nokta bulutu olarak temsil ederek operasyonel sürecini başlatır. Daha sonra, yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analize tabi tutulur. Son olarak, yüzeylerdeki farklılıklar nedeniyle çatlakların varlığı tespit edilir. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için kullanılan özellikler arasında çatlak olarak kabul edilecek yüzey farklılıklarının minimum değeri, çatlakların yönü ve minimum uzunluğu, çatlakların minimum genişliği ve yüzey farklılıklarının yumuşatma değeri belirlenir ve çatlaklar tespit edilir.

Tespit edilen çatlaklar ile fotogrametrik 3B model bilgisinin birleştirilmesi ile hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Bu dijital ikiz birden fazla metodolojinin entegrasyonu ile oluşturulmaktadır. Hasarla artırılmış dijital ikizler aslında fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B model ile tespit edilen çatlak bilgilerin bütünleştirildiği (3Bmodel+çatlak) ve yapının geometrik bilgilerin birleştirildiği yeni bir modeldir. Bu model mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında yapı ömrünün denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli WEB tabanlı platformlarda kullanılabilir. Dijital ikizlerin SG ortamında sunulması, yapı yönetimindeki uzman görüşlerin arttırılmasına olanak sağlayacaktır. Bu sayede diğer mühendislik çalışmalarında daha fazla mühendis ve uzmanla yapılan görüşmeler, farklı anlayışlara yol açabilir ve araştırmanın genellenabilirliğini artırabilir. Ayrıca, kullanıcıların yapı denetimi eylemlerine gerçek zamanlı olarak yanıt veren dinamik içerikle etkileşim kurulması sağlanabilmektedir. Bu sanal ortamda, gerçek dünya koşullarını, olasılık senaryolarını ve akla gelebilecek her türlü durumu etkin bir şekilde simüle edebilir ve sonuçlar anlık olarak değerlendirilebilir [21-23]. Yerinde denetimlere alternatif olan hasarla artırılmış dijital ikiz ile en güncel ve gerçekçi bir model ile etkileşim kurma yeteneği, insanların tasarım, operasyon ve bakım kararlarını alma şeklini değiştirmektedir. Karmaşık işlemleri gerçek zamanlı 3B olarak görselleştirme ve simüle etme gücü, insanların varlıklarıyla etkileşim kurma biçimini yükselterek gezegendeki her fiziksel alan ve varlığın yaratılma, inşa edilme ve işletilme şeklini dönüştürmektedir.

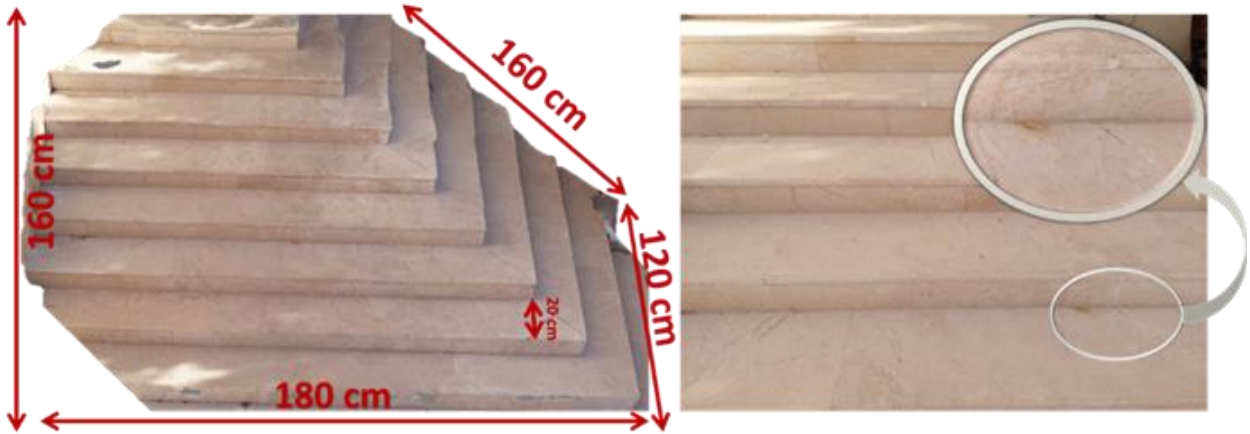
Bu çalışma dijital ikiz ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini araştırmaktır. Dijital ikizlerin mevcut uygulamalarda kullanılmasında çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Dijital ikizleri mevcut uygulamada uygulamak için önce bir 3B veri modeli geliştirmek gerekir. Ancak, bir 3B veri modeli geliştirmek teknik olarak karmaşık ve finansal olarak pahalıdır. Mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında dijital ikizlerin uygulanmasının, yapı durumunun denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli kullanımının uygulanması önemli bir aşama olacaktır. Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli doğru ve hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramında geçmektedir. Çalışma kapsamında otomatik bir yapısal denetim simüle etmek için birçok çatlak barındıran test nesnesi seçilmiştir. Test nesnesine ait ilk olarak fotogrametri yöntemi ile 3B model elde edilmiş ardından otomatik bir şekilde çatlaklar tespit edilmiştir. Daha sonra tespit edilen çatlaklar ile 3B model entegre edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Üretilen bu dijital ikiz WEB tabanlı SG gibi görselleştirme araçları ile kullanıcılara aktarılması ile analiz ve temsile önemli katkılar sunulmuştur. Sonuç olarak elde edilen yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak çeşitli görselleştirme araçları ile aktarılıp farklı kullanıcılara sunulmuştur. Çalışma sonunda elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine, 3B modeller üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına ve çeşitli platformlarda sunumuna katkı sağlayacaktır. Ayrıca çalışmada elde edilen bulgular daha büyük bir yapısal denetim çalışmalarına altlık olacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Nesnesi ve Materyal

Çalışmamızın uygulama kısmı iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama yöntemimizi test ettiğimiz yakın resim fotogrametri ile 3B model üretmeyi kapsamaktadır. İkinci aşama ise 3B model kullanılarak otomatik çatlak tespitini oluşturmaktadır. Testimizde modern bir binanın giriş kısmındaki merdiven yapısında meydana gelen çatlaklar önerilen yöntemle otomatik olarak tespit edilmektedir. Bu test sonucunda merdivenin fotogrametrik 3B modeli üretilmiş ve çatlaklar otomatik olarak tespit edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilmiştir. Seçilen merdiven yapısı 200x160x100 cm boyutlarındadır (Şekil 1). Test nesnesinin basit formu ve modern yapı malzemelerinden oluşması çalışmamız için seçilmesinde etken olmuştur. Test nesnesindeki çatlaklar (Şekil 1 sağ) onu amaçlanan test yöntemi için ideal hale getirmektedir.

Testte, 14,2 Megapiksel DX-format sensörlü (piksel boyutu 5,26 μm) ve odak uzaklığı 35 mm Nikkor lens ile donatılmış bir Nikon D3100 dijital kamera kullanılarak 35 görüntü toplanmıştır. Test nesnesi olarak seçilen merdiven, yapının dış bağlantısını oluşturduğu için bulut etkisinden kaçınmak amacıyla bulut örtüsünün %15'in altında olduğu sabah 11 ile 12 arasında görüntüler toplanmıştır. Fakat seçilen test alanının etrafındaki nesnelere dolayı tam olarak gölgelerden kaçınılamamıştır. Görüntü alma mesafesi yaklaşık 500 mm olarak ayarlanmış olup kabaca 1:15'lik bir görüntü ölçeği ve yaklaşık 0,07 mm'lik bir yer örnekleme aralığı (YÖA) ile elde edilmiştir. Önerilen yaklaşımda tespit edilen çatlakların hassasiyeti, kullanılan görüntü verilerinin kalitesiyle doğrudan bağlantılıdır. Uygulanan yöntem piksel başına 1 cm görüntü çözünürlüğü için maksimum YÖA değeri önerdiğinden dolayı testimizde ve uygulamanın yapıldığı nesnenin görüntü verisi alımında bundan daha iyi YÖA değerleri için veri toplanılmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 1. Test nesnesi genel görünümü ve ayrıntılı bir kısım

Yakın resim fotogrametride anlık konumlandırma sistemleri kullanılmadığı durumlarda 3B modeller birim veya ölçek olmaksızın yerel/lokal koordinatlarda üretilmektedir. Bu nedenle 3B modeli ölçeklendirmek ve metrik referans koordinatlarına dönüştürmek için çalışma alanlarında kontrol noktalarına/hedef ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu çalışmada seçilen test nesnesi için çalışma ortamının dar olması alana hedef işaretlerini yerleştirilememesine sebep olmuştur. Bu yüzden alanda doğal hedef işaretlerinden yararlanılmış ve köşe birleşim noktalarından 21 tane doğal hedef işareti seçilmiştir. Bunlardan on üç tanesi fotogrametrik hizalama için kontrol noktası olarak kalan diğer sekiz tanesi ise model doğruluğu için denetleme noktası olarak kullanılmıştır. Çalışmada hedef ölçümü için Topcon ES-60 total-station kullanılmıştır. Dar çalışma alanları ve kısa mesafeler nedeniyle ölçüm boyunca reflektörsüz mod kullanılmıştır. Test alanlarında cihaz ile hedef işaretleri arasındaki maksimum mesafe 5 metreden az olduğundan koordinatlar 3,01 mm (3mm+2 ppm) hassasiyetle ölçülmüş ve bu da cihaz seçimini etkilemiştir. Fotogrametrik veriler toplandıktan sonra uzman mühendis gözetiminde test alanında manuel (Çatlak genişlik ölçer ve uzunluk ölçüm cihazı) bir şekilde seçilen bazı çatlaklarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler doğruluk analizi için klasik yöntemden elde edilen çatlak ile önerilen yöntemden tespit edilen ölçümlerin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

2.2. Fotogrametri Yöntemi ile 3B Model Üretme

Fotogrametri, somut varlıkların ve komşu çevrelerinin nitelikleri hakkında güvenilir bilgiler elde etmek için görsel temsilleri ve elektromanyetik dalgaların yayılımını kaydeden, araştıran, ölçen ve analiz eden bir disiplindir [24-26]. Bu teknik, doğal çevrenin mekânsal özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını kolaylaştırır ve yüzeyde

zaman içinde meydana gelen kademeli değişikliklerin tespit edilmesine yardımcı olmaktadır [27-29]. Fotogrametri yöntemi ile, 2B görüntülerden 3B bir model oluşturarak nesnelerin dijital 3B dokümantasyonu sağlanabilmektedir [30, 31]. Fotogrametri yöntemi ile özellikle sınırlı veya karmaşık ve erişimi kolay olmayan yapıların incelenmesini, 3B modellerinin oluşturulmasını kolaylaştıran dijital belgelendirme için etkili bir yöntemdir [13, 21].

Fotogrametride bir nesnenin yüzeyindeki noktaların 3B koordinatları, üst üste binen görüntülerin kamera konumlarından ve dış yöneltme parametrelerinden elde edilir. Dış yöneltme parametreleri, örtüşen görüntülerdeki en az üç kontrol noktası kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu yöntem için genellikle, iç yöneltme parametreleri ve kamera kalibrasyon değerleri hakkında önceden bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Fakat, SfM gibi gelişmiş algoritmalar uygulanarak kalibrasyon ihtiyacı ortadan kalkmıştır [6, 33]. SfM, geleneksel kameralarla çekilen görüntülerden 3B modellerin oluşturulmasını ve yüzeylerin yeniden yapılandırılmasını önemli ölçüde basitleştirmiştir [34, 35]. SfM, bir sahnenin geometrisini, kamera konumlarını ve odağını tespit etmeyi amaçlayan bir algoritmadır [31, 36]. Bilgisayar görselleştirmesine dayalı bir nesne ölçüm yöntemi olan SfM, dijital kameraların, video kameraların ve kamera donanımlı akıllı telefonların yaygınlığı ve kullanımı nedeniyle büyük ilgi görmüştür [37, 38]. SfM, maliyet etkinliği, hızlı sonuçları ve yerbilimi araştırmalarında basit 3B ölçümleri kolaylaştırma kabiliyeti nedeniyle bilimsel araştırmalarda giderek daha popüler hale gelmiştir [39]. SfM, stereoskopik fotogrametride kullanılanlara benzer fikirlere dayanmaktadır. Stereoskopik fotogrametrimin aksine, SfM için mükemmel bir kamera kurulumuna gerek yoktur [40]. SfM algoritma temelli yazılımlar, çok sayıda görüntülerden ortak noktaları otomatik olarak çıkararak ve seyrek bir nokta bulutu oluşturan yöntemler üzerine kuruludur [40]. Radyometrik piksel değerlerini kullanan SIFT algoritması ise bu işlem için birincil algoritma olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [41]. SfM sürecinde ilk olarak üretilen seyrek nokta bulutunda sonra ek bir aşama olarak yoğun nokta bulutu oluşturulur. Bu aşamada yoğun çoklu-görüntü stereo algoritması uygulanmaktadır [42]. Burada, haritalanan pikseller ve bunlara karşılık gelen 3B koordinatlar nokta bulutlarına dönüştürülür. Daha sonra, bu nokta bulutları bir ağ modeli oluşturmak için kullanılır. Son olarak görüntülerden gerçek dokular kaplanarak 3B model elde edilmektedir. SfM için daha kapsamlı bir inceleme için Michele ve arkadaşlarının [43] çalışmasına bakılabilir.

Dijital ikiz oluşturmak için fotogerçekçi 3B modellerin oluşturulması Context Capture yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Süreç, iki görüntünün 3B yapısının ve kamera pozlarının ilk tahminiyle başlamaktadır. Daha sonra, kamera konumları eklenir veya hesaplanır ve yeni 3B yapıyı oluşturmak için yeni sahne bileşenleri gözlemlenir. Bu aşamada bindirmeli olarak girdi olarak verilen görüntüler sürekli incelenirken blok dengeleme gerçekleştirilir. SfM, tutarsızlıkları ortadan kaldırmak ve kamera konumlarını veya oluşumlarını ardışık görüntülerden değerlendirmek için geleneksel bir prosedür izler [43]. SfM algoritmasının işlevselliği kameranın kendi kendine kalibrasyonu ile geliştirilse de tatmin edici sonuçlar elde etmek için yine de ön kalibrasyon bazen gerekli olmaktadır. Context Capture yazılımında bu çalışma için kameraların iç yöneltme parametrelerini otomatik olarak tahmin edilmiştir. Ardından, kameraların mutlak yöneltmelerin yanı sıra verilen görüntülerin kamera konumu tahmin edilerek ikili görelî pozlar belirlenmiştir [43, 44]. Üçgenleme işlemi ile daha sonra iki veya daha fazla görüntü üzerinden izlenen bir görüntü koordinatının 3B konumunu hesaplanmıştır [44-46]. İlk tahminin ardından, tüm kamera parametreleri sabit tutulurken bağlantı noktalarının izi blok dengeleme yoluyla ayarlanmıştır. Yoğun nokta bulutları oluşturma sürecinde, birbirine eşlenmesi gereken pikseller ve bunların sanal 3B konumları tahmin edilerek katı modeller ve nokta bulutları oluşturulur [47, 48]. Son aşamada ise sanal uzayda oluşturulan modele gerçekçi ve doğal bir yüzey kazandırmak için görüntü kullanılarak foto-gerçekçi bir 3B model elde edilir.

2.3. Otomatik Çatlak Tespiti ve Hasarla Artırılmış Dijital İkiz Üretimi

Bu çalışmada kısmi otomasyon amacıyla yapılardaki hasar incelemesi görevlerini ayrı ayrı ele almak yerine bir yöntemin belirli bir detay seviyesinde dijital ikiz biçiminde hasar bilgilerini içeren eksiksiz bir 3B model oluşturduğu bir vizyon önerilmektedir. Bu amaçla geometrik bilgileri barındıran bir dijital ikiz ile yapının fiziksel bir parçasının geometrisi hakkında derinlemesine veri içeren 3B modelleri girdi ürün olarak kullanılmaktadır. Geometrik bilgileri barındıran dijital ikizleri (fotogrametrik 3B model) görüntülerden elde edilen hasar verileriyle birleştirilerek hasarla güçlendirilmiş/artırılmış dijital ikizler üretilmesi amaçlanmaktadır. İlk adım fotogrametrik yöntem ile yapının detaylı geometrik bilgilerini barındıran yüksek kalitede gerçek dokusu ile kaplanmış 3B dijital ikizini üretmektir. Ardından görüntülerden tespit edilen çatlakların 3B konumlarının hesaplanmasını, zamandan ve maliyetten tasarruf etmek için otomatik olarak vektörleştirilmesini içermektedir. Bu temsili kapsamlı bilgileri gelecekteki eylemlerin ve kararların hazırlanmasına yardımcı olacaktır. Amaçlanan hasarla artırılmış dijital ikiz çıktısı, detay seviyesi modeli tarafından sağlanan geometrik bilgileri haritalanmış ve karakterize edilmiş hasarlar ile birleştirilebilir ve analizler edilebilir. Bu sayede yerinde denetimlere alternatif bir yöntem geliştirilmektedir. Çalışmamızda 3B uzaydaki görüntülerden çatlakları otomatik olarak tespit edilmesi aşaması Bentley [44, 45] tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılmaktadır.

İlk olarak, yukarıda açıklanan SfM tabanlı fotogrametri yöntemi kullanılarak görüntülerden 3B model ve nokta bulutu oluşturulmuştur. Context Capture yazılımında üretilen 3B model çatlak tespit etmek için kullanılmıştır. Çalışmamızı diğer çalışmalardan ayıran en büyük özellik, tespit edilen çatlakların 2B fotoğraflardan değil 3B modellerden elde edilmesidir. Bunun için yapay zekâ algoritmaları kullanılmıştır. Temel algoritmaları çalıştırmak için yukarıda da açıklandığı gibi Bentley firması tarafından geliştirilen makine öğrenimi ve derin öğrenme dedektörleri kullanıldı. Burada hazır olan kütüphaneler kullanılmış olup çalışma alanına en uygun parametreler tasarlanmıştır. Kullanılan kütüphanedeki veriler ile çalışma alanının uyumu doğruluğu direkt etkileyecektir. Bu araçlar, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit eder. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için ID araçları tarafından kullanılan özellikler ve ayarlar aşağıdaki gibidir:

- Eşik (Threshold): Çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değerini ayarlar.
- Açı (Angle): Çatlakların yönünü belirler.
- Uzunluk (Length): Çatlakların minimum uzunluğunu belirler.
- Genişlik (Width): Çatlakların minimum genişliğini belirler.
- Yumuşatma (Smoothing): Yüzey farklılıklarını yumuşatmak için kullanılan bir ayardır [49-51].

Yapay zekâ algoritmaları 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz ederek çatlakları tespit etmektedir. Genel olarak algoritma üretilen dijital ürünleri baz alarak çalışır. Algoritmanın temel girdisi olan 3B model bir dizi nokta bulutu olarak temsil edilir. Daha sonra modelin yüzey farklılıklarını belirlemek için nokta bulutu analiz edilmektedir. Analiz edilen yüzeylerdeki farklılıklar nedeniyle çatlaklar tespit edilir. Klasik fotogrametrik modellerde 3B nesne tespiti için kullanılan özellikler sırasıyla; Çatlak olarak değerlendirilecek yüzey farklılıklarının minimum değeri, çatlakların yönü ve minimum uzunluğu, çatlakların minimum genişliği ve yüzey farklılıklarını yumuşatma değeri ayarlanmalıdır [49-51]. Bu araçlar ilk olarak Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları kullanmakta ve bunlar makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarını kullanmaktadır [51, 68]. Bu algoritmalar 3B bir yüzeydeki varyasyonları analiz etmek için önceden var olan modelleri kullanır. Çatlakları tespit etmek için kullanılan algoritma yapay zekâ algoritmaları üzerine kurulmuştur. Bu mekanizma, eğrilik değeri ile önceden belirlenmiş bir eşik değeri arasındaki karşılaştırmaları yürütür. Bu prosedür, insan beyninin çatlakları nasıl algıladığına benzer [52]. Komşuluk Birleştirme algoritması, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını temsil etmek için önceden eğitilmiş bir model kullanarak nokta bulutundaki her noktanın komşu noktalarını tanımlar ve Denklem (1)'i kullanır [52, 53, 68].

$$n(p) = \{q \in P \mid \|p - q\| < r\} \quad (1)$$

Burada

$n(p)$: bir noktanın p çevresinde belirli bir yarıçap r içinde kalan tüm noktaların kümesini temsil eder (p : nokta kümesi).

q : p noktasının komşusu

P : Nokta bulutu

r : Komşuluk mesafesi

Nokta eğriliklerini hesaplamak için Eğrilik Tahmini algoritması kullanılır. Bu algoritma, nokta bulutunun eğriliğine nasıl yaklaşılacağını öğrenen önceden var olan bir modeli kullanır ve bu algoritma, noktaların eğriliğini hesaplamak için Denklem (2)'yi kullanır.

$$K(p) = \frac{k_1(p) + k_2(p)}{2} \quad (2)$$

Burada

$K(p)$: p noktasının eğriliği

$k_1(p)$: p noktasının birincil eğriliği

$k_2(p)$: p noktasının ikincil eğriliği

Çatlak tespit algoritması, belirli bir değeri aşan eğimlere sahip noktaları tanımlar [53, 54]. Algoritma tespit edilen çatlakların boyutu, derinliği ve konumu hakkında bilgi sağlamaktadır. Eğriliği belirli bir değerden daha yüksek olan noktaları, çatlak olarak tespit etmek için Denklem (3)'ü kullanır.

$$c(p) = 1 \text{ if } |K(p)| > t \text{ else } 0 \quad (2)$$

Burada

$c(p)$: p noktasının çatlak olup olmadığı
 $|K(p)|$: p noktasının eğriliğinin mutlak değeri
 t : Eşik değeri

Yukarıda verilen formüller, çatlak tespit araçlarının/dedektörlerinin matematiksel modelinin temelini oluşturur. Bu formüller, 3B modeldeki yüzey farklılıklarını analiz etmek ve çatlakları tespit etmek için kullanılır. Sonuç olarak bu algoritmalar ile 2B görüntülerden ziyade 3B model üzerinde konumlandırılmış görüntülerden bir bütün olarak otomatik çatlak tespiti gerçekleştirilmektedir. Elde edilen 3B model ve tespit edilen çatlaklar birleştirilerek (3B model + çatlak) farklı detay seviyesinde hasarla artırılmış dijital ikizler üretilebilmektedir. Dijital ikiz çıktımızın amacı, 3B modelden alınan geometrik verileri tanımlanmış ve ölçülmüş hasarla entegre etmektir.

2.4. Doğruluk Analizi

Çalışmada iki doğruluk analizi yapılmıştır. İlk analizde fotogrametri ile oluşturulan 3B modelin konumsal ve geometrik hassasiyeti incelenmiştir. Bu analiz, modelin koordinatlarının kontrol noktalarına göre doğruluğunun değerlendirilmesini kapsamaktadır. Referans verileri 3B modelin koordinatlarıyla karşılaştırılır ve herhangi bir tutarsızlık hata olarak hesaplanır. Referans ölçümleri olarak total-station ile ölçülen doğal hedef işaretleri kullanılmış olup analizler Denklem (4) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test çalışması için toplam 21 hedef işaretinden 8'i doğruluk analizi için kullanılmıştır. Referans veri ile dijital ikiz modelinden elde edilen veri arasındaki fark, model konumunun referans noktasından ne kadar uzakta olduğunu göstermektedir. Bu hatayı ölçmek için Karesel Ortalama Hata (Root Mean Squared Error/RMSE) hesaplanmış ve modelin doğruluğu ortaya konulmuştur. Modelin doğruluğu hata değerinin azalmasıyla orantılıdır. İkinci analiz olarak yüzeyde otomatik tespit yoluyla bulunan çatlakların güvenilirliğini değerlendirmek için doğruluk incelemesi yapılmıştır. Yüzeyden yapılan manuel ölçümler, otomatik tespitten elde edilen vektör verileriyle eşleşmiştir. Test nesnesindeki çatlaklara ilişkin referans veri toplama işlemi ölçüm araçları kullanılarak bir uzman tarafından manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz için Denklem (4) kullanılmış ve bir RMSE değeri hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}} \quad (4)$$

Burada

x: kontrol noktasının koordinatları/Manuel çatlak uzunlukları

y: 3B model üzerinden alınan koordinatlar/Otomatik çatlak uzunlukları

n: Kontrol noktası-hedef sayısı/Çatlak sayısını temsil etmektedir.

2.5. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik

Fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modellerden dijital ikizlerin oluşturulması ve bu dijital ikizlerin WEB tabanlı SG platformlarına aktararak görselleştirilmesi giderek popülaritesi artan bir konudur [55,56]. WEB tabanlı sanal gerçeklik platformları, bir cihaz (genellikle bir gözlük) aracılığıyla gerçek dünyayı veya fiziksel nesnelere dijital içeriklerle zenginleştirmelerine olanak tanımaktadır [57]. Fotogrametri ile elde edilen 3B dijital ikiz modellerinin WEB tabanlı SG platformlarına entegrasyonu genellikle belirli bir platformun yazılım geliştirme araçları ve API'leri kullanılarak gerçekleştirilir. Dijital ikizin bu platforma aktarılması kullanıcıların gerçek dünya ile etkileşimde bulunmalarını sağlar. Bu tür bir teknoloji birçok farklı kullanım senaryosuna sahiptir [58, 59]. Örneğin; eğitimde, sanal turizmde, ürün tanıtımında, endüstriyel tasarımda, mühendislik analizinde ve daha birçok alanda kullanılabilir. Kullanıcılar, gerçek dünya nesnelere üzerine bilgi eklemek veya dijital nesnelere etkileşimli bir şekilde incelemek için bu teknolojiyi kullanabilirler [60]. Sonuç olarak, fotogrametri ile elde edilen 3B dijital ikizlerinin WEB tabanlı Sanal gerçeklik platformlarına aktarılması hem eğlence hem de iş uygulamaları için büyük potansiyele sahiptir. Fotogrametri ile oluşturulan 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı SG entegrasyonu için dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır [61]. Fotogrametri ile elde edilen 3B modeller genellikle büyük ve karmaşık olabilmektedir [62]. Bu modellerin WEB tabanlı SG platformlarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi için model optimizasyonunun yapılması gereklidir. Özellikle model boyutunu azaltmak, çoklu cihazlarda hızlı yükleme ve görüntüleme sağlamak için önemli olmaktadır. Ayrıca SG platformları, belirli 3B model formatlarını desteklemektedir. Bu nedenle, fotogrametri yöntemi ile elde edilen 3B modellerin uygun formatlarda dönüştürülmesi gerekli olabilmektedir. Örneğin, OBJ, FBX, STL veya USDZ gibi yaygın 3B dosya formatları sıkça kullanılır [63]. Diğer bir husus ise gerçek dünya ya da fiziksel nesneyi temsil etmesi istenilen dijital ikizin konum bilgisine sahip olmamasıdır. Özellikle WEB tabanlı SG platformlarında, kullanıcıların cihazlarını gerçek dünyada doğru bir şekilde konumlandırabilmek ve takip edebilmek için özel algoritmalar ve teknolojiler kullanılır. Fotogrametri yönteminde gerçek koordinatlar ya da yerel referanslandırma yapılabilme özelliğinden dolayı 3B modeller doğru konum bilgisi ile üretilmektedir. Bu avantajdan dolayı fotogrametri ile üretilen dijital ikizler

doğru bir şekilde gerçek dünyaya yerleştirilmesi gerçekleştirilirken elde edilen modelin doğru ölçek ve konumda temsil edilmesi sağlanmış olunur. Fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modellerin ve dijital ikizlerin WEB tabanlı SG ile depolanması, görüntülenmesi ve paylaşılması için birçok popüler platform bulunmaktadır ve bu platformlar WEB tabanlı SG projeleri için büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla kullanılan popüler platformlar; başta Sketchfab, Unity3D, Unreal Engine, Google Poly, Mozilla Hubs, Amazon Sumerian olarak gösterilebilmektedir [64]. Bu platformların, avantajları ve dezavantajları vardır. Özellikle bu platformlar, 3B içeriklere kolayca erişim sağlar ve kullanıcıların tarayıcıları üzerinden görüntülemelerine olanak tanır. Bu, içerikleri geniş bir izleyici kitlesiyle paylaşmayı kolaylaştırırken genellikle kullanıcı dostu arayüzler sunarlar ve içeriklerin yüklenmesi, görüntülenmesi ve paylaşılması basit bir süreç haline gelir. Birçok platform yaygın kullanılan SG cihazları ile uyumlu olup bu, kullanıcıların 3B içeriklere farklı cihazlar üzerinden erişmelerini ve SG deneyimleri yaşamalarını sağlamaktadır [65].

Tablo 1. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik Platformları (Ücretsiz/Ek Ücretli Platformlar).

Adı	Avantaj	Dezavantajı	Ücretsiz ve Ücretli Planlar /lisans durumu
Sketchfab	Kodlama bilgisi olmadan, 3B modelleri yüklemek ve paylaşmak için kolay bir arayüze sahiptir. Kurulum gerektirmez tarayıcı üzerinden çalışır. Çok sayıda eğitim ve rehber sunar. Hem artırılmış gerçeklik hem de sanal gerçeklik deneyimlerini destekler. Bilgisayar, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik gözlükleri dahil çeşitli cihazlarla uyumludur. Kullanıcıların modellerle etkileşime geçmesine olanak tanır (dönme, yakınlaştırma, bilgi noktaları ekleme). Modellere animasyonlar, sesler ve bağlantılar gibi etkileşimli özellikler eklenebilir.	Çok karmaşık veya büyük dosya boyutlarına sahip modellerde performans sorunları yaşanabilir. Tarayıcı tabanlı olmasından dolayı bazı performans ve grafik kısıtlamaları olabilir. Bazı kullanıcılar için özelleştirme seçenekleri yetersiz olabilir. Özellikle belirli bir iş akışı veya kullanıcı deneyimi gereksinimi varsa, platformun sunduğu seçenekler sınırlı kalabilir. 3B modellerin çevrimiçi paylaşılması, ticari sınırlar veya telif hakları açısından güvenlik riskleri oluşturabilir.	Ücretsiz plan bazı kısıtlamalar getirir, özellikle model boyutuna, depolama alanına sınırlamalar bulunur. İleri seviye özellikler ve daha fazla depolama için ücretli planlara ihtiyaç duyulabilir.
Unity3D	WEB tarayıcıları, mobil cihazlar, sanal gerçeklik kulaklıklar ve konsollar dahil olmak üzere çeşitli platformlarda görüntülenebilir ve etkileşime girebilir. WEB tabanlı deneyimleri WebXR API'si üzerinden destekler. C# programlama dili ile geliştirilmeyi destekler. Görüntü tanıma, anlık takip ve stereo ses gibi gelişmiş özelliklerine sahiptir. Kullanıcıların 3B modellerle gerçek zamanlı olarak etkileşime girmesine olanak tanıyan etkileşimli deneyimler oluşturmak için kullanılabilir. Gelişmiş grafik motoru sayesinde yüksek kaliteli görseller ve performans sağlar. Büyük dosya projeleri yapılabilir. Unity, ekipler için iş birliği yapmayı kolaylaştıran entegre versiyon kontrol sistemleri sunar.	Karmaşık bir platformdur, başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için öğrenmesi zor olabilir. Kodlama bilgisi gereklidir. Özellikle gelişmiş projeler için yüksek derecede teknik bilgi gerektirir. Büyük ve karmaşık modeller, bazı platformlarda performans sorunlarına neden olabilir. Unity projeleri genellikle büyük dosya boyutlarına sahip olabilir, bu da yükleme sürelerini uzatabilir.	Bazı gelişmiş özellikleri ücretlidir. Ek eklentiler ve araçlar için ekstra maliyetler ortaya çıkabilir.
Unreal Engine	Fotogerçekçi grafikler ve karmaşık sistemler oluşturmak için kullanılabilir. WEB tarayıcıları, mobil cihazlar, sanal gerçeklik kulaklıklar ve konsollar dahil olmak üzere çeşitli platformlarda görüntülenebilir ve etkileşime girebilir. C++ programlama dili ve görsel programlama aracı Blueprints ile geliştirilmeyi destekler. Görüntü tanıma, anlık takip ve stereo ses gibi gelişmiş özelliklerine sahiptir. Gerçekçi ışıklandırma, gölgeleme ve görsel efektler sunar, bu da çok yüksek kaliteli görseller ve grafikler sağlar. WEB tabanlı deneyimleri WebXR API'si üzerinden destekler. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır.	Karmaşık bir platformdur, özellikle gelişmiş projeler için yüksek derecede teknik bilgi ve deneyim gerektirir. Kodlama bilgisi gereklidir. Büyük ve karmaşık modeller, bazı platformlarda performans sorunlarına neden olabilir. Yüksek kaliteli görseller ve efektler, güçlü donanım gereksinimleri doğurabilir ve depolama alanı gereksinimlerini artırabilir. Yeni Unreal Engine sürümlerine güncelleme yaparken uyumluluk sorunları yaşanabilir.	Bazı gelişmiş özellikleri ücretlidir, ticari projeler için gelir üzerinden yüzde bazlı lisans ücreti talep edebilir.
A-Frame	HTML benzeri sözdizimi ile kullanıcı dostu ve öğrenmesi kolaydır. Özellikle WEB geliştiricileri için tanıdık bir yapı sunar. Teknik bilgi gereksinimi minimaldir, bu da yeni başlayanlar için idealdir. Kurulum gerektirmez, doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır ve herhangi bir ek eklenti gerektirmez. Masaüstü, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik cihazları ile uyumludur. Mozilla tarafından geliştirilen ve geniş bir topluluk tarafından desteklenen açık kaynaklı bir projedir. Basit yapısı ve kullanıcı dostu arayüzü sayesinde hızlı prototipleme ve geliştirme imkânı sunar.	Çok karmaşık veya büyük sahneler, performans sorunlarına yol açabilir. İleri düzey grafik ihtiyaçları olan projeler için yeterli esneklik sunmayabilir, sınırlı kalabilir. WebGL tabanlı olduğu için, donanım erişimi nedeniyle potansiyel güvenlik riskleri barındırır. WEB tabanlı olması, potansiyel kötü niyetli kullanıcı ve saldırılara açık olabilir. Farklı tarayıcılar arasında uyumluluk ve performans farklılıkları olabilir. Daha büyük ve karmaşık profesyonel projeler için yeterli olmayabilir.	A-Frame açık kaynak kodlu bir projedir, bu da onu ücretsiz ve herkese açık hale getirir.

Tablo 2. WEB Tabanlı Sanal Gerçeklik Platformları (Ücretli Platformlar).

Adı	Avantaj	Dezavantajı	Ücretsiz ve Ücretli Planlar /Lisans durumu
Mozilla Hubs	Basit ve sezgisel bir arayüze sahiptir, bu da kullanıcıların hızlıca sanal odalar oluşturmasını ve katılmasını sağlar. Kurulum gerektirmez, doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır. Bilgisayar, tablet, akıllı telefon ve sanal gerçeklik cihazları üzerinden erişim sağlanabilir. Kullanıcılar sanal odalarda eş zamanlı olarak çalışabilir, sohbet edebilir ve içerik paylaşabilir. Kullanıcılar, sanal odalara medya dosyaları (resim, video) ve 3B modeller ekleyebilir. Kullanıcılar, sadece davetlilerin katılabileceği özel odalar oluşturabilir. Mozilla Hubs açık kaynaklı bir platformdur, bu da geliştiricilerin platformu inceleyip özelleştirmesine olanak tanır.	WEB tabanlı olması nedeniyle, yüksek kaliteli grafikler ve karmaşık sahnelerde performans sorunları yaşanabilir. Farklı tarayıcılar arasında performans ve uyumluluk farklılıkları olabilir. Profesyonel ve ticari artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları için gerekli olan bazı gelişmiş özellikler eksik veya yetersiz olabilir. Kesintisiz ve hızlı bir internet bağlantısı gerektirir, bağlantı sorunları deneyimi olumsuz etkileyebilir. Çok sayıda kullanıcının aynı anda bağlandığı durumlarda sunucu yükü ve performans sorunları yaşanabilir.	Ücretsiz kullanıcılar için sınırlı teknik destek ve yardım mevcut olabilir. Mozilla Hubs'ın, Hubs Cloud adlı ücretli sürümü bulunmaktadır. Hubs Cloud, özellikle işletmeler ve organizasyonlar için daha fazla özelleştirme ve kontrol imkânı sunar.
Amazon Sumerian	Kurulum gerektirmez; doğrudan WEB tarayıcı üzerinden erişilebilir. Sürükle ve bırak arayüzü sayesinde kullanıcıların 3B sahneler ve artırılmış ve sanal gerçeklik deneyimleri oluşturmasını kolaylaştırır. Teknik bilgisi sınırlı olan kullanıcılar bile kodlama yapmadan projelerini geliştirebilir. Bilgisayar, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik gözlükleri dahil çeşitli cihazlarla uyumludur. Güçlü bulut tabanlı yetenekler ekler. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır, bu da iş birliğini ve verimliliği artırır. Amazon Lex ve Polly ile entegre çalışan holografik karakterler oluşturma imkânı sunar.	Platformun sunduğu geniş özellik yelpazesi, özellikle yeni başlayanlar için öğrenme sürecini zorlaştırabilir. İleri seviye özellikleri ve entegrasyonları kullanmak için teknik bilgi gerekebilir. WEB tabanlı bir platform olması, özellikle karmaşık ve grafik yoğun projelerde performans sınırlamalarına neden olabilir. Yüksek kaliteli artırılmış ve sanal gerçeklik deneyimleri için hızlı ve güvenilir bir internet bağlantısı gerektirir. Bazı kullanıcılar için platformun sunduğu özelleştirme seçenekleri yetersiz kalabilir, özellikle çok özel gereksinimleri olan projeler için.	Amazon Sumerian, AWS üzerinde çalıştığından, kullanım maliyetleri AWS hizmetlerine bağlıdır. Bu maliyetler, proje büyüklüğüne ve kullanım yoğunluğuna bağlı olarak artabilir.
Microsoft Azure Spatial Anchors	AG/SG içerikleri dünyaya sabitlenmesini isteniyorsa, Microsoft Azure Spatial Anchors kullanabilir. Bu sayede dijital ikizler belirli yerlere sabitlenerek kullanıcılara daha gerçekçi bir deneyim sunulabilir. Fiziksel dünya ile sanal dünyayı yüksek doğrulukla senkronize eder, bu da deneyimlerinin gerçek dünya ile tutarlı olmasını sağlar. Mekânsal ankrajlar, belirli fiziksel konumlarda kalıcı olarak yerleştirilebilir ve farklı oturumlarda erişilebilir. Azure Spatial Anchors, iOS, Android ve HoloLens cihazları arasında çapraz platform desteği sunar. Farklı cihazlardan aynı mekansal ankrajlara erişim ve paylaşım imkânı. Azure Spatial Anchors, diğer Azure hizmetleri ile kolayca entegre olabilir, bu da projelere güçlü bulut tabanlı yetenekler ekler. Birden fazla kullanıcı aynı anda aynı mekansal ankrajları kullanabilir ve gerçek zamanlı olarak etkileşime geçebilir. Gelişmiş mekansal haritalama yetenekleri, karmaşık artırılmış gerçeklik sahneleri oluşturmayı kolaylaştırır.	Hizmetlerin düzgün çalışabilmesi için sürekli internet bağlantısı gerektirir. Azure ekosistemine bağımlı olma durumu, platform değiştirmek isteyenler için esneklik kısıtlaması getirebilir. Azure hizmetleri ve mekansal ankrajlar hakkında bilgi sahibi olmak, platformun etkin kullanımı için gereklidir. Azure SDK ve API'lerini kullanmak başlangıçta zorlayıcı olabilir. Gerçek zamanlı iş birliği ve mekansal haritalama özellikleri, düşük gecikme ve yüksek performans gerektirir, bu da bazı durumlarda zorluklar yaratabilir. Tüm cihazlar ve platformlar arasında tutarlı performans sağlamak zor olabilir. Kullanıcı verilerinin güvenliği ve gizliliği konusunda dikkatli olunması gereken durumlar olabilir. Veri saklama ve işleme ile ilgili uyumluluk gereksinimlerini karşılamak zor olabilir.	Azure Spatial Anchors kullanımı, Azure hizmetlerine dayalı ücretlendirme modeli ile çalışır. Bu maliyetler, kullanım miktarına bağlı olarak artabilir. Azure platformunun diğer hizmetleri ile entegrasyon durumunda ek maliyetler ortaya çıkabilir.
PlayCanvas	Sürükle ve bırak arayüzü sayesinde kullanıcıların hızlı bir şekilde 3B sahneler oluşturmasını sağlar. Teknik bilgi gereksinimi minimaldir ve öğrenmesi kolaydır, bu da yeni başlayanlar için idealdir. Doğrudan tarayıcı üzerinden çalışır, herhangi bir ek eklenti veya yazılım indirme gerektirmez. Projeler bulut üzerinde saklandığı için herhangi bir cihazdan kolayca erişilebilir ve düzenlenebilir. Masaüstü, mobil cihazlar ve sanal gerçeklik cihazları ile uyumlu çalışır. Modern tarayıcıların çoğunda sorunsuz çalışır. Birden fazla kullanıcının aynı projede eş zamanlı olarak çalışmasına olanak tanır, bu da ekip performansını ve iş birliğini artırır. PlayCanvas, yüksek performanslı 3B grafikler ve etkileşimli deneyimler sunar. JavaScript tabanlı betik düzenleyici ile gelişmiş özelleştirme ve etkileşimli içerikler oluşturma imkânı sağlar.	İleri düzey projeler ve özelleştirmeler için JavaScript bilgisi gereklidir. Bazı gelişmiş özelliklerin ve fonksiyonların öğrenilmesi zaman alabilir. Çok büyük ve karmaşık sahnelerde performans sorunları yaşanabilir. WEB tabanlı olması nedeniyle tarayıcı performansı ve özellikleri ile sınırlı olabilir. Platformun sağladığı araçlar ve bileşenler bazı projeler için yeterli olmayabilir. Daha popüler platformlara kıyasla daha küçük bir topluluğa sahip olabilir, bu da kaynak ve destek bulmayı zorlaştırabilir.	Ücretsiz plan, depolama ve özellikler açısından sınırlamalar içerir. Daha fazla özellik ve depolama alanı için ücretli planlara ihtiyaç duyulabilir. Profesyonel projeler için gereken gelişmiş özellikler ve daha fazla depolama alanı ücretli planlarla sağlanır, bu da ek maliyetler getirebilir.

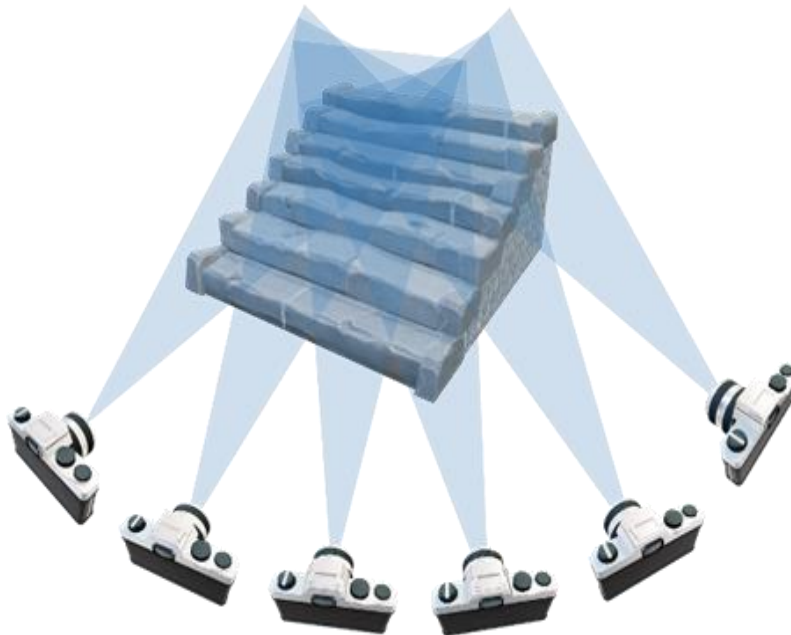
Platformların avantajların yanında her birinin ayrı ayrı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle paylaşım ve görselleştirme işlemi, ek depolama veya üst özelliklere erişimlerin ücretli olması en büyük dezavantajlardan biridir. Ücretsiz sürümler ise sınırlı depolama alanı sahiptir ve kullanıcıların sınırlamalarla karşılaşmasına neden

olabilmektedir. Ücretsiz platformlar genellikle içerikleri kamuya açık olmakta ve bu da gizlilik sorunlarına yol açabilmektedir. Hassas verileri içeren 3B modellerin bu platformlarda barındırılması sakıncalı olmaktadır. Ayrıca ücretsiz platformlar, kullanıcıların 3B içeriklerinin görünürlüğü ve yönetimi üzerinde sınırlı kontrole izin vermektedir. Bazı platformlar, sınırlı teknolojik yeteneklere sahip olabilir veya belirli WEB tarayıcıları veya cihazlarla uyumsuzluk yaşayabilir. Her platformun kendine özgü avantajları ve dezavantajlarından dolayı uygun platformun seçimi projenin gereksinimlerine ve hedeflerine bağlı olmalıdır [64]. Yukarıda verilen avantaj ve dezavantajlar ışığında Tablo 1 ve Tablo 2’de WEB tabanlı artırılmış ve sanal gerçeklik platformları verilmiştir. Tablo 1’de ücretsiz veya kısmen ücretli olan platformlar yer alırken Tablo 2’de ücretli veya kısıtlı erişime sahip platformlara yer verilmiştir.

Bu platformlar, 3B içeriklerin oluşturulmasını, depolanmasını ve paylaşılmasını kolaylaştırır. Ayrıca, WEB tabanlı SG projelerinin geliştirilmesi için de kullanılabilirler. SG projeleri için 3B içeriklerin doğru bir şekilde hazırlanması ve bu platformlara entegre edilmesi, kullanıcıların etkileyici SG deneyimleri yaşamalarına olanak tanımaktadır [66]. 3B model ve SG için WEB ortamındaki en önde gelen platform olan Sketchfab [67] bu çalışmada tercih edilmiştir. Sketchfab, 2012 yılında Alban Denoyel (Sketchfab’ın CEO’su ve kurucu ortağı) ve Pierre-Antoine Passet (Sketchfab’ın CTO’su ve kurucu ortağı) tarafından Paris, Fransa’da kurulmuştur. Sketchfab platformunun seçilmesindeki en önemli etken, WEB ortamındaki en güçlü 3B model görüntüleyicilerinden birine sahip olması ve kolay kullanım sağlaması gelmektedir. Sketchfab, bugüne kadar toplam 32 milyon ABD doları yatırım almıştır. Sketchfab’ın bir milyondan fazla aktif kullanıcısı bulunmakta ve Sketchfab’da üç milyondan fazla 3B model paylaşılmıştır [69]. Platformda özellikle karmaşık ve yoğun olan fotogrametrik 3B modellerin kullanıcılar tarafından kolayca her açıdan döndürebilir olması veya hızlı bir şekilde yakınlaşıp/uzaklaştırabilmesine imkân tanınması ve modelin ayrıntılarının farklı açılardan kolayca incelenebilmesi ve bazı modellerin içine girilebilmesi önemli etken olmuştur. Ayrıca kullanıcılar 3B modellerini belirli bir dosya boyutuna kadar Sketchfab’da ücretsiz olarak paylaşabilmekte ve modeller herkese açık olarak veya özel olarak paylaşılabilir. Kullanıcılar, birçok farklı 3B model dosya formatını yükleyebilirler ve bu modelleri kolayca saklayabilirler. Sketchfab, 3B modelleri SG uygulamalarıyla entegre etmeyi kolaylaştırdığı gibi Sketchfab’ın API’sini kullanarak, 3B modelleri mobil uygulamalara, WEB sitelerine ve sanal gerçeklik deneyimlerine eklenebilmesi diğer bir tercih sebebi olmuştur.

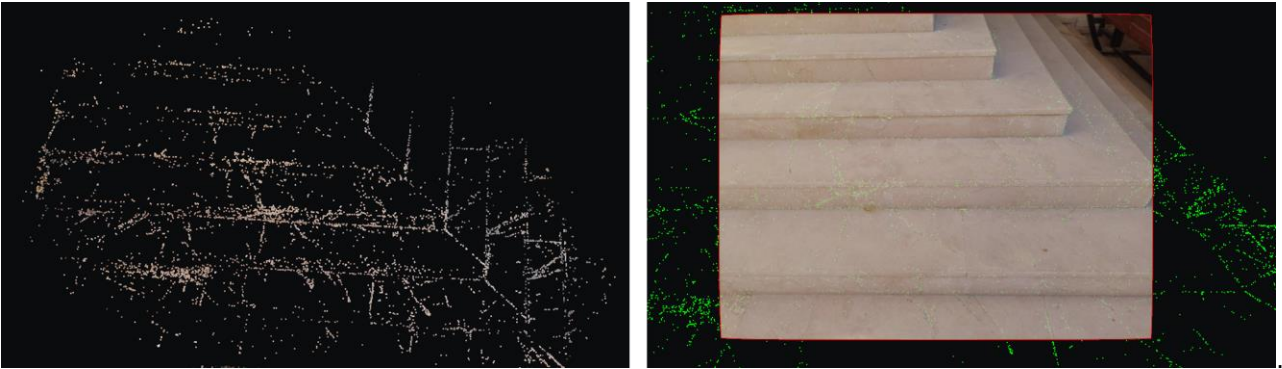
3. Bulgular

Bu çalışma, fotogrametri ile üretilen 3B modelleri kullanarak yapıdaki çatlakları otomatik olarak tespit etmeyi ve hasarla artırılmış dijital ikiz üretmek yapısal denetimlere yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır. Önerilen teknik modern bir yapının giriş kısmında bulunan merdiven basamakları üzerinde denenmiştir. Çalışmada veri toplamada ve dijital ikizin ilk aşaması olan 3B modelin üretiminde yakın resim fotogrametrisi kullanılmıştır. Test alanının görüntüleri manuel bir şekilde ortalama %80 boyuna ve enine bindirme olacak şekilde çekilmiş olup Şekil 2’de gösterildiği gibi çekim planı gerçekleştirilmiştir. Görüntü toplama süresi yaklaşık on dakika sürmüştür.



Şekil 2. Yakın resim fotogrametrisine uygun görüntü çekim senaryosu

3B model üretiminde kullanılan fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması nesneye ait herhangi bir kontrol veya referans noktası olmadan sıralı çekilen görüntülerden ürün üretimine imkân tanımaktadır. Fakat bu çalışmada mümkün olan en hassas ve duyarlı 3B modeli oluşturmak için referans amaçlı hassas ölçüm cihazları kullanılarak hedef işaretleri yerleştirilmiş ve ölçümleri alınmıştır. Hedef işaretleri test nesnesi boyunca doğal köşe birleşim noktalarından eşit olacak şekilde toplanmıştır. Model üretim işlemi Context Capture yazılımında gerçekleştirilmiştir. Test nesnesinin fotogrametrik olarak işlenmesi yaklaşık 2 saat sürmüştür. Fotogrametrik sürecin ilk aşaması olan görüntü hizalama işlemi sırasında nesne yüzeyinde tanımlanan on üç hedef işareti kullanılmıştır. Bu işaretler hem hizalama sürecine katkı sağlamıştır hem de modelin gerçek ölçüsüne göre ölçeklendirilmesini sağlamıştır. Hizalama işleminde gerekli olan kamera parametreleri yazılımın kütüphanesinden otomatik olarak içe aktarılmıştır. Görüntü hizalamasının ardından algoritma bir ön model (seyrek nokta bulutu) oluşturmuştur (Şekil 3). Bu aşamada, model doğruluğu için belirlenen denetleme noktaları hizalama için kullanılmamalıdır. Test nesnesi için 3B modelin hata değeri kontrol noktaları aracılığıyla belirlenmiştir. Gerçek görüntülerden üretilen 3B modellerin kalitesi test nesnesi için ortalama 0,088 mm YÖA/piksel ile oluşturulmuştur. Önerilen yöntemde elde edilen görüntünün kalitesi (YÖA değeri) sonuç ürünün doğruluğu ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ve önem arz etmektedir bu yüzden hassas olması gerekmektedir. YÖA değeri ne kadar kaliteli olursa, algoritma o kadar doğru çalışmaktadır. Oluşturulan ön modelden sonra SfM algoritması ile önce arka planda yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur ve ardından yüksek çözünürlüklü fotogerçekçi 3B doku modeli üretilmiştir (Şekil 4). Modelin geometrik analizi, yöntemler bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Analizde doğal hedefler kullanılmış olup denetleme noktası olarak tanımlanan sekiz hedef doğruluk analizinde kullanılmıştır.

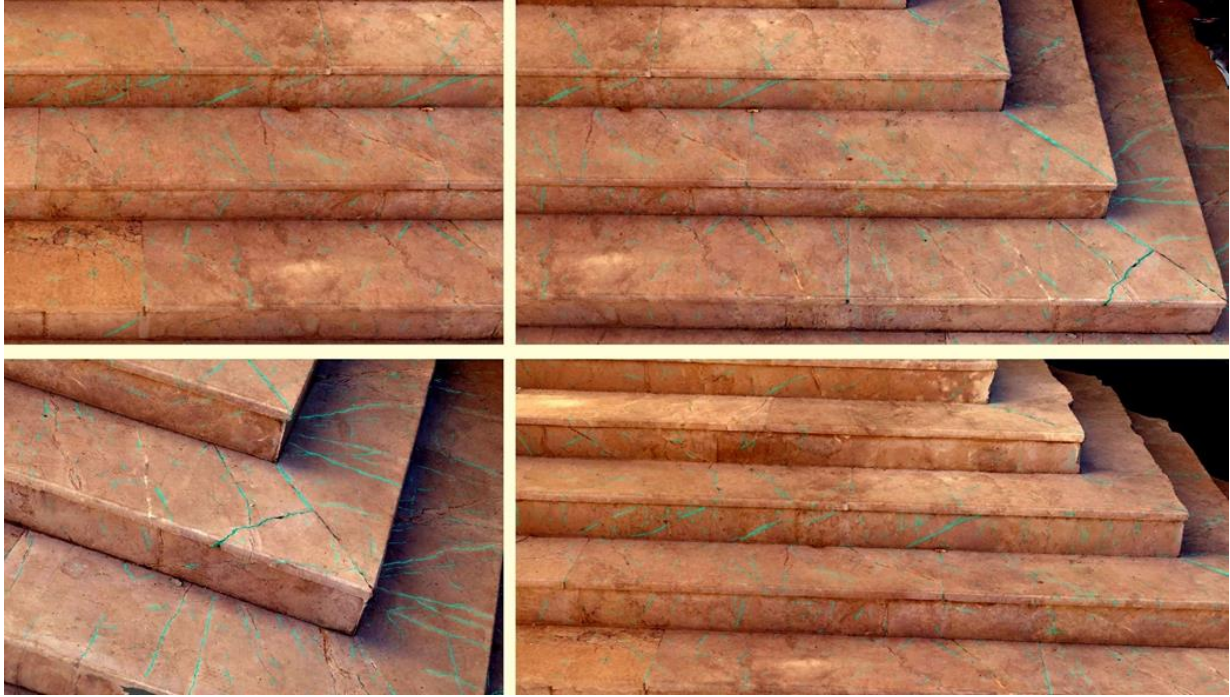


Şekil 3. Fotogrametrik ön hizalama sonucu oluşan seyrek nokta bulutu (sol) ve resim üzerinde ortak eşleşen noktalar (sağ)



Şekil 4. Fotogrametrik değerlendirme sonucunda üretilen 3B model genel görünümü ve yakın gösterimi

Doğruluk analizi için Denklem 4 kullanılmış ve bulgular Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3, test nesnesi için üretilen 3B modelin doğruluk değerlerini göstermektedir. Test nesnesi, Tablo 3'e göre oldukça yüksek doğrulukta üretilmiştir. Bu doğrulukta 3B model üretmenin başlıca nedeni test nesnesinin boyutunun küçük olması, karmaşıklığının oldukça az olması ve görüntülerin oldukça yüksek çözünürlükte olması gösterilebilir. Yüksek kaliteli 3B model üretildikten sonra çatlaklar otomatik olarak tespit edilmiştir. 3B model üzerinde çatlakları tespit etmek için kullanılan teknik, ilk görünümün görüntüsü üzerinde eğitilen makine ve derin öğrenme modelleri aracılığıyla cephe segmentasyonu yapılmasını gerektirmektedir. Bu aşamada, tanınan açıklıkların köşeleri, uygun köşeleri tespit etmek için birinci görünümünden ikinci görünüme aktarılır. Bu çalışmada kullanılan Insight Detector araçları, 3B modellerdeki çatlakları tespit etme konusunda yetkin olup çatlakların boyutunu, derinliğini ve konumunu değerlendirmeye yardımcı olabilir. Insight Detector araçlarının matematiksel modeli, 3B modeldeki yüzey eşitsizliklerini inceleyen bir dizi algoritma içerir. Insight Detector araçları ile Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları derin öğrenme algoritmalarına dayanmaktadır. Önceden eğitilmiş modeller, verilen 3B modelin yüzey tutarsızlıklarını analiz etmek için kullanılmıştır. Komşuluk Birleştirme ve Eğrilik Tahmini algoritmaları, görüntü ve videolardaki nesnelere yetkin bir şekilde tanıyan Evrişimli Sinir Ağları algoritmalarına dayanmaktadır. Etiketli veriler kullanılarak eğitilen denetimli öğrenme algoritmaları da bu tür yüzey farklılıklarını belirleme yeteneği kazanır. Bu tür mimarilerin uygulanması göz önüne alındığında, Insight Detector 3B modellerdeki çatlakları güvenilir bir şekilde tespit eder. Hasarla artırılmış dijital ikiz çıktımız, 3B modelden alınan geometrik verileri tanımlanan ve karakterize edilen hasar ile birleştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmamızı eğitmek için kullanılan Bentley'in Context Capture kütüphanesinde yer alan görüntülerin tutarlı nitelikleri göz önüne alındığında, bu yöntemi çatlak analizi için mevcut karşılaştırma ölçütü olarak kullandık. Dokulu bir 3B modelin cephesindeki birkaç çatlak, makine öğrenimi ve derin öğrenme teknikleri kullanılarak tespit edildi. Çatlaklar Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Fotogrametri yöntemi ve SfM algoritması ile üretilen 3B model üzerinden tespit edilen çatlakların (mavi çizgiler) gösterimi

Tablo 3. Test Nesnesi İçin Fotogrametri Yöntemi ile Üretilen 3B Modelin Geometrik Doğruluk Analizi

No	Vx	Vy	Vz	VxVx	VyVy	VzVz	RMSE _{x,y,z}		
DN1	-0.100	0.180	0.380	0.010	0.032	0.144			
DN2	0.370	-2.800	-1.280	0.137	7.840	1.638			
DN3	-0.120	0.210	0.120	0.014	0.044	0.014			
DN4	0.240	0.480	-0.320	0.058	0.230	0.102	0.859	1.353	0.825
DN5	-2.300	1.800	0.840	5.290	3.240	0.706			
DN6	0.160	-0.780	-1.320	0.026	0.608	1.742			
DN7	-0.270	1.620	1.020	0.073	2.624	1.040			
DN8	0.540	0.120	-0.240	0.292	0.014	0.058			

*Birimler cm'dir.

Test nesnesinin 3B modelinin geometrik hassasiyetini zaten değerlendirmiştik. Çatlakların otomatik tespitinden ilk olarak görsel inceleme yapılmış ve çatlakların neredeyse tamamı tespit edilmiştir. Fakat bazı çatlaklar özellikle gölgenin düştüğü alanlarda tespit edilemediği görülmüştür. İkinci metrik analizde manuel olarak ölçülen belirli çatlakların uzunluğu 3B modelin çatlaklarla bütünleştirilmesiyle oluşturulan hasarla artırılmış dijital ikizde yan yana getirdik. Test nesnesi için toplam on çatlak uzunluğu uzmanların rehberliğinde karşılaştırma için değerlendirilmiştir ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Test çalışmasından elde edilen sonuçlar, metodolojimizin tüm bileşenlerinin etkili bir şekilde işlediğini doğrulamaktadır. Yöntem tatmin edici bir doğruluk yakalamıştır ve görsel inceleme sonucunda çatlakların çoğunun tespit edildiği görülmektedir. Metodoloji bu çalışma sonuçlarına göre başarılı gözükse de özellikle çatlak segmentasyonu için kullanılan yaklaşımlarda eğitim kütüphaneleri her çalışma alanına özgü olduğu için, kullanıcının daha iyi eğitilmiş modellere sahip olması durumunda sonuçların doğruluğu değiştirilebilir. Metodolojinin etkinliği büyük ölçüde görüntü verilerinin kalitesine bağlıdır. Görüntü boyutları, çözünürlük, bulanıklık ve bozulma gibi faktörlerin etkisi dikkate alınmalıdır. Ancak, bu bizim çalışmamızın kapsamı dışındadır. Çalışmamızın sonuçlarının kesinliği, segmentasyon tekniklerinde kullanılan SfM ve derin öğrenme algoritmalarının etkinliğine bağlıdır. Modellerimizi eğitmek için kullanılan verilerin ve ek açıklamaların kalitesi ve miktarı derin öğrenme sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Sonuç olarak, çatlak segmentasyonunda yanlışlıklar ve belirsizlikler ortaya çıkabilir. Bu durum, önceden eğitilmiş modellerin kullanılmasına bağlanmaktadır. Sonuçlar, geliştirilmiş derin öğrenme modellerinden ve manuel müdahale veya otomatik eleme yoluyla çatlak olarak belirlenen hatalı verilerin hariç tutulmasından kazanç sağlamaktadır. Amaç, hızlı hasar tespiti için mevcut uygulamayı iyileştirmektir. Bu, çatlakların derinliğinin tespit edilmesi de dâhil olmak üzere hasar özelliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirebilir. Araştırmaların genel sonuçlarına bakıldığında hızlı hasar değerlendirmesine yönelik mevcut uygulamayı iyileştirmeler geliştirilmektedir. Bu yöntemle hızlı değerlendirmeden sonra, hasar özelliklerinin daha derin bir analizi gerekebilir (örneğin, çatlakların derinliklerinin tahmin edilmesi). Bununla birlikte elde edilen sonuçlar son olarak WEB tabanlı görselleştirme ve sanal gerçeklik platformuna aktarılmıştır. Bu sayede uzmanlar yerinde incelemelere alternatif olacak denetimler gerçekleştirebilmektedir. WEB tabanlı sanal gerçeklik, erişilebilirlik avantajı da sunar. İndirme ve kurulum gerektiren yerel SG uygulamalarının aksine WEB tabanlı SG'ye bir WEB bağlantısı üzerinden erişilebilir ve bu da kullanıcıların SG deneyimlemesini kolaylaştırır. Ek olarak WEB tabanlı SG, gerçek zamanlı güncellemelere ve daha dinamik bir kullanıcı deneyimine izin vererek içerik dağıtımını açısından daha fazla esneklik sunar. Yüksek performanslı cihazlara duyulan ihtiyaç ve yüksek internet hızları gibi ele alınması gereken zorluklar olsa da fotogrametri yöntemiyle üretilen 3B dijital ikizlerin WEB tabanlı sanal gerçeklik temsilinin geleceği umut verici görünüyor. Teknolojide devam eden ilerlemeler ve bağlantılı cihaz pazarının büyümesiyle, önümüzdeki yıllarda bu sürükleyici ve etkileşimli deneyimlerin daha fazlasını görmeyi bekleyebiliriz. Çalışmada üretilen yüksek kalitede 3B fotogerçekçi yöntem kısmında belirtilen sebepler dikkate alınarak Sketchfab WEB tabanlı SG görselleştirme platformuna yüklenmiştir (Şekil 6). Şekil 6'da verilen sanal platformdaki dijital ikizler hem karekod okutularak WEB tabanlı görselleştirilebilir hem de sanal gerçeklikte kullanılabilir ve bu sayede diğer kullanıcılara sunulabilir.

WEB tabanlı platforma yüklenen hasarla artırılmış dijital ikizin Şekil 6'da verilen karekodu okutularak veya bağlantı adresine tıklanarak söz konusu WEB tabanlı SG platformu açılabilir. Bu aşama aynı şekilde SG başlığında bir tarayıcıda adres çubuğuna Şekil 7'de gösterildiği gibi girilerek platforma giriş yapılabilir. Platforma giriş yapıldıktan sonra SG giriş sekmesine (View in VR) tıklanarak Şekil 8'de gösterilen arayüze giriş sağlanabilmektedir. Bu sayede WEB tabanlı sanal gerçeklik platformunda hasarla artırılmış dijital ikiz ile yapısal denetim uzmanlar tarafından yapılabilir.

Tablo 4. Test nesnesi için fotogrametri yöntemi ile üretilen 3B modelden tespit edilen çatlakların doğruluk analizi

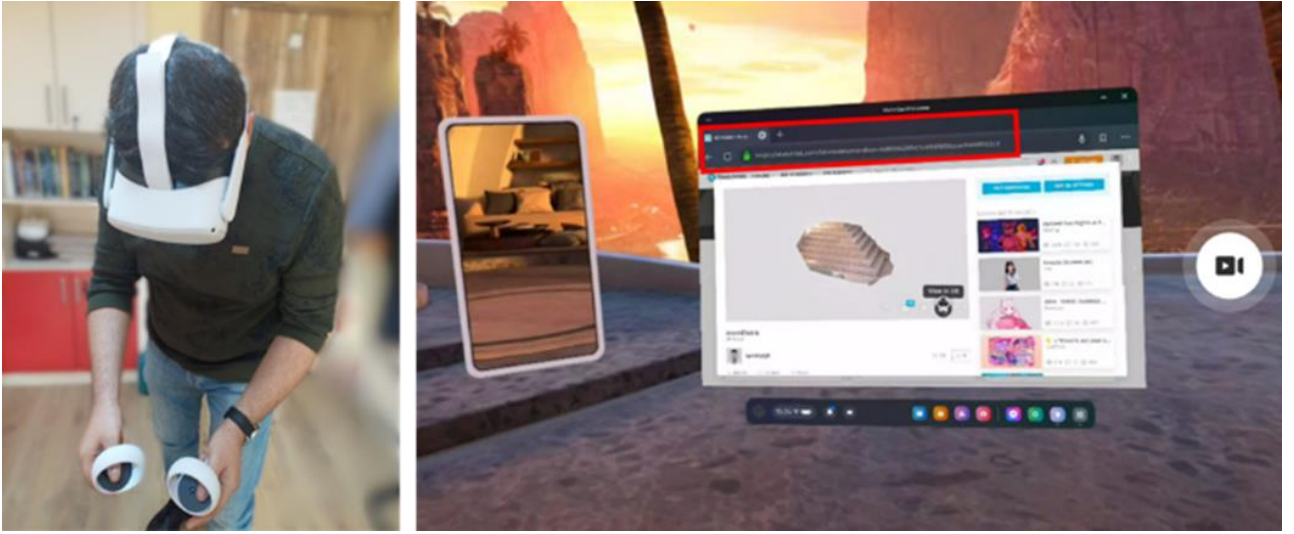
Çatlak No	Klasik ölçüm (cm)	Otomatik tespit (cm)	$ D_i $ (cm)	RMSE _D
1	0.620	0.700	-0.080	0.097
2	4.850	4.768	0.082	
3	10.640	10.556	0.084	
4	4.910	4.868	0.042	
5	4.680	4.486	0.194	
6	8.070	8.156	-0.086	
7	5.260	5.364	-0.104	
8	7.090	7.020	0.070	
9	6.450	6.400	0.050	
10	15.370	15.468	-0.098	

WEB tabanlı Görselleştirme Linki

<https://skfb.ly/oh7RX>



Şekil 6. Hasarla artırılmış dijital ikiz ve WEB tabanlı sanal gerçeklik bağlantısı (<https://skfb.ly/oh7rx>) gösterimi



Şekil 7. Sanal gerçeklik başlığı ve WEB tabanlı sanal gerçeklik giriş arayüzü



Şekil 8. WEB tabanlı sanal gerçeklik arayüzü ve hasarla artırılmış dijital ikiz ile yapısal denetim

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, zahmetli, öznel, maliyetli ve belgelenmesi zor bir süreç olan yapıların denetimini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen yöntem, yapıların daha objektif ve verimli bir şekilde değerlendirilmesinin önünü açmaktadır. Metodoloji, basitleştirilmiş bir poligonal 3B yüzey modeli oluşturmak için SfM tabanlı fotogrametri yöntemi aracılığıyla çok sayıda görüntünün işlenmesini içerir. Üretilen 3B modelden derin öğrenme modeli tarafından belirlenen çatlaklar otomatik olarak tespit edilir ve 3B model ile entegre edilerek hasarla artırılmış dijital ikiz üretilir. Yapısal sağlık izleme amacıyla binaların dijital ikizlerine dayanan mevcut yöntemlerin aksine, önerilen teknik kullanıcı müdahalesi gereksinimlerini azaltmaktadır. Ayrıca hızlı değerlendirmeler ve depolama için uygun kısa bir model oluşturur. Bu sayede yapısal denetimlerde maliyet, hız, doğruluk ve uygulanabilirlik açısından büyük avantajlar sağlanmaktadır. Dahası, görüntü verilerinden elde edilen bilgilerin entegrasyonuna izin verir ve çeşitli varlıklara uygulanabilir. Yaklaşımın etkinliği görüntü verilerinin kalitesine bağlıdır. Görüntü boyutu, çözünürlük, bulanıklık ve gürültü gibi farklı faktörlerin etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Görüntülerde düşük pürüzlülüğe veya yetersiz fazlalığa sahip dokuların başarısız olma olasılığı daha yüksektir. Bunlara ek olarak çeşitli gölge gibi çevresel koşullar ve farklı yapı türleri üzerinde bu yöntemin etkinliğini olumsuz etkilenmektedir. Ek olarak farklı zaman/dönem/mevsimlerde, gün ışığı koşullarında ve yapı malzemelerinde yöntemin doğruluk oranları etkilenmeyeceği unutulmamalıdır. Bu durumlar sonuçta yanlışlıklara ve belirsiz çatlak segmentasyonuna neden olabilmektedir.

Bu çalışmanın bulguları ve sonuçları yöntemin etkinliğini göstermektedir. Bu teknik, güçlendirilmiş yapılardaki sapmalar ve çatlaklar gibi bozulmalar da dâhil olmak üzere ilgilenilen küçük nesnelere taranmasına, tespit edilmesine ve bunlar hakkında bilgi alınmasına olanak tanır. Bununla birlikte, yakın resim fotogrametrisi daha büyük yapılara sahip kapsamlı projeler için uygun değildir. Fotogrametri, birden fazla kamera açısı, önemli miktarda zaman, daha fazla görüntü ve bazı binalar için çeşitli konumlardan karşılaştırılabilir bilgi elde etmek için olası tüm yüzeyleri inceleme ihtiyacı gerektirdiğinden bir zorluk teşkil etmektedir. Bu kısıtlamalar İHA fotogrametrisi ile aşılabılır. İHA fotogrametrisi, yapıları belgeleyen önceki araştırmalarda kanıtlandığı gibi, büyük nesnelere için yeterli ayrıntıya sahip geometrik veriler sağlayabilir.

Genel olarak, önerilen yöntemin 3B model üretiminde kalite açısından büyük başarı elde ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu başarı, makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları aracılığıyla otomatik bir şekilde çatlak tespitinin hassasiyetini önemli ölçüde artırmıştır. Kullanılan eğitim modelinin, açıkça işaretlenmiş öznel değerlendirmelerle deneysel verilere uygun olması gerektiğini vurgulamak önemlidir. Böylece, hasar tespiti için yerinde denetimler yerine bu yaklaşım kullanılarak düşük maliyetli denetimler daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu çerçevenin en önemli avantajının gerçek zamanlı kullanıma olanak sağlaması olduğunu tahmin ediyoruz ve WEB tabanlı SG uygulamalarının denetim sürecini hızlandırabilmektedir. Sonuçların daha fazla kullanıcıya ulaşması günümüz internet teknolojisiyle daha mümkün hale gelmiştir. Elde edilen modellerin WEB tabanlı görselleştirilme sayesinde gerçekçi bir deneyime ulaşılmasının mümkün olduğu ve E-arşiv gibi sanal ortamların hızlı ve etkili bir biçimde yapılabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada üretilen dijital ikiz ve SG entegrasyonu ile işlevsel bir tasarım geliştirerek yapı yönetimindeki mühendislik çalışmalarının mevcut uygulamalarına nasıl katkıda bulunabileceğini gösterilmiştir. Dijital ikizlerin mevcut uygulamada uygulanması çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. Dijital ikizleri mevcut uygulamada uygulamak için önce bir 3B veri modeli geliştirmek gerekir. Ancak, bir 3B veri modeli geliştirmek teknik olarak karmaşık ve finansal olarak pahalıdır. Ayrıca, inşaat sektörü oldukça karmaşıktır. Mühendislik çalışmaları için mevcut yapı yönetimi uygulamalarında dijital ikizlerin uygulanmasının, yapı durumunun denetlenmesi, analizlerinin yapılması ve daha verimli ve etkili bir görsel sunum için SG entegreli kullanımının uygulanması önemli bir aşama olacaktır.

Sonuç olarak gerçek dünyanın tam ve eksiksiz bir modeli doğru ve hızlı bir veri toplama süreci ile bunun temsili olan dijital ikiz kavramında geçmektedir. Bir dijital ikiz geliştirmede ise fotogrametri yöntemleri modelin tam temsilini en iyi yansıtan yöntemlerdir. Elde edilen verilerin anlamlı hale getirilmesi ile ortaya çıkan dijital ikizin ise SG gibi görselleştirme araçları ile kullanıcıya aktarılması analiz ve temsile önemli katkılar sunmaktadır. Çalışma sonunda yapısal 3B modellerin denetim ve analizleri yapılarak SG görselleştirme araçları ile aktarılıp farklı kullanıcılara sunulmuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki dijital ikiz çalışmalarında en iyi temsil senaryolarının gelişmesine ve 3B modellerin SG ile entegrasyonu üzerinden denetim ve analizlerin yapılmasına katkı sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında irdelenen sanal gerçeklik platformları üzerinden uzmanların çatlak analizleri yapma deneyimleri ve kullanıcı geri bildirimleri yapılması diğer çalışmalara öncü bilgiler sunabilir. Bu yöntemin uygulanması için gerekli ekipman, yazılım ve uzmanlık seviyesi gibi faktörlerin detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Ayrıca bu platformların kullanıcı dostu olup olmadığı, pratikçe karşılaşılan zorluklar ve potansiyel iyileştirmelerin neler olduğu konusunda araştırmalar gelecek çalışmalarda yapılacaktır. Son olarak önerilen yöntemler yapısal denetim için olumlu gözükse de dijital ikizler ve sanal gerçeklik platformlarının kullanımıyla ilişkili potansiyel gizlilik ve güvenlik sorunları dikkate alınmalıdır. Bu teknolojilerin kullanımı sırasında veri koruma ve gizlilik standartlarının nasıl sağlanacağına dair yönergeler iyi irdelenmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 23.FEN.BİL.17 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, ikinci yazarın danışmanlığında birinci yazarın doktora tez çalışmasının bir kısmını içermektedir.

Kaynakça

- [1] Masciotta, M. G., Ramos, L. F., Lourenço, P. B. 2017. The importance of structural monitoring as a diagnosis and control tool in the restoration process of heritage structures: A case study in Portugal. *Journal of Cultural Heritage*, 27, 36-47.
- [2] Fidan, Ş., Ulvi, A. 2022. Tarsus Aziz Pavlus Kilisesinin Yersel Lazer Tarama Teknikleri ile Üç Boyutlu Modelinin Oluşturularak Sanal Gerçekliğe Hazırlamanın Değerlendirilmesi. *Türkiye Lidar Dergisi*, 4(2), 60-70.
- [3] De Stefano, A., Matta, E., Clemente, P. 2016. Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6, 83-106.
- [4] Gattulli, V., Lepidi, M., Potenza, F. 2016. Dynamic testing and health monitoring of historic and modern civil structures in Italy. *Structural Monitoring and Maintenance*, 3(1), 71.
- [5] Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N. 2016. Vibration-based structural health monitoring of a historic bell-tower using output-only measurements and multivariate statistical analysis. *Structural Health Monitoring*, 15(4), 438-457.
- [6] Zeybek, M., Kaya, A. 2020. Tarihi Yığma Kiliselerde Hasarların Fotogrametrik Ölçme Tekniğiyle İncelenmesi: Artvin Tbeti Kilisesi Örneği. *Geomatik*, 5(1), 47-57.
- [7] Mirdan, O., Yakar, M. 2017. Tarihi eserlerin İnsansız Hava Aracı ile modellenmesinde karşılaşılan sorunlar. *Geomatik*, 2(3), 118-125.
- [8] Şasi, A., Yakar, M. 2017. Photogrammetric modelling of sakahane masjid using an unmanned aerial vehicle. *Turkish Journal of Engineering*, 1(2), 82-87.
- [9] Blanco, H., Boffill, Y., Lombillo, I., Villegas, L. 2018. An integrated structural health monitoring system for determining local/global responses of historic masonry buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), e2196.
- [10] Yilmaz, I. 2009. A research on the accuracy of landform volumes determined using different interpolation methods. *Scientific Research and Essay*, 4(11), 1248-1259.
- [11] Yamazaki, F., Liu, W. 2016. Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake. 6th ASIA Conference on Earthquake Engineering (6ACEE) 22-24 Eylül, Cebu City, Philippines.
- [12] Hamal, S. N. G., Sarı, B., Ulvi, A. 2020. Using of Hybrid Data Acquisition Techniques for Cultural Heritage a Case Study of Pompeiopolis. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(2), 55-60.
- [13] Şenol, H. İ., Polat, N., Kaya, Y., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M. 2021. Digital documentation of ancient stone carving in Şuayip City. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(1), 10-14.
- [14] Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Oreni, D., Previtali, M., Roncoroni, F. 2015. HBIM and augmented information: towards a wider user community of image and range-based reconstructions. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 40, 35-42.
- [15] Hoskere, V., Narazaki, Y., Hoang, T. A., Spencer Jr, B. F. 2018. Towards automated post-earthquake inspections with deep learning-based condition-aware models. *The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring*, 7WCSCM, Temmuz, 22-25, Qingdao, China.

- [16] Jouan, P., Hallot, P. 2019. Digital twin: A HBIM-based methodology to support preventive conservation of historic assets through heritage significance awareness. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 609-615.
- [17] Angjeliu, G., Coronelli, D., Cardani, G. 2020. Development of the simulation model for Digital Twin applications in historical masonry buildings: The integration between numerical and experimental reality. *Computers & Structures*, 238, 106282.
- [18] Stepinac, M., Lulić, L., Ožić, K. 2022. The role of UAV and laser scanners in the post-earthquake assessment of heritage buildings after the 2020 earthquakes in Croatia. In *Advanced Nondestructive and Structural Techniques for Diagnosis, Redesign and Health Monitoring for the Preservation of Cultural Heritage: Selected work from the TMM-CH 2021*, Aralık, 167-177, Atena, Grčka
- [19] Rainieri, C., Rosati, I., Cieri, L., Fabbrocino, G. 2022, June). Development of the digital twin of a historical structure for SHM purposes. In *European Workshop on Structural Health Monitoring*, Haziran, 639-649.
- [20] Levine, N. M., Spencer Jr, B. F. 2022. Post-earthquake building evaluation using UAVs: A BIM-based digital twin framework. *Sensors*, 22(3), 873.
- [21] Batar, M. 2022. Word-based game development on Android with an efficient graphical data structure. *Turkish Journal of Engineering*, 6(3), 256-261.
- [22] Tanbour, H., Tanbour, E. 2023. A four-wall virtual reality visualization of patient-specific anatomy: Creating full user immersive experience from computed tomography scans. *Turkish Journal of Engineering*, 7(2), 134-140.
- [23] Ernst, F., Akdağ, S., Polat, N., Akaslan, D., Önal, M., & Ekinci, A. 2024. Development of a virtual reality application for the Old Harran School. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(1), 77-85.
- [24] Kaya, Y., Polat, N., Şenol, H. İ., Memduhoğlu, A., Ulukavak, M. 2021. Arkeolojik kalıntıların belgelenmesinde yersel ve İHA fotogrametrisinin birlikte kullanımı. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(1), 9-14.
- [25] Kaya, Y., Şenol, H. İ., Polat, N. 2021. Three-dimensional modeling and drawings of stone column motifs in Harran Ruins. *Mersin Photogrammetry Journal*, 3(2), 48-52.
- [26] Yılmaz, M., Uysal, M. 2016. Comparison of data reduction algorithms for Li DAR-derived digital terrain model generalisation. *Area*, 48(4), 521-532.
- [27] Yılmaz, M., Uysal, M. 2017. Comparing uniform and random data reduction methods for DTM accuracy. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(1), 9-16.
- [28] Erdoğan, A., Görken, M., Kabadayı, A. 2022. Study on the use of unmanned aerial vehicles in open mine sites: a case study of ordu province mine site. *Advanced UAV*, 2(2), 35-40.
- [29] Kabadayı, A. 2022. Maden sahasının insansız hava aracı yardımıyla fotogrametrik yöntemle haritalanması. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 19-23.
- [30] Ulvi, A. 2018. Analysis of the utility of the unmanned aerial vehicle (UAV) in volume calculation by using photogrammetric techniques. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(2), 43-49.
- [31] Seyrek, E. C., Narin, Ö. G., Koçak, T., Uysal, M. 2021. Yüzey araştırmalarında İHA fotogrametrisinin kullanımı: Kolankaya Siperleri örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 69-75.
- [32] Ulvi, A. 2022. Using UAV photogrammetric technique for monitoring, change detection, and analysis of archeological excavation sites. *Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)*, 15(3), 1-19.
- [33] Fernández-Hernandez, J., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., & Mancera-Taboada, J. 2015. Image-based modelling from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry: an effective, low-cost tool for archaeological applications. *Archaeometry*, 57(1), 128-145.

- [34] Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., Carbonneau, P. E. 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and Landforms*, 38(4), 421-430.
- [35] Javernick, L., Brasington, J., Caruso, B. 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182.
- [36] Uslu, A., & Uysal, M. 2021. Kitle kaynaklı fotoğraflar kullanılarak kültürel mirasın üç boyutlu modellenmesi ve web tabanlı görselleştirilmesi: Afrodiasias-Tetrapylon örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 632-639.
- [37] Bryson, M., Johnson-Roberson, M., Murphy, R. J., Bongiorno, D. 2013. Kite aerial photography for low-cost, ultra-high spatial resolution multi-spectral mapping of intertidal landscapes. *PloS one*, 8(9), e73550.
- [38] Gomez, C., Hayakawa, Y., Obanawa, H. 2015. A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology. *Geomorphology*, 242, 11-20.
- [39] Akay, S. S., & Özcan, O. 2023. UAV and smartphone-based 3D modeling integration with augmented reality (AR) animation. *Advanced UAV*, 3(2), 91-99.
- [40] Dietrich, J. T. 2017. Bathymetric structure-from-motion: Extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 355-364.
- [41] Şenkal, E., Kaplan, G., Avdan, U. 2021. Accuracy assessment of digital surface models from unmanned aerial vehicles' imagery on archaeological sites. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 81-89.
- [42] Ahmadabadian, A. H., Karami, A., Yazdan, R. 2019. An automatic 3D reconstruction system for texture-less objects. *Robotics and Autonomous Systems*, 117, 29-39.
- [43] Michele, M., Giuseppe, M., Salvatore, Z. 2017. Low cost digital photogrammetry: From the extraction of point clouds by SFM technique to 3D mathematical modeling. In *AIP conference proceedings*, Temmuz, 1863(1).
- [44] Bentley. 2023. Bentley Context Capture, 2023. Available at <https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture>. Accessed 27 April 2024. Online document
- [45] Bentley. 2023. Context Capture User Guide, 2023. Available at <https://docs.bentley.com/LiveContent/index.html>. Accessed 27 April 2024. Online document
- [46] Fryskowska-Skibniewska, A., Delis, P., Kedzierski, M., Matusiak, D. 2022. The conception of test fields for fast geometric calibration of the FLIR VUE PRO thermal camera for low-cost UAV applications. *Sensors*, 22(7), 2468.
- [47] Uray, F., Varlık, A., Metin, A. 2018. Üç Boyutlu Kent Modellerinde Ayrıntı Düzeyi Kavramı İnce Minareli Medrese (Konya) Örneği. *Geomatik*, 3(1), 74-83.
- [48] Buhur, S., Uluğtekin, N., Gümüşay, M. Ü., Musaoğlu, N. 2023. Turistik amaçlı mekânsal sanal ortamların oluşturulması: Tarihi Yarımada Örneği. *Geomatik*, 8(2), 99-106.
- [49] Zhang, A., Wang, K. C., Li, B., Yang, E., Dai, X., Peng, Y., Chen, C. 2017. Automated pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces using a deep-learning network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(10), 805-819.
- [50] Debroy, S., Sil, A. 2022. An apposite transfer-learned DCNN model for prediction of structural surface cracks under optimal threshold for class-imbalanced data. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1), 83.

- [51] Park, D. 2023. Stability evaluation of rock slopes with cracks using limit analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-19.
- [52] Fu, Y., Downey, A. R., Yuan, L., Zhang, T., Pratt, A., Balogun, Y. 2022. Machine learning algorithms for defect detection in metal laser-based additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 693-710.
- [53] Zeng, S., Chen, J., Cho, Y. K. 2020. User exemplar-based building element retrieval from raw point clouds using deep point-level features. *Automation in Construction*, 114, 103159.
- [54] Al-Thelaya, K., Gilal, N. U., Alzubaidi, M., Majeed, F., Agus, M., Schneider, J., Househ, M. 2023. Applications of discriminative and deep learning feature extraction methods for whole slide image analysis: A survey. *Journal of Pathology Informatics*, 14, 100335.
- [55] Araz, G. 2021. Doğa görünümlerinin sanal uzaya yansımalarının dijital sanat bağlamında incelenmesi. *Anadolu Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri*.
- [56] Karaca, Ş., Önem, E. Ö. 2023. Dijital ikiz teknolojisinin turizm sektöründe kullanım alanları ve etkileri. *Kayseri Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 158-168.
- [57] Aytekin, P., Yakın, V., Çelik, B. H. 2020. Artırılmış gerçeklik teknolojisinin pazarlamadaki yeri. *AJIT-e: Academic Journal of Information Technology*, 10(39), 87-117.
- [58] 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), 1-1.
- [59] Akay, S. S. 2023. İHA Tabanlı 3 Boyutlu Verilere Farklı Perspektiflerde Bakış: İTÜ Ayazağa Kampüsü. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 4(1), 47-63.
- [60] Uluçay, A., Küçük, U. F. 2023. Tarih Öğretiminde Sanal Gerçeklik ve Artırılmış Gerçeklik: Geçmiş Canlandırmak İçin Yeni Yollar. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 113-129.
- [61] Hocoğlu, M. M. 2022. Yapı Bilgi Modelleme'den Dijital İkiz'e doğru: akıllı tesis yönetimini etkinleştirme. *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- [62] Südor, S. 2021. Dijital Sanatlarda 3d Model Oluşturma Tekniklerinin Kullanımı. *İdil Sanat ve Dil Dergisi*, 10(88), 1757-1779.
- [63] Askar, C., Sternberg, H. 2023. Use of Smartphone Lidar Technology for Low-Cost 3D Building Documentation with iPhone 13 Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications. *Geomatics*, 3(4), 563-579.
- [64] Mouzakis, C., Ververidis, D., Girao, L. M., Patz, N., Nikolopoulos, S., Kompatsiaris, I. 2021. Holistic requirements analysis for specifying new systems for 3D media production and promotion. *Sustainability*, 13(15), 8155.
- [65] Onyıl, H. İ., & Yılmaz, M. 2022. Web tabanlı mekânsal analizlerin açık kaynak kodlu yazılımlar ile gerçekleştirilmesi. *Geomatik*, 7(1), 52-57.
- [66] Aydın, M., İralı, A. E., Kartoğlu, N. U., Yılmaz, P. Ü., Atılgan, N. 2023. Kültürel Mirasın Tanıtımına ve Korunmasına Yönelik Farkındalığa Odaklı Sayısallaştırma Süreci Eğitimlerinin Etkisinin İncelenmesi: KÜMSA Örneği. 9. Uluslararası Tarih Eğitimi Sempozyumu. 6-8 Eylül, Sakarya, Türkiye
- [67] Özcan, O., Akay, S. S. 2022. Paşabağ Bölgesi Peri Bacalarına Ait İha Tabanlı 3b Verilerin Metaverse Kavramı Kapsamında Değerlendirilmesi. VIII Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, 17-19 Kasım 2022, Ankara
- [68] Yiğit, A. Y., Uysal, M. 2024, Automatic Crack Detection and Structural Inspection of Cultural Heritage Buildings Using UAV Photogrammetry and Digital Twin Technology. *Journal of Building Engineering*, Article number 109952.

[69] Sketchfab. 2023. Sketchfab WEB sitesi. <https://sketchfab.com/>