



TERSİNE MÜHENDİSLİK YÖNTEMLERİYLE 3 BOYUTLU GEMİ MODELLEME VE RESTORASYON İNCELEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENGİN KANUN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
AĞUSTOS - 2022**

**TERSİNE MÜHENDİSLİK YÖNTEMLERİYLE
3 BOYUTLU GEMİ MODELLEME VE RESTORASYON
İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENGİN KANUN
ORCID ID: 0000-0002-2369-5322

MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
PROF. DR. MURAT YAKAR
ORCID ID: 0000-0002-2664-6251

MERSİN
AĞUSTOS - 2022

ÖZET

TERSİNE MÜHENDİSLİK YÖNTEMLERİYLE 3 BOYUTLU GEMİ MODELLEME VE RESTORASYON İNCELEMESİ

Günümüzde deniz taşımacılığı dünya ticaretinin en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle gemiler büyük bir öneme sahiptir ve tüm dünyada etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Gemi inşa ve gemi onarım endüstrileri; tasarım, imalat, onarım, araştırma ve geliştirme, kalite ve kontrol vb. mühendislik süreçlerinden sıklıkla yararlanmaktadır. Bahsedilen tüm süreçlerde, gemilerin dijital verileri ve CAD çizimleri mühendisler tarafından düzenli olarak kullanılmaktadır. Tüm bu belgeler genellikle çoğu geminin envanterinde yer alırken, bu belgelerin kaybolduğu veya kullanılmadığı durumlar da vardır. Tersine mühendislik çalışmaları, halihazırda mevcut gemilerin dijital verilerinin ve CAD çizimlerinin yeniden yapılandırılmasına olanak tanır.

Gemiler boyutları, karmaşık geometrileri ve eğrilik içeren yapıları nedeniyle ölçülmesi zor yapılardır. Bu sebeple gemi gövdelerinin dijital ortamda 3 boyutlu modelinin oluşturulması hususunda geleneksel ölçüm yöntemleri zaman ve uygulanabilirlik açısından çok yetersiz kalmaktadır. Halihazırda var olan tüm gemilerin kendi envanteri bünyesinde gemiye ait teknik çizimler, ölçüler ve 3B modeli bulunmaktadır. Fakat kimi zaman bu belgeler kaybolabilmekte, eskimekte veya ulaşılmaz bir durumda olabilmektedir. Bu gibi durumlarda var olan geminin ölçümlerinin yeniden yapılması, teknik çizimlerinin ve 3B modelinin yeniden oluşturulması gerekebilmektedir. Bu nedenle ölçümler insan eliyle değil, çoğunlukla ileri teknolojik cihazlarla yapılmaktadır. Fotogrametri ve yersel lazer tarama, gemi sörveylerine katkıda bulunan en çok kullanılan yöntemlerden ikisidir. Bu çalışmada, tarihi bir savaş gemisi olan Nusrat Mayın Gemisi'nin gövdesinin dijital CAD verilerini elde etmek amacıyla cep telefonu tabanlı fotogrametrik yöntem, insansız hava aracı fotogrametrisi ve yersel lazer tarayıcı kullanılarak 3 farklı yöntemle ölçüm ve modellemeler yapılmıştır. Veri toplama, veri işleme, doğruluk analizi ve sonuçlar çalışmada sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Lazer tarama, Fotogrametri, Gemi modelleme, 3B modelleme, Tersine mühendislik.

Danışman: Prof. Dr., Murat Yakar, Mersin Üniversitesi, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

3D SHIP MODELING AND RESTORATION INVESTIGATION WITH REVERSE ENGINEERING METHODS

Currently, maritime transport constitutes the largest part of world trade. For this reason, ships are of great importance and are used effectively all over the world. Shipbuilding and ship repair industries; design, manufacture, repair, research and development, quality and control etc. frequently uses engineering processes. In all the mentioned processes, the digital data and CAD drawings of the ships are used regularly by the engineers. While all these documents are usually in the inventory of most ships, there are cases where these documents are lost or unavailable. Reverse engineering allows the reconstruction of digital data and CAD drawings of already existing ships.

Ships are difficult structures to measure due to their size, complex geometry and curvature. For this reason, traditional measurement methods are very insufficient in terms of time and applicability in creating 3D models of ship hulls in digital environment. All existing ships have their own inventory of technical drawings, dimensions and 3D models of the ship. However, sometimes these documents can be lost, obsolete or inaccessible. In such cases, it may be necessary to re-measure the existing ship, to re-create its technical drawings and 3D model. For this reason, measurements are not made by human hands, but mostly with advanced technological devices. Photogrammetry and terrestrial laser scanning are two of the most used methods contributing to ship surveys. In this study, in order to obtain digital CAD data of a historical Nusrat Minelayer's hull, measurements and models have been made using 3 different methods using mobile phone-based photogrammetric method, unmanned aerial vehicle photogrammetry and terrestrial laser scanner. Data collection, data processing, accuracy analysis and results are presented in the study.

Keywords: Laser scanning, Photogrammetry, Ship modeling, 3D modeling, Reverse engineering.

Advisor: Prof. Dr., Murat Yakar, Department of Geomatics Engineering, Mersin University, Mersin.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sürecinde desteğini ve tecrübesini benden hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Murat YAKAR'a teşekkürlerimi borç bilirim. Çalışmamın yapılabilmesi için gerekli olan alet ve cihazların temini konusunda benden desteğini esirgemeyen Mersin Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü akademik ve idari personeline de ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Mersin ilinin Tarsus ilçesinde bulunan Nusrat Mayın Gemisi Kültür Parkı personeline de ölçümleri yaparken vermiş oldukları desteklerden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimi ve tez çalışmamı başarıyla tamamlamama imkan veren bilgi ve beceriye erişmemi sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma da saygı ve minnetlerimi sunmayı borç bilirim. Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili eşime ve aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	2
2.1. Makine Parçalarında Tersine Mühendislik Uygulamaları	2
2.2. Havacılık Sektöründe Tersine Mühendislik Uygulamaları	7
2.3. Denizcilik Sektöründe Tersine Mühendislik Uygulamaları	8
2.4. Diğer Tersine Mühendislik Uygulamaları	11
3. MATERYAL ve YÖNTEM	15
3.1. Tersine Mühendislik (TM)	15
3.1.1. Tersine Mühendislik Tanımı	15
3.1.2. Tersine Mühendislik Yöntemleri	17
3.1.2.1. Temaslı (Probu) Tarama Yöntemleri	17
3.1.2.2. Temassız Tarama Yöntemleri	18
3.2. Fotogrametri	20
3.2.1. Analog Fotogrametri	20
3.2.2. Analitik Fotogrametri	21
3.2.3. Dijital Fotogrametri	22
3.2.4. Fotogrametride Veri Toplama ve Kamera Kalibrasyonu	23
3.3. Yersel Lazer Tarama (YLT) Tekniği	23
3.4. Uygulama	24
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	38
4.1. Zaman, Maliyet ve Uygulanabilirlik Açısından Yöntemlerin Kıyaslanması	38
4.2. 3B Modellerin Kıyaslanması	40
4.3. Endaze Planlarının Kıyaslanması	43
4.4. Gemiye Ait Eski Proje Verilerinin Günümüzdeki Restore Edilmiş Haliyle Kıyaslanması ve Yorumlanması	46
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	50
EKLER	60
ÖZGEÇMİŞ	72

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Parrot Anafi 4K HDR Drone teknik özellikleri	25
Tablo 3.2. Samsung Galaxy S10 ana kamera özellikleri	26
Tablo 3.3. Kullanılan bilgisayarın teknik özellikleri	29
Tablo 4.4. 3B model doğruluk analizi (lazer) [cm]	45
Tablo 4.5. 3B model doğruluk analizi (mobil) [cm]	45
Tablo 4.6. 3B model doğruluk analizi (İHA) [cm]	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Tersine mühendislik süreci	16
Şekil 3.2. Faro Design ScanArm 2.0 koordinat ölçüm cihazı	18
Şekil 3.3. Lazer tarayıcı cihazlar	19
Şekil 3.4. Fotogrametrik ölçüm düzeneği	19
Şekil 3.5. Fotogrametrik ölçüm düzeni (şematik)	20
Şekil 3.6. Analog fotogrametrik cihaz	21
Şekil 3.7. Analitik fotogrametrik istasyon	22
Şekil 3.8. Dijital hava fotogrametrisi	23
Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan İHA (Parrot Anafi 4K HDR Drone)	25
Şekil 3.10. İHA kullanılarak alınan fotoğraflar	26
Şekil 3.11. Samsung Galaxy S10 cep telefonu	27
Şekil 3.12. Cep telefonu kullanılarak alınan fotoğraflar	27
Şekil 3.13. Faro Focus S serisi yersel lazer tarayıcı (sağda)	28
Şekil 3.14. Yersel lazer tarama (YLT) oturumlarının üstten görünüşü	29
Şekil 3.15. Kamera konumları ve seyrek nokta bulutu (mobil)	30
Şekil 3.16. Yoğun nokta bulutu verisi (mobil)	30
Şekil 3.17. 3B katı model (mobil)	31
Şekil 3.18. Kamera konumları ve seyrek nokta bulutu (İHA)	32
Şekil 3.19. Yoğun nokta bulutu verisi (İHA)	32
Şekil 3.20. 3B katı model (İHA)	33
Şekil 3.21. Seyrek nokta bulutu (lazer)	34
Şekil 3.22. Yoğun nokta bulutu verisi (lazer)	34
Şekil 3.23. 3B katı model (lazer)	35
Şekil 3.24. 3B modelden kesit alma işlemi	36
Şekil 3.25. Kesişim işlemi sonucunda oluşan eğriler	36
Şekil 3.26. Su hattı ve posta eğrileri	37
Şekil 3.27. Ofset tablosunu oluşturan kesişim noktaları	37
Şekil 4.1. Yersel lazer tarama detay alımları	39
Şekil 4.2. Elde edilen 3B modeller (a-mobil, b-İHA, c-lazer)	40
Şekil 4.3. Güverte elemanlarının ölçülmesi	41
Şekil 4.4. Nusrat Mayın Gemisi taslak çizimi	42
Şekil 4.5. Endaze planı (mobil)	43
Şekil 4.6. Endaze planı (İHA)	43
Şekil 4.7. Endaze planı (lazer)	44

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltma/Simgesi	Tanım
T.C.	Türkiye Cumhuriyeti
YÖK	Yükseköğretim Kurulu
MEÜ	Mersin Üniversitesi
FBE	Fen Bilimleri Enstitüsü
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
İHA	İnsansız Hava Aracı
GNSS	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
FDM	Kaynaşmış Biriktirme Modellemesi
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
HES	Hidroelektrik Santral
SLM	Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ertime)
WCSR	Ağırlıklı Kübik Spline Regresyon

1. GİRİŞ

Bu çalışma; tarihi öneme ve milli değere sahip olan Nusrat Mayın Gemisi'nin yersel lazer tarama, yersel fotogrametri ve insansız hava aracı fotogrametrisi yöntemleri kullanılarak dijital ortamda 3 boyutlu olarak modellenmesi ve belgelenmesi adımlarını içermektedir. Daha sonraki aşamada ise bu farklı modelleme yöntemleri kendi aralarında doğruluk, uygulanabilirlik, maliyet, zaman gibi etmenler açısından karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda oluşturulan gemi modellerinin endaze planları elde edilmiştir. Gemiye ait eski paftalar ile günümüzdeki hali kıyaslanarak bir restorasyon değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Gemiye ait endaze planı da her üç yöntem için de elde edilmiş ve sonuçlar kısmında sunulmuştur. Bu çalışma, piyasada bu işi yapacak olan şahıslara ve firmalara kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını detaylı ve karşılaştırmalı bir şekilde sunarak tersine mühendislik yöntemleriyle gemi modellenmesi konusunda yol gösterici olma özelliği taşımaktadır.

Bu çalışmanın uygulanması, saha ve ofis safhaları olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır. Mobil fotogrametri ve İHA fotogrametrisi kullanımının uygulanabilirlik, zaman ve maliyet açısından günümüz endüstriyel uygulamalara kıyasla artılarına karşılaştırmalı olarak değinilmiştir. Aynı zamanda yersel lazer tarama ile gemi modellemenin doğruluk ve zaman parametreleri açısından geleneksel yöntemlere nazaran üstünlüğüne değinilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan literatür araştırmaları neticesinde, konuya ilişkin benzer birtakım çalışmalar olduğu saptanmıştır. Her çalışma kendi içerisinde farklı amaçlar ve yöntemler içermektedir. Literatür araştırmaları bölümünde, daha önce yapılan benzer tüm çalışmalar hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu çalışmanın diğer çalışmalar ile arasındaki farka ve literatüre olan katkılarına değinilmiştir.

Çalışma kapsamında, saha çalışmalarında veri toplamak için 3 farklı alet kullanılmıştır. Mobil fotogrametri yöntemiyle 3 boyutlu gemi modelleme için Samsung Galaxy S10 cep telefonu kamerası kullanılırken, İHA fotogrametrisi ile gemi modelleme aşamasında ise Parrot Anafi 4K HDR insansız hava aracı kullanılmıştır. Son olarak yersel lazer tarayıcı ile veri toplama ve gemi modelleme işlemlerinde ise Faro Focus S model lazer tarayıcı kullanılmıştır.

Mobil fotogrametri ve İHA fotogrametrisi yöntemleri kapsamında Mersin ili Tarsus ilçesinde bulunan Nusrat Mayın Gemisi'ne ait fotoğraflar sistematik bir şekilde elde edilmiştir. Aynı zamanda daha sonra model doğruluk analizi hesaplamalarında kullanmak üzere gemiye ait farklı kısımlardan metre ile uzunluk ölçümleri yapılmıştır. Yersel lazer tarama işlemleri ise yine sistematik bir şekilde dış gövde taramaları ve güverte taramaları olmak üzere yapılmış olup saha çalışmaları adımı tamamlanmıştır.

Saha çalışmaları safhasını ofis çalışması adımları takip etmiştir. Elde edilen fotoğraflar ve tarama verileri işlenerek gemiye ait 3 boyutlu nokta bulutları elde edilmiştir. Ofis çalışmalarında kullanılan yazılımlar ise şu şekildedir: Agisoft Metashape Professional, Faro SCENE, Rhinoceros 6, CorelDraw 2021.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Makine Parçalarında Tersine Mühendislik Uygulamaları

Tersine mühendislik yaklaşımları, karmaşık geometrilere sahip parçaların tekrar tasarımında ve yeniden üretilmesinde karşılaşılabilecek zorlukların aşılması konusunda kolaylıklar sağlamaktadır. Şahin ve diğerleri (2021) tarafından yapılan bir çalışmada hasarlı bir helis dişlinin tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak 3 boyutlu modeli üretilmiş, daha sonra da 3B yazıcı aracılığıyla parçanın hızlı bir prototipi oluşturulmuştur. Elde edilen prototip ile orjinal parça arasında boyutsal karşılaştırmalar yapılarak ürünün doğruluğu irdelenmiştir (Dinçer vd., 2021).

Bir diğer çalışmada, freze takımlarının inşaat güvenliği öncülüğünde çalışma verimliliğini artırmak için ve çalışma performansını analiz etmek için tersine mühendislik temelli yeni bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada, MX97 frezeleme takımının bir 3B lazer tarayıcı ile 3B tarama modeli elde edilmiş ve sonlu elemanlar analizi için tersine mühendislik temelli tam boyutlu bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Ayrıca simülasyon sonucunu doğrulamak amacıyla frezeleme takımları için deneysel bir sistem geliştirilmiştir. Analiz sonuçları, simülasyon ve deney arasındaki hatanın sadece %9,9 olduğunu göstermektedir ve bu, tersine mühendislik temelli analiz yönteminin doğruluğunu ispatlamıştır (Che vd., 2021).

Zhang vd. (2021) yayınladığı bir çalışmada, profil parametrelerine göre deney plakasının pürüzlü yüzeyini yeniden yapılandırmak için WM fraktal fonksiyonu kullanılmış, daha sonra tek biçimli olmayan B-spline global yüzey enterpolasyon yöntemi, 3B yüzeyin oluşturulmasına yardımcı olmak için kullanılmıştır. Plakanın büyük ölçüde gerçek şekli ve deney plakası ile aynı boyuttaki 3B pürüzlü yüzey, tersine mühendislikle yeniden oluşturulmuştur. Son olarak, pürüzsüz olmayan temasın ısı transfer özellikleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmiş, analiz edilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Bu makaledeki araştırma yöntemi, sadece temas yüzeyinin ısı iletim özelliklerini değil, aynı zamanda temas yüzeylerinin sürtünme ve aşınması gibi mühendislik problemlerini incelemek için de kullanılabilecektir.

Kaya cıvataları ve kablo cıvataları gibi çatı cıvataları, yeraltı madenlerinde yapısal destek sağlar. Bu destek yapılarının sık sık değerlendirilmesi, çatı stabilitesini korumak ve yeraltı ortamlarında güvenlik risklerini en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Singh ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada, çatı cıvatalarını 3 boyutlu nokta bulutu verisi formunda sınıflandırmak ve çatı cıvatası yoğunluğu ve aralığı haritaları oluşturmak için tersine mühendislik tabanlı güçlü bir iş akışı oluşturulmuştur. Model, yetersiz aydınlatmaya sahip ve küresel navigasyon uydu sistemi (GNSS) sinyallerinin mevcut olmadığı bir yeraltı kömür madenindeki çatı cıvatalarını belirlemek için değerlendirilmiştir. Oluşturulan model, test alanında bulunan çatı cıvatalarının %89,27'sinin doğru tanımlanmasını sağlamıştır (Singh vd., 2021).

Bir diğer çalışmada, sürdürülebilir bir tersine mühendislik süreci tanımlanmış ve oluşturulan işlem basamakları ile modellenen parçaya ait sonuçlar sunulmuştur. Çalışma beş aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, üzerinde çalışılacak olan parçanın geometrisi, basit geometrilerle ifade edilmiştir. İkinci adımda, bazı simüle edilmiş planlayıcı nokta bulutlarını kullanan temel geometrik şekiller temsil edilmiştir. Üçüncü adım, ikinci adımın nokta bulutlarını birleştirerek koordineli nokta bulutları oluşturmaktadır. Dördüncü adımda, kullanıma hazır bir CAD paketi kullanarak katı bir model oluşturulmuştur. Beşinci ve son adımda ise, katı CAD (Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli kullanılarak 3B yazdırılmış bir prototip oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında modellenen bu iş döngüsü, geleneksel taranmış nokta bulutu tabanlı tersine mühendislik ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, oluşturulan yöntemin hesaplama karmaşıklığından arınmış olduğunu, nispeten doğru modeller oluşturduğunu ve çok hızlı çalıştığını göstermiştir (Saiga vd., 2021).

2021 yılında yayınlanan bir çalışmada, tersine mühendislik ve üretim kontrolü için 3 boyutlu taramayı kullanan metodolojiler ve teknolojilerle bağlantılı olasılıkları ve zorlukları haritalamak için literatür araştırması yapılmıştır. Literatürdeki bulgularla karşılaştırmak için elde taşınabilir bir 3B lazer tarayıcı kullanılarak tersine mühendislik üzerine bir vaka çalışması yapılmıştır. Vaka çalışmasında, karmaşık iç geometri özelliklerine sahip 3B yazdırılmış bir bileşen üç boyutlu taranmış ve iki farklı yüzey modelleme tekniği ile nokta bulutu optimize edilmiştir. Oluşturulan modelin boyutsal hataları işlemde önce haritalanmış ve sonuçlar literatürdeki bulgularla karşılaştırılmıştır. Bu makalenin bulguları, tersine mühendislik ve ürün kontrolü için 3B tarama teknolojilerinin kullanılmasının mümkün olduğunu ancak gürültü ve delikler gibi nokta bulutu kusurlarıyla ilgilenen yeniden yapılandırma algoritmalarının geliştirilmesinde önemli zorlukların bulunduğunu göstermektedir. Tersine mühendislik çalışmaları için 3B taramanın kullanılmasının, manuel olarak ölçülmesi zor olan serbest biçimli yüzeyler gibi karmaşık geometriye sahip bileşenler için en uygun yöntem olduğu bulunmuştur (Helle ve Lemu, 2021).

Bir makalede, tersine mühendislik tekniğine dayalı olarak, bir paneldeki deformasyon faktörleri hakkında çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak, standart direnç nokta kaynağı süreci simüle edilmiş, simüle edilen sonuçlar çıkarılmış ve önemli deformasyonların nedenleri analiz edilmiştir. Daha sonra, sürekli süreçlerde deformasyon gelişimi incelenmiş ve simüle edilen artık deformasyon, ölçüm sonucu ile doğrulanmıştır. Son olarak, sıkıştırma basıncının, elektrot kuvvetinin ve nokta kaynak sırasının artık deformasyon üzerindeki etkisini araştırmak için yedi adet karşılaştırmalı simülasyon tasarlanmıştır. Karşılaştırmalı prosesler ile standart proses arasındaki deformasyon farklılıkları detaylı olarak analiz edilmiştir (Liu vd., 2020).

Başka bir çalışmada, iki antika ateşli silahın tasarımı, tarihi ve kullanımı hakkında önemli ayrıntılar tersine mühendislik yöntemleri sayesinde incelenmiştir. Yaşları ve aşınmış durumları nedeniyle, bu çalışmada analiz edilen silahlar güvenli bir şekilde söküleliyordu, ancak 3B tarama uygulaması, araştırmacıların Yeni Zelanda'nın sömürge tarihinin bir yönüne yeni bakış açıları kazanmasını sağlamıştır. Modeller kültürel bir kaynak oluşturmuş ve diğer bilim adamlarının

kullanımına sunulmuştur. Sürecin diğer makinelerle tekrarlanabileceği umulmaktadır, böylece orijinal işçilik ve antika makineler gelecek nesiller için korunabilecektir (Larocco ve Paeng, 2020).

Bir başka çalışmada dişli bir çark için tersine mühendislik temelli 3 boyutlu modelleme algoritması geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, dişli çarkın gerçek yüzey verilerinden yola çıkılarak 3B sayısal modelin elde edildiği bir matematiksel model geliştirilmiştir (Raffo vd., 2020).

Bauer vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada bir türbin kanadının tersine mühendislik tabanlı ölçüm yöntemi araştırması yapılmıştır. Çalışma kapsamında bilgisayarlı tomografi ve optik tarama olmak üzere iki farklı metot kullanılmış ve 3B yazıcıda yeniden elde edilmiştir. Elde edilen ürünlerin kalitesi her iki yöntem için kıyaslanmıştır.

2019 yılında yayınlanan bir başka makale direnç nokta kaynaklı çelik sacların boyutsal saptmaları, deformasyonu ve artık dirençlerinin tersine mühendislik yöntemi olan lazer tarama ile saptanması çalışmalarını içermektedir (Liu vd., 2019).

Bir makalede, eski takım tezgahlarına ait mekanik parçaların orijinal tasarım özelliklerini çıkarmak için bir tersine mühendislik yaklaşımı sunulmuş ve analitik, sonlu elemanlar analizi ve deneysel yöntemler kullanarak ikinci yaşam döngüsünde güvenilir performanslarını sağlamak için bir inceleme yaklaşımı oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, her tür takım tezgahının herhangi bir mekanik parçasını kurtarmak için kullanılabilir. Takım tezgahlarının yeniden imalatını, yeniden inşasını veya güçlendirilmesini kolaylaştırmak için sistematik bir yaklaşım sağlayarak, makine imalatçılarına, kullanıcılara ve bağımsız yeniden imalatçılara eski makineleri geri alma konusunda yardımcı olmaktadır. Ayrıca, eski makineler nedeniyle endüstriyel atıkları azaltmak ve mevcut üretim sistemlerini Endüstri 4.0 için yükseltmek için sürdürülebilir bertaraf yöntemleri alanında gelecekteki araştırma yönergeleri için bir temel oluşturmaktadır (Engel ve Al-Maeni, 2019).

Hofmann ve Gröger (2019) tarafından yayınlanan bir çalışmada mekanik bir parçaya ait geometrik toleransın belirlenmesi ve üretime entegrasi hususunda tersine mühendislik yöntemiyle ölçümler yapılmıştır.

Prototip üretimlerinde FDM baskılama oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir. Kaynaşmış biriktirme modellemesi (FDM), termal plastiklerin filamentlerini belirli bir desene göre biriktirmek için eriyik ekstrüzyon yönteminin kullanıldığı bir teknolojidir. Bir çalışmada, mekanik parçaların kesitlerinden 3B model üretmeye yarayan bir algoritma geliştirilmiştir. Elde edilen CAD modeli ile parçaya ait FDM baskı modeli kıyaslanmış ve gerçek parçayı hangi yöntemin daha iyi temsil ettiği araştırılmıştır. Çalışma sonucunda tersine yöntemle elde edilen CAD modelinin reeldeki parçayı daha doğru temsil ettiği sonucuna varılmıştır (Rupal vd., 2019).

Bir başka çalışmada, Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzemeye sahip parçaların tersine mühendislik yöntemlerinden birisi olan lazer tarama ile 3B modelinin elde edilmesi ve FDM baskılama ile üretimi aşamaları yer almaktadır. CAD ölçüm verileri ile FDM baskı verileri kıyaslanmış ve üretim parametreleri incelenmiştir (Mora vd., 2019).

2018 yılında yayınlanan bir çalışmada, bir otomobile ait ön çatalın geometrisine ait nokta bulutu verisi temaslı prob kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen nokta verilerinin işlenmesi ile 3B model üretilmiştir. Üretilen 3B model üzerinde sivri uçla işleme sürecinin bir simülasyonu gerçekleştirilerek parça üzerindeki eşdeğer gerilme ve burkulma değerleri araştırılmıştır. Daha sonra ise geleneksel yöntemlerle tersine mühendislik yöntemi ile yapılan bu hesaplamaların sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır (Ramnath vd., 2018).

Bir motorun bileşenlerinin dizayn sürecinde gerekli tüm parametrelerin belirlenmesi için tersine mühendislik yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Ramnath vd. (2018) tarafından yayınlanan bir çalışmada, bir krankşafta ait tersine mühendislik çalışmaları kapsamında, 3 farklı materyalden (döküm demir, alüminyum alaşımlı ve dövme çelik) üretilen şaftların yorulma dayanımları incelenmiştir.

Önçağ vd. (2018) tarafından yayınlanan bir makalede, mekanik parçaların tersine mühendislik yöntemleriyle modellenmesi konusu incelenmiş, ve bir turboşaft dirseği modellenip 3 boyutlu yazıcıdan çıkarılarak analizler yapılmıştır.

Buonamici vd. (2018) tarafından yayınlanan bir çalışmada, mekanik parçaların tersine mühendisliği ile ilgili detaylı bilgiler verilmiş olup örnek uygulama olarak bir elektrik soketi adaptörünün 3B modeli üretilerek üzerinde analizler yapılmıştır.

2018 yılında yayınlanan başka bir çalışmada, bir hidroelektrik güç santaline ait türbin kanadı lazer tarama yöntemiyle 3B olarak modellenmiş, kanadın emme ve basınç yüzeyleri üzerinde pürüzlülük ve yüzey analizleri yapılmıştır (Zivkovic vd., 2018).

İşbilir vd. (2018) tarafından yayınlanan bir makalede, bir araca ait üstyapı dönüşümü işlemi tersine mühendislik yöntemlerinden biri olan 3B lazer tarayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında araca ait tavan yükseltme işlemlerinin güvenilirliğini doğrulamak için 3B model üzerinde sonlu elemanlar metoduyla gerilme analizi yapılmıştır. Aynı zamanda üretimin uygulanabilirlik, maliyet ve güvenlik gibi faktörler açısından incelenmesi de yine tersine mühendislik çalışmaları kapsamında sunulmuştur.

2017 yılında yayınlanan bir makalede, yıpranmış mekanik parçalar üzerinden yeniden üretim süreci tersine mühendislik yöntemleriyle desteklenmiştir. Hasarlı parçanın CAD modeli 3B optik tarayıcı ile oluşturulmuş ve ardından hasarlı veya aşınmış bölgeler modelden ayrılarak yüzey düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir (Li vd., 2017).

2017 yılında yayınlanan bir çalışmada temassız lazer tarayıcı ile var olan bir türbinin kanadının geometrisi oluşturulmuştur. Çalışmada temaslı tarayıcılara nazaran temassız lazer tarayıcıların üstünlüklerine değinilmiş ve tersine mühendislik çalışmaları kapsamında lazer tarama ile muayene işleminin uygulanabilirliği gösterilmiştir (Satyanarayana vd., 2017).

Bir başka çalışmada hasarlı dişlilerin tersine mühendislik yaklaşımıyla yeniden oluşturulması işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında makine elemanlarının hızlı prototipleme metotları ile üretilmesi sürecinin parçaları geliştirmede karşılaşılan sorunlara çözüm bulmada büyük öneme sahip

olduğu gerçeğine değinilmiştir. 3B yazıcı kullanılarak hasarlı dişlinin bir prototipi oluşturulmuş ve orjinal parça ile karşılaştırmaları yapılmıştır (Şahin vd., 2017).

Sokół ve Cekus (2017) tarafından yayınlanan bir makalede parçaların restorasyon sürecinde tersine mühendislik tabanlı yaklaşımların çözüm olabileceğine değinilmiştir. Çalışmada örnek olarak bir motorsikletin küçük ölçekli modelinin hasarlı durumdaki ön çamurluğu lazer tarayıcı yardımıyla bilgisayar ortamında 3B olarak modellenmiştir. Hasarlı bölgelerin ağ yapısı düzeltildikten sonra restore edilmiş model, 3B yazıcıda basılmış ve boyanarak montaj işlemi tamamlanmıştır.

Bir başka çalışmada, yatay eksenli bir mikro hidrokinetik türbinin kırık kanadı için tersine mühendislik tabanlı bir yöntem olan lazer tarama ile 3B model oluşturulmuştur. Elde edilen model üzerinde akış analizi yapılarak sağlanan hidrolik güç hesaplanmıştır. Daha sonra model kullanılarak prototip üretilmiş ve akış analizi ile gerçek deney sonuçlarının örtüştüğü belgelenmiştir (Ciocănea vd., 2016).

2016 yılında tamamlanan bir yüksek lisans tezinde, teknik çizim verilerini elde etmenin olanaksız olduğu Francis tipi su türbini çarklarının rehabilitasyon süreci için tersine mühendislik yaklaşımının gerekli olduğu bir vaka incelenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen tasarım yöntemi BUSKİ HES çarkına uygulanarak doğrulanmıştır. Daha sonra ise Kahta HES çarkı için uygulama yapılmış ve rehabilitasyon çalışması tamamlanmıştır. Çalışma sonucunda %96.5 verime sahip yeni bir çark geometrisi elde edilmiştir (Kaplan, 2016).

Bir başka çalışmada, tersine mühendislik yöntemlerinin mekanik parçalar üzerindeki uygulama başlıkları anlatılmıştır. Eğrilik tahmini, parça sınırlarının belirlenmesi, kümeleme işlemleri ve segmentleme gibi birçok işlemin tersine mühendislik ile elde edilen 3B modeller üzerinde gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir (Anwer ve Mathieu, 2016).

Tersine mühendislik yöntemlerinin akış analizi çalışmalarında da kullanılabileceği 2015 yılında Morini ve diğerleri tarafından yayınlanan bir makalede gösterilmiştir. Çalışmada mekanik bir parça tersine mühendislik yöntemleriyle 3 boyutlu olarak modellenmiş ve ardından parçanın 3B modeli üzerinde akış analizi gerçekleştirilerek basınç ve hız hesaplamaları yapılmıştır. Aynı zamanda potansiyel sızdırma bölgeleri de hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir (Morini vd., 2015).

2015 yılında yayınlanan bir çalışmada tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen 3B mekanik parça modelleri üzerinde hata giderme ve düzgünleştirme süreci gösterilmiştir. Çalışmada sunulan metot sayesinde elde edilen 3B modeller ilk versiyonlarına göre gerçeğe daha yakın ve hatasız hale getirilmektedir (Kovács vd., 2015).

Bir başka çalışmada nikel alaşımlı bir türbin kanadı, optik tabanlı lazer tarayıcı ve X-ray bilgisayarlı tomografi cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda türbin kanadının dış yüzeyi ve iç soğutma kanalları 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Ayrıca lazer tarama ve tomografik ölçüme ait 3B modeller kendi aralarında karşılaştırılarak yüzeydeki sapmalar tespit edilmiştir (Gameros vd., 2015).

2015 yılında yayınlanan bir başka çalışmada, lazer kesim cihazına ait uçlar lazer tarayıcı kullanılarak 3B olarak modellenmiştir. Elde edilen modeller üzerinde yüzey sapma analizi

gerçekleştirilmiş, ayrıca kesim işlemi sırasındaki deformasyonlar da simüle edilerek öngörülmüştür (Valerga vd., 2015).

Bir başka çalışmada ise bir sıkıştırılmalı ısı pompası tersine mühendislik yöntemleriyle 3B olarak modellenmiştir. Ardından model üzerinde akış analizi yapılarak termodinamik döngüler için uygun akışkan seçimi yapılmıştır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçları kıyaslanarak doğruluk mertebesi sunulmuştur (Roskosch ve Atakan, 2015).

2.2. Havacılık Sektöründe Tersine Mühendislik Uygulamaları

Bir çalışmada mikro oluklu kanatların akış özelliklerini incelemek ve bunu gelecek nesil mikro hava araçlarının kanat hesaplamalarında kullanmak için referans bir ön çalışma niteliğinde göstermek amacıyla gerçek bir kızböceğine ait arka kanat, yakın mesafe fotogrametrisi ile yeniden oluşturulmuş ve 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Yine aynı kanadın mikro bilgisayarlı tomografi tarama tekniği kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu modeliyle önceden elde edilen fotogrametrik model karşılaştırılmış ve yakın mesafe fotogrametrisi ile elde edilen modelin mikro dalga modelini başarıyla tahmin edebildiğini göstermişlerdir. Çalışmanın sonraki aşamasında ise düşük Reynolds sayılarında ve 10° hücum açısında her iki modele ait serbest akış hızı, girdap dağılımı, sınır tabakası ve akış görselleştirmesi sonuçları elde edilip kendi aralarında kıyaslanmıştır. Her iki tersine mühendislik yöntemiyle elde edilen sonuçlarda oluklu desenler etrafındaki akış davranışı gerçek vakayla tatmin edici bir uyum göstermiştir (Chitsaz vd., 2021).

Üç boyutlu profil taraması, monte edilmiş büyük uçakların muayenesinde çok önemli bir rol oynar. Liang ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada büyük ölçekli kavisli parçaların ve bileşenlerin yüksek yansıtıcı profillerinin temassız otomatik ölçümlerini elde etmek için, yüksek doğruluk ve yüksek verimliliğe sahip otomatik bir temassız sistem ve yöntem sunulmaktadır. İlk olarak, yüksek yansımının ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisinden kaçınırken temassız ölçümler elde etmek için yakınlık sensörlerine ve kameralara dayalı hibrit bir 3D koordinat ölçüm sistemi önerilmiştir. Ölçülen noktaların yüksek doğrulukta 3 boyutlu koordinatlarını belirlemek için yakınlık sensörleri tarafından ölçülen tek boyutlu mesafeler ile kameralar tarafından elde edilen 3 boyutlu bilgileri birleştiren hibrit bir ölçüm modeli önerilmiştir. Ardından, profili çizmeden veya önerilen sistemin ölçüm aralığını aşmadan profili etkin aralıkta hızla taramak ve yeniden oluşturmak için profil odaklı bir 3D otomatik tarama yöntemi ve stratejisi tasarlanmıştır. Otomatik tarama işlemi, profil rekonstrüksiyonu için ortalama 0.121 mm'den daha az hata ile 208 s'lik bir zaman diliminde tamamlanmıştır. Bu nedenle, önerilen yöntem, büyük uçaklar için profil incelemelerinin hem yüksek doğruluk hem de yüksek verimlilik gereksinimleri göz önüne alındığında umut vericidir (Liang vd., 2021).

Uçak gövdelerinin ve aerodinamik yüzeylerin muayenesi, havacılık bakımında çok önemli bir görevdir. Geleneksel olarak bu iş, havayolları için büyük bir maliyet olan gövdenin tüm parçalarını manuel olarak kontrol eden bakım personeli tarafından yapılmıştır. Bir makalede, bu inceleme

görevlerini kolay ve doğru bir şekilde gerçekleştirmek için düşük maliyetli taşınabilir 3B tarama sistemlerinin uygulanmasının fizibilitesi değerlendirilmiştir. Bir LIDAR Kinect One sensör, fotogrametri yazılımı kullanan bir Sony Alpha 6000 dijital kamera ve bir stereoskopik ZED kamera arasında metrolojik (ölçüme dayalı) bir karşılaştırma yapılmıştır. Havacılık yüzeylerini denetlemek için hangi teknolojinin en uygun olduğunu belirlemek için davranışları ve ana hata kaynakları karakterize edilmiştir. Kinect LIDAR sensörü, en umut verici sonuçları göstermiştir ve bu teknolojiyi gelecekte uçak bakım görevlerine uygulama olasılığının önünü açmıştır (Aldao vd., 2021).

2019 yılında yayınlanan bir çalışmada Segreto ve diğerleri ultrasonik temassız test yöntemi kullanarak havacılık bileşenlerinin kalite değerlendirmesi sürecini aktarmışlardır. Tersine mühendislik uygulaması olarak çalışma kapsamında karbon elyaf takviyeli plastik parçanın dış geometrisini elde etmek için lazer tarayıcı kullanılmıştır. İç malzeme yapısının tespitinde ise temassız ultrasonik görüntüleme kullanılmıştır (Segreto vd., 2019).

Mekanik parçaların tersine mühendislik tabanlı seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle replikalarının üretilmesi konusundaki kısıtlamalar ve zorluklara Elizondo ve Reinert tarafından 2019 yılında yayınlanan bir çalışmada değinilmiştir. İkili, yaptıkları çalışmada Nieuport 23 C-1 uçağından bir parça olan bir kanat tutucunun replikasını üretmek için 3B tarayıcı kullanmış ve SLM makinesiyle üretmişlerdir (Elizondo ve Reinert, 2019).

2015 yılında yayınlanan bir makalede, özel üretim hava aracı parçalarının montaj sürecini desteklemek için tersine mühendislik tabanlı bir prototipleme uygulaması sunulmuştur. Nokta bulutu verisi elde edilen parçanın 3B modeli elde edilerek prototipi üretilmiş ve benzer parçalarla karşılaştırılmıştır (Gómez vd., 2015).

Tersine mühendislik yöntemlerinden biri olan fotogrametrik ölçüm metodunun endüstriyel uygulamalarda kullanımına Jing vd. (2015) tarafından yayınlanan bir makalede sunulan uygulamalar örnek olarak gösterilebilir. Çalışmada Boeing 777 model bir uçağın kanat geometrisine ait ölçümlerin fotogrametri ile yapılabileceği gösterilmiştir. Yine aynı çalışmada, Avrupa Uzay Ajansı bünyesindeki bir uzay teleskobunun deformasyon analizi için gerekli ölçümlerin de fotogrametrik yöntemlerle yapıldığı gösterilmiştir.

2.3. Denizcilik Sektöründe Tersine Mühendislik Uygulamaları

Bir çalışmada, jeodezide yaygın olarak kullanılan fotogrametri tekniği uygulanarak, gerçek ölçümler doğrultusunda kusurlu yapıların modellenmesi ve analiz edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, fotogrametrinin kusurlu mühendislik nesnelerinin yapısal analizine yardımcı olma kabiliyetini vurgulamaktadır. İlk olarak, sertleştirilmiş bir plakanın (gemi stifnerinin) fotogrametrik ölçümleri, bu amaç için özel olarak tasarlanmış bir deney standı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, plaka yüzey geometrisi ve yapısal konfigürasyon, ticari yazılım kullanılarak yeniden yapılandırılmıştır. Ortaya çıkan nokta bulutu, özel olarak geliştirilmiş bir algoritma kullanılarak kontrollü bir ızgara boyutuna

sahip düzenli bir ağa dönüştürülmüştür. Ölçülen başlangıç kusurları ile sertleştirilmiş bir plakanın geometrisi daha sonra bir sonlu eleman modeline aktarılmış ve analiz edilmiştir. Farklı kusur modelleme teknikleri dikkate alınarak sertleştirilmiş plakaların nihai dayanım analizi yapılmıştır. Sonuçlar kısmında, ölçülen kusurlar ile elde edilenler karşılaştırılmış sonuçlar sunulmuştur. Önerilen metodolojinin uygun maliyetli olduğu ve gemi inşası ve okyanus mühendisliğinin çeşitli dallarında uygulanabileceği ortaya çıkmıştır (Woloszyk vd., 2021).

Jeo-uzamsal verileri elde etmek için jeodezik ve hidrografik sistemlerin, yöntemlerin ve ölçüm cihazlarının kullanılması, 3B uzayın ve ilgili nesnelerin entegre modellenmesini sağlar. Yat limanının deniz tabanı kabartması ve kara altyapısı gibi faktörlerin yat limanında gemilerin güvenli kalmasını sağlamak için dikkate alınması gerekir. Yayımlanan bir makalede, Gdansk'taki Ulusal Yelken Merkezinin yat limanının batimetrik ve jeodezik ölçümlerinin sonuçları sunulmuştur. Hidrografik insansız yüzey gemisi, GNSS konumlandırma, hidroteknik yapıların jeodezik envanterinin ve liman altyapısının yanı sıra kara nesnelerinin üç boyutlu sunumuyla sonuçlanan lazer tarama gibi çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Araştırma ve analizler sonucunda yat limanının iki boyutlu batimetrik haritası çıkarılmıştır. Jeodezik ve hidrografik verilerin entegrasyonu sayesinde marina alanının üç boyutlu görselleştirilmesi sağlanmıştır. Haritalar, limanda manevra yaparken ve rıhtımlarda demirlenirken gemi seyrüsefer güvenliğini sağlamak için kullanılabilecektir (Makar vd., 2020).

2020 yılında yapılan bir tez çalışması kapsamında gemi inşaatı alanında tersine mühendislik çalışmalarının uygulamaları sunulmuştur. Çalışmadaki ana maksat genel gemi verilerinden yola çıkılarak detaylı tasarım verileri olmadan yaşı veya üretim süreci farketmeksizin bir geminin gövdesini yeniden oluşturabilecek bir tersine mühendislik tekniği geliştirmektir. Geleneksel manuel ölçüm yöntemleri ve temaslı ölçüm cihazları kompleks yapıdaki gemi geometrilerini ölçmede yetersiz kaldığından dolayı lazer tarama ve fotogrametri yöntemlerinin gemi inşa endüstrisinde kullanımının gerekliliğine değinilmiştir. Çalışmada genel gemi verilerinden yararlanılarak (gövde form parametreleri) bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Daha sonra 3B modeli elde edilmek istenen gemiye ait birtakım isterler girilerek tahmini bir gövde oluşturan yöntem elde edilmiş ve çalışma kapsamında sunulmuştur (Athanasios, 2020).

Guan ve Gu (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, bir gemi gövdesine ait 3 boyutlu nokta bulutu verisi lazer tarama yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen nokta bulutu verisinden yeni bir yüzey modeli oluşturulmuştur. Elde edilen yüzey modeli ile halihazırda var olan geminin yüzeyi kıyaslanmış ve yeni modelin daha pürüzsüz hatlara ve az hataya sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın neticesinde, tersine mühendislik metodlarıyla yeniden yüzey üretme işlemlerinin gemi yüzey tespiti ve yeniden dizaynı iş süreçlerinde lazer tarama yönteminin üstün kabiliyetleri gösterilmiştir.

Bir başka çalışmada ise bir gemi pervanesine ait dizayn parametreleri tersine mühendislik yöntemlerinden birisi olan lazer tarama metodu ile hesaplanmıştır. Normal şartlarda teknik çizimleri ve ölçüleri olan bir pervanenin dizayn parametrelerini hesaplamak için tersine mühendislik yöntemlerine gerek yoktur; fakat halihazırda var olan ve üretim verileri bulunmayan pervaneler için bu çalışmada

sunulan metot sayesinde tasarım verilerine gerek kalmadan dizayn parametrelerini hesaplamak mümkün kılınmıştır (Munthe-Kaas, 2018).

McCarthy vd. (2020) tarafından yayınlanan bir kitapta deniz arkeolojisi alanında bazı çalışmalara yer verilmiş, 3B tersine mühendislik çalışmaları yayınlanmıştır. Kitap bünyesinde bazı tarihi gemilerin kalıntılarına ve sualtında bulunan batıklara ait 3B modeller elde edilerek üzerlerinde ölçümler ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Yayınlanan bir çalışmada, yersel lazer tarayıcı kullanılarak 2 adet tekne prototipi üç boyutlu olarak modellenmiştir. Yeni bir kalibrasyon metodu geliştiren araştırmacılar, birleştirme ve boyut analizi yaparak yöntemlerinin doğruluk mertebesini sunmuşlardır (Abbas vd., 2017).

Bir başka çalışmada fotogrametrik yöntemler kullanılarak sualtı kültürel mirasını anlamaya ve keşfetmeye yönelik oyunlar geliştirilmiştir. Sualtı kalıntılarının fotoğrafları çekilerek sanal ortamda modellenmiş, sanal gerçeklik gözlüğü ile kullanıcılara kalıntıları ve sualtındaki bazı canlıları keşfetme imkanı sunulmuştur (Bruno vd., 2017).

2016 yılında yayınlanan bir çalışmada gemi inşa alanında 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanımına dair literatür araştırması yapılmıştır. Çalışmada 3B baskılamının kullanıldığı sektörlere örnek olarak askeri amaçlı kullanım, eğitim amaçlı kullanım, gemi prototipleme, sualtı arkeolojisi gibi çalışmalar gösterilmiştir (Georgiev, 2016).

Bir diğer çalışmada, tarihi bir Avustralya savaş gemisinin batığına ait fotogrametrik ve lazer tarama metotlarıyla elde edilen 3B modelinden bahsedilmiştir. Makalede geminin tarihteki rolü ve önemine dair detaylı bilgiler verilmiş ve batık üzerinde yapılan ölçümler ve modelleme işlemleri ile tersine mühendislik tabanlı tarihsel araştırmalar gerçekleştirilmiştir (Hunter ve Jateff, 2016).

Bir başka çalışmada bir kargo gemisinin iç kompartmanlarının geometrik ve görsel olarak 3 boyutlu belgelenmesi adımları sunulmuştur. Çalışmada tersine mühendislik yöntemlerinden lazer tarama ve fotogrametri kullanılarak bir konteyner gemisinin borda iç yüzeyi ve destek elemanlarının üç boyutlu olarak detaylı modellenebileceği gösterilmiştir (Stentoumis vd., 2016).

Günpınar (2016) tarafından yayınlanan bir çalışmada, tersine mühendislik yöntemleriyle 3 boyutlu modellerin oluşturulması süreci hakkında genel bilgi verilmiş, daha sonrasında ise gemi yapım endüstrisindeki bazı uygulamalara değinilmiştir. Tersine mühendislik yöntemlerinin gemi inşa sanayisindeki yeri ve önemi başlığını inceleyen bu çalışmada, bir LNG gemisindeki sekizgen tankın 3B modelinin elde edilme süreci anlatılmıştır.

Fotogrametrik ölçüm yöntemlerinin denizcilik ve sualtı arkeolojisi alanlarındaki kullanımına dair bir çalışma da yayınlanmıştır. Çalışmada Sicilya'da bulunan 2 adet mermer taşıyan kargo gemisi sualtı fotogrametrisi ile modellenmiştir. Modellenen parçalar üzerinde detaylı ölçümler alınabilmektedir. Parça boyutları ve deniz tabanındaki konumları göz önünde bulundurularak mermerlerin gemi üzerinde taşınırkenki istifleme şekli de varsayımsal olarak modellenmiştir (Balletti vd. 2015; Balletti vd., 2015).

2015 yılında yayınlanan bir rapor serisinde, tersine mühendislik yöntemlerinden birisi olan lazer taramanın askeri gemi üretim süreci, gemi yaşam döngüsü süreci kontrolü, gemi verilerinin kontrolü, silahlı kuvvetlerde katmanlı üretim süreci gibi uygulamalarda kullanımına dair veriler ve sonuçlar sunulmuştur (Housel vd., 2015).

2.4. Diğer Tersine Mühendislik Uygulamaları

Tersine mühendislik yöntemlerinin kullanıldığı, yukarıda değinilen alanlar dışındaki uygulamalara ise bu başlık altında değinilmiştir. 2021 yılında yayınlanan bir çalışmada, Yuan ve diğerleri çok katmanlı iplik modellerini oluşturdıkları kumaşların bir balistik darbe olayında sönümlediği enerjiyi ve hasarlanma sürelerini tersine mühendislik yöntemleriyle incelemiş ve bu modelden elde ettikleri korelasyon katsayıları yardımıyla diğer malzemelerin iplik modellerinin davranışlarını simüle etmişlerdir (Yuan vd., 2021).

Bir çalışmada, bir otomobil gövdesi yüzeyindeki lazer lehimleme kaynakları için model tabanlı segmentasyonlu lazer vizyonu kullanan bir kusur tespit yöntemi önerilmiştir. Yöntem, hızlı algoritma ile ağırlıklı kübik spline regresyon (WCSR) modeli kullanılarak kaynak yüzeyi konturlarının dinamik olarak uydurulmasıyla elde edilmiştir. Daha sonra modelin çıktıları üzerinde çoklu karar analizi yoluyla, konturun kusurlu olup olmadığı ve kusurun doğası belirlenmiş ve son olarak kusur tamamen kaldırılmıştır. Tüm süreç tamamen otomatiktir ve önceden kusur bilgisi gerektirmemektedir. Deneysel sonuçlar, modele dayalı bölütleme yönteminin, gerçek doğruluk gereksinimlerini karşılarken birden çok kusur türünü etkin bir şekilde ayırmayı başardığını göstermektedir. Önerilen yöntemin sağlamlığı, bir fabrika ortamında kaynak kusurlarının çevrimiçi denetiminin gerçekleştirilmesine yardımcı olan, sensörün gürültü girişimi ve dengesiz hareketi durumunda test yoluyla kanıtlanmıştır (Hua vd., 2021).

Tersine mühendislik; ürün üretim sürecini optimize eder, ürün geliştirme döngüsünü kısaltır ve üretim verimliliğini artırır. Karmaşık yüzeylerin modellenmesi, tasarlanması ve üretilmesi süreçlerinde geleneksel ölçüm yöntemlerinin ölçüm sapması, karmaşıklık ve sıkıcılık içermesi, zaman alıcı olması ve yoğun emek gerektirmesi gibi etmenlerden dolayı kullanılması nispeten zordur. Tersine mühendisliğin yenilikçi yöntemleri ise ürün geliştirmeyi hızlandırır, döngüyü kısaltır ve maliyetleri düşürür. Bir çalışmada, yenilikçi ürün tasarımı ve 3B-baskı teknolojisine dayalı olarak kask ürünlerinin hızlı tasarımı ve geliştirilmesi, ve aynı zamanda personelin kullanım konforunun artırılması için teknik bir rota oluşturulmuştur. Çalışmada, fiziksel modelin (bir insan kafasının) nokta bulutu verileri 3B tarayıcı ile elde edilmiş olup veri işleme, yüzey rekonstrüksiyonu ve yüzey uydurma adımları gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde elde kafa yüzeyinin kesit eğrisi çıkarılmıştır. Bu kesit eğrilerinden hareketle, personelin kafa yapısına (formuna) en uygun kask modeli elde edilmiştir. Daha sonra, kaskın ileri tasarımı için parametre değişim komutu aracılığıyla çıkarılan bilgiler ileri tasarım yazılımına gönderilmiş ve ardından elde edilen 3B kask modeli yazdırılmıştır (Wang vd., 2021).

Bir başka makalede, ulaşım alanında 3B modeller oluşturma potansiyel bir yolu olarak fotogrametri ele alınmıştır. Çalışmadaki temel amaç, fotogrametrinin ulaşım araçlarının ve ulaşım birimlerinin 3 boyutlu modellerini oluşturup oluşturamayacağını test etmektir. Çalışmada; askeri bir tanka ait plastik model ve gerçek bir forklift fotogrametrik yöntemlerle taranmış ve 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Daha sonra çalışmaya dair zaman ve maliyet değerlendirmesi yapılmıştır. Özet olarak; ulaşım araçlarının fotogrametrik modellemesinin, 3 boyutlu model oluşturmada alternatif bir yöntem olduğu, dizayn ve simülasyon süreçlerinde kullanılabileceği ve geleneksel yöntemlere nazaran önemli ölçüde hızlı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır (Matys vd., 2021).

Bir diğer çalışmada ise fotogrametrik yöntemlerle 3 boyutlu model oluşturma döküm ile imalat sürecine entegre edilmesi araştırılmıştır. Makalenin temel amacı, fotogrametri prosesi ve eklemeli imalat teknolojisini birleştirerek Lost-PLA dökümde (biopolimer-bioplastik dökümü) kullanılan karmaşık bir bileşen oluşturmaktır. Ek olarak, bileşen dökümden geçirilmiş ve doğruluk açısından test edilmiştir. Sonuç olarak fotogrametrik yöntem, eklemeli imalat sürecine başarıyla entegre edilmiş ve boyutsal olarak tatmin edici doğruluk elde edilmiştir (Rakesh vd., 2021).

Kohtala vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, tasarım faaliyetlerini desteklemek ve erken aşamada ürün geliştirmede test etmek için fotogrametri tabanlı 3 boyutlu tarama yöntemi incelenmiştir. Çalışma kapsamında bir tasarımcı sandalyesi ve özelleştirilmiş yarış direksiyonuna ait modellemeler olmak üzere iki adet vaka çalışması yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, ürün geliştirme sürecini desteklemede fotogrametri tabanlı tarama tekniklerinin düşük maliyetli, hızlı ve becerikli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bir başka çalışmada, tersine mühendislik yöntemlerinin parça imalat kontrolüne ek olarak birçok uygulamada kullanılabileceği aktarılmıştır: gözetleme, bina yeniden inşası, su altı denetimi, saha keşfi, vb. Çalışmada ayrıca insansız otonom araçların kullanımının katkılarına da değinilmiştir (Peuzin-Jubert vd., 2021).

2020 yılında yayınlanan bir çalışmada tersine mühendislik süreci ile makina öğrenmesi yöntemi bir araya getirilmiş ve yapay zeka algoritmalarının tersine mühendislik sürecine olan katkısına değinilmiştir (Baehr vd., 2020).

Yang vd. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada ise büyük ve düzensiz yapıdaki serbest yüzeylerin lazer taramayla elde edilen nokta bulutlarının elde edilmesi amacıyla bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında büyük ve yarı-elipsoit geometriye sahip bir tacın temaslı lazer ölçüm probu ile nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Daha sonra üretilen algorithmadan elde edilen nokta bulutu verisi ile lazer ölçümden gelen nokta bulutu verisi karşılaştırılarak algoritmanın doğruluk mertebesi hesaplanmıştır.

Bir başka çalışmada, bir ata ait MC3 ön ayak kemiğinin tersine mühendislik ve yüksek dereceli sonlu elemanlar yöntemleriyle analizi gerçekleştirilmiştir. Bilgisayarlı tomografik görüntüleme ile elde edilen 3B kemik modeli ile kemik en kesitlerinin ekstrapole edilmesiyle elde edilen sonlu elemanlar modeli araştırılmıştır (Mouloodi vd., 2019).

2019 yılında yayınlanan bir çalışmada Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör (ITER)'e ait üretim gerekliliklerinin belirlenmesi, tanımlanan isterlere bağlı olarak ölçüm verilerinin eldesi, 3B modelinin yeniden yapılandırılması gibi adımların tersine mühendislik yöntemleriyle sürdürülmesi süreci sunulmaktadır (Fuentes vd., 2019).

Bir başka çalışmada tersine mühendislik yöntemlerinden biri olan bilgisayarlı tomografik görüntüleme ile bir sigaraya ait 3B model elde edilmiştir. Hava kanalları, tütün yaprakları ve sigara kağıdının birebir modellendiği bu çalışmada, Ansys Fluent yazılımı kullanılarak sigaranın baştan sona kadar yanması simüle edilmiştir. Simülasyon sonucunda yanma süresince sigaranın çeşitli bölgelerindeki basınç ve sıcaklık verileri detaylı olarak analiz edilmiştir (Tang vd., 2019).

2019 yılında yapılan başka bir çalışmada, ilk olarak parça geometrileri detaylı olarak bilgisayarlı tomografi yöntemiyle elde edilmiştir. Sonrasında dinamik montaj süreci simüle edilmiş ve temas bölgelerindeki gerilmeler hesaplanmıştır. Sonrasında ise parçanın mekanik yük altındaki deformasyonu fotogrametrik ölçüm yöntemiyle belirlenmiştir. Simülasyon modelinden elde edilen kritik bölgeler neticesinde kritik yük altında çatlak oluşabilecek alanlar belirlenmiş olup güvenilir tahminler elde edildiği gösterilmiştir (Skotarek vd., 2019).

Tersine mühendislik çalışmalarının en önemli kısımlarından birisini üretilen 3B model oluşturmaktadır. Bu modelin yüzeyi de sayısal olarak örülmüş üçgenlerden ya da dörtgenlerden oluşmaktadır. Bu yapıya ağ örgüsü denmektedir ve bu ağ örgüsünün tersine mühendislik çalışmalarında etkin olarak kullanılabilmesi için nesnenin geometrisini en doğru şekilde temsil etmesi gerekmektedir. Mejia vd. (2018) tarafından yayınlanan bir makalede ağ örgülerini segmentlemeye (kendi içerisinde farklı özelliklerin tutulduğu anlamlı bölgelere ayırmak) yarayan bir algoritma geliştirilmiştir (Mejia vd., 2018).

Bir başka çalışmada tersine mühendislik yöntemleriyle elde edilen 3 boyutlu modellere ait ağ örgüsü üzerinde kenar çıkarma ve segmentasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle modellenen parçaların geometrisinin tersine mühendislik çalışmalarında daha efektif olarak kullanılabilmesi mümkün kılınmıştır (Gauthier vd., 2017).

2017 yılında yayınlanan bir başka makalede, bir fotoğraf kullanılarak ürün modelleme işlemini gerçekleştirmeye yarayan bir yöntem sunulmuştur. Modellenmesi istenen ürüne ait bir fotoğraf kullanılarak tek fotoğraftan 3 boyutlu model elde etmeye yarayan bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu da tersine mühendislik çalışmalarına büyük ölçüde kolaylık sağlayabilecek bir yöntem olarak lanse edilmiştir (Fondevilla vd., 2017).

Herráez vd. (2016) tarafından yayınlanan bir makalede tersine mühendislik yöntemlerinden biri olan videogrametri ile 2 farklı lazer tarama cihazı mukayese edilmiştir. Çalışmada videogrametrik modelleme sürecinin diğer iki lazer tarama cihazına göre süre ve uygulanabilme kolaylığı açısından üstünlüklerine değinilmiş; aynı zamanda üretilen modelin görsellik açısından lazer tarama metotlarına nazaran daha gerçekçi sonuçlar sunduğu vurgulanmıştır.

Bir diğer çalışmada, bir safran çiçeğine ait 3B model lazer tarama yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Nokta bulutu verisi elde edildikten sonra 3B modeli üretilen safran çiçeğinin modellenmesindeki amaç, bitkinin gelişim sürecinin detaylı olarak incelenmesi olarak aktarılmıştır. Bu çalışma ayrıca bitkilerin tersine mühendislik yöntemleriyle detaylı olarak 3B modellenebileceğini göstermektedir (Zeraatkar vd., 2015).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tersine Mühendislik (TM)

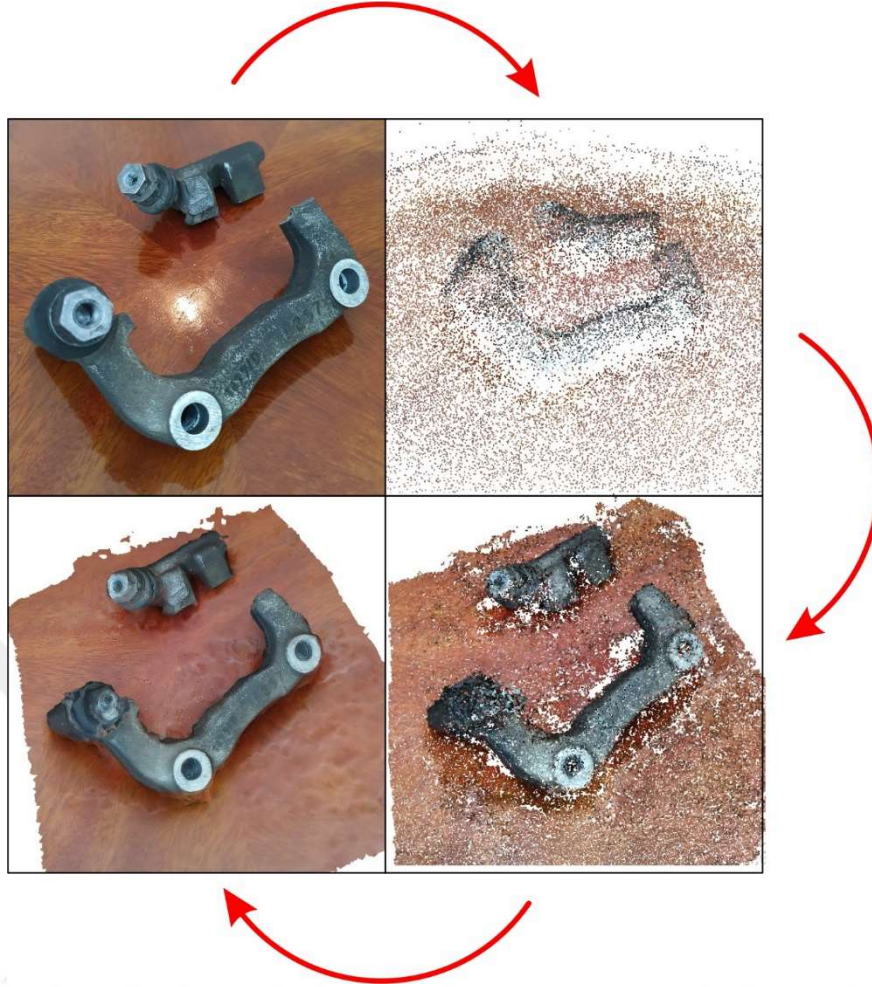
3.1.1. Tersine Mühendislik Tanımı

Geleneksel mühendislik sürecinde öncelikle var olan bir problem tanımlanmaktadır. Daha sonra problemle ilgili çeşitli mecralardan araştırmalar yapılmaktadır. Problemle ilgili olası çözümler listelenmektedir. Listelenen bu çözümler kendi aralarında çeşitli kısıtlara (zaman, maliyet, uygulanabilirlik, malzeme, vb.) bağlı olarak karşılaştırılmaktadır. Devamında ise seçilen çözüm yöntemine göre, üretilecek olan ürün ya da parçanın tasarımı yapılmaktadır. Üretilen ilk ürün prototip olarak adlandırılmaktadır ve prototip üzerinde çeşitli testler ve geliştirmeler yapılmaktadır. Tüm bu adımların neticesinde geleneksel mühendislik süreci tamamlanmış olmaktadır.

Tersine mühendislik süreci ise yukarıdaki adımların bir bağlamda zıt yönde gelişmesiyle oluşmaktadır. TM sürecinde halihazırda var olan ürün ve parçaların tasarım detaylarını, ölçü ve geometrisini elde etmek için birtakım yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, geleneksel mühendislik üretim sürecinde bir makine parçasının önce teknik çizimleri ve 3B modeli oluşturulup daha sonra parça üretimine geçilirken; TM sürecinde ise halihazırda üretilmiş olan bu parçanın 3B modeli ve teknik çizimleri elde edilmektedir.

Bir başka ifadeyle TM; geometrik modellerin fiziksel modellerden yola çıkılarak elde edilmesi, mevcut parçaların tekrar tasarlanması ve boyutlarının analizi için düzenli bir yaklaşımdır. Bir diğer ifadeyle, TM mevcut parça veya ürünlerin taranarak sayısallaştırılması neticesinde elde edilen 3B nokta bulutu verisinden geometrik katı model (CAD modeli) elde etme sürecidir (Tersine Mühendislik Deney Föyü, t.y.).

TM uygulamalarına, literatür araştırmaları bölümünde de aktarıldığı gibi, birçok farklı disiplinde sıklıkla başvurulmaktadır. 3B modelleme ve ölçme işlemleri açısından kompleks geometrilere sahip parçalar ve ürünler gün geçtikçe değişen ve gelişen TM yöntemleri sayesinde rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir. TM yöntemleri, ürün tasarım ve üretim adımlarında kullanıcılara destek olduğu gibi araştırma, geliştirme, restorasyon, bakım-onarım, vb. süreçlerde de sıklıkla kullanılabilir.



Şekil 3.1. Tersine mühendislik süreci

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi tersine mühendislik süreci genel olarak ürün ya da parçanın optik, lazer veya temaslı tarama yöntemleriyle nokta bulutu verisinin elde edilmesi ve ardından 3B CAD modelinin elde edilmesi adımlarını içermektedir. Temel seviyede anlatmak gerekirse, ilk olarak parça yüzeyi üzerinde binlerce noktanın 3B ortamda koordinat verileri elde edilir. Parça boyutuna ve tarama yöntemine göre değişmekle birlikte binlerce noktanın koordinat verisi kaydedilmiş olur. Elde edilen bu veri setine seyrek nokta bulutu denilmektedir. Bir sonraki adımda ise seyrek nokta bulutu verisi çeşitli yazılımsal algoritmalar kullanılarak yoğun nokta bulutu verisine dönüştürülür. Böylelikle 3B nokta bulutu, modellenmesi istenen ürün ya da parçanın geometrisini daha detaylı ve doğru temsil etmiş olur. Son adımda ise yoğun nokta bulutu verisi kullanılarak 3B katı model elde edilir. Elde edilen katı model üzerinde ölçümler ve modifikasyonlar yapmak, 3B yazıcıda baskı almak mümkündür. İstenildiği takdirde CAD modeline görsellik katmak için ürünün fotoğrafları kullanılarak model üzerine görüntü giydirme işlemi yapılır ve ürünü neredeyse birebir temsil eden gerçekçi görüntüler elde edilebilir.

Tersine mühendisliğe ihtiyaç duyulan sebepler olarak; uzun zamandır üretilmeyen bir parçanın yeniden üretilmek istenmesi, eldeki üretim verilerinin yetersiz olması, ürünün üreticisinin değişmiş olması ve üretim verilerinin ulaşılmaz durumda olması, üretim verilerinin kaybolması, ürün üzerinde

değişiklik veya düzeltme yapılmak istenmesi, piyasadaki rakip ürünlerin özelliklerinin analiz edilmesi, orjinal tasarım verilerinin günümüzdeki üretim teknolojisi karşısında eski hale gelmesi gösterilebilmektedir (Tersine Mühendislik Deney Föyü, t.y.).

CAD yazılımlarıyla modellenmesi güç ya da imkansız olan kompleks geometrilerin olabilmesi, veri aktarımında sorunların ortaya çıkabilmesi, var olan CAD modeli ile üretilen parça arasında uyumsuzlukların olabilmesi, tasarımın daha ergonomik hale getirilmek istenmesi, kalite ve performans düzeyinin arttırılmak istenmesi gibi durumlarda TM sıklıkla başvurulmuş bir süreçtir.

3.1.2. Tersine Mühendislik Yöntemleri

TM uygulamaları gerçekleştirilirken 3B CAD modeli elde etmek amacıyla çeşitli tarama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu tarama yöntemleri kendi içerisinde temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

3.1.2.1. Temaslı (Probu) Tarama Yöntemleri

Dokunmalı ya da diğer adıyla temaslı sistemlerde, taranacak ürün ve tarama cihazı arasında fiziksel olarak temas gerçekleşmektedir. Mekanik kollu sistemler ve koordinat ölçüm cihazları (CMM-Coordinate Measuring Machines) bu sınıfta yer almaktadır. Çok eksenli hareket kabiliyetine sahip mekanik bir kol ve bu kola bağlı bir prob sayesinde taranması istenilen ürünün koordinat verileri elde edilmektedir. Prob, ürünün yüzeyinde dokundurulan her noktanın koordinat bilgisini kaydeder ve böylelikle cismin geometrisi dijital ortamda sayısallaştırılmış olur. Bu yöntemde cismin okunan nokta koordinatları dışında herhangi bir özelliği kaydedilmez. Yöntemin dezavantajı olarak, karmaşık veya keskin geçişli detaylara sahip geometrilerin tüm hatlarının ve detaylarının okunamaması durumu gösterilebilir. Şekil 3.2’de örnek bir portatif koordinat ölçüm cihazı (CMM) görülmektedir.



Şekil 3.2. Faro Design ScanArm 2.0 koordinat ölçüm cihazı (IndiaMART, 2019)

3.1.2.2. Temassız Tarama Yöntemleri

Temassız tarama sistemlerinde modellenmesi istenen ürün ile tarayıcı cihaz arasında temas yoktur. Optik tarayıcılar-kameralar, bilgisayarlı tomografi (BT), manyetik rezonansla görüntüleme (MR) ve lazer tarama cihazları gibi aletler aracılığıyla temassız tarama işlemleri gerçekleştirilir. Bu sistemlerin en büyük avantajları arasında tüm yüzey formlarının yüksek hassasiyetle elde edilmesi ve kompleks geometrilerin kolaylıkla sayısallaştırılması gibi özellikler gösterilebilmektedir. Temassız tarama yöntemleri ile sadece parçanın geometrik şekli ve koordinatları değil, yüzey detayları ve renkleri gibi özellikleri de okunarak CAD modeline entegre edilebilmektedir.

Lazer tarama sistemlerinde, taranan cismin üzerine bir lazer kesiti düşürülmektedir ve bu kesit, cisim üzerinde hareket ettirilmektedir. Lazer kesiti hareket halindeyken cisim üzerinde deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyon verisi kaydedilerek 3B CAD verisi elde edilmiş olmaktadır (Tersine Mühendislik Deney Föyü, t.y.). Piyasada çalışma prensipleri ve tarama hızları farklılık gösteren alternatif lazer tarama cihazları da mevcuttur. Bazı lazer tarama cihazları çalışma prensibi olarak, parça üzerine lazer ışını göndermektedir ve lazer ışınının cismin yüzeyinden yansıyıp geri dönene kadar geçen süre ile mesafeyi hesaplayarak koordinat verisi elde etmektedir. Şekil 3.3'te portatif (sol) ve sabit (sağ) lazer tarama cihazları görülmektedir.



Şekil 3.3. Lazer tarayıcı cihazlar (Paksoy, t.y.)

Optik tarama sistemleri ile 3B CAD modeli elde etme sürecinde kameralar kullanılmaktadır. Modellenmesi gereken parça ya da ürünün farklı açılardan ve uzaklıklardan fotoğrafları çekilmekte ve bu fotoğraflar fotogrametrik yazılımlarla birleştirilerek 3B katı model haline getirilmektedir. Fotoğraflama işlemleri taranması gereken ürünün boyutuna ve istenilen detay mertebesine göre DSLR (Digital Single Reflex Camera-Dijital Tek Yansıma Kamera) kameralar, cep telefonu kameraları, sualtı kameraları ve insansız hava araçlarına entegre edilmiş kameralarla gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.4'te fotogrametrik modelleme düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.4. Fotogrametrik ölçüm düzeneği (The New School, 2017)

3.2. Fotogrametri



Şekil 3.5. Fotogrametrik ölçüm düzeni (şematik)

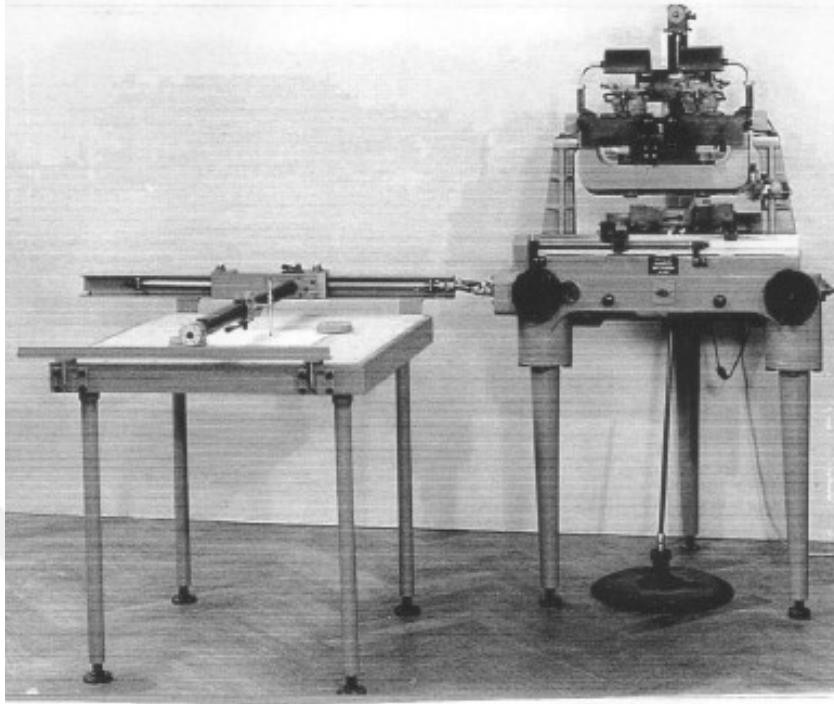
Tanım olarak fotogrametri; nesnelerin geometrik özelliklerinin belirlenmesi için görüntüler aracılığıyla güvenilir ölçümler elde etme bilimidir. Fotogrametri ağırlıklı olarak topografik uygulamalarda kullanılmaktadır: Dünya yüzeyinde yer alan doğal ve insan yapımı özelliklerin mekansal konumunu belirlemek maksatlı çalışmalar. Bunlara ek olarak fotogrametri topografik olmayan uygulamalarda da kullanılır: Mimari, endüstriyel tasarım, yapıların deformasyon çalışmaları, kaza ve suç mahallerinin incelenmesi, restorasyon, bakım-onarım, vb. Yersel fotogrametri, hava fotogrametrisi, sualtı fotogrametrisi, uzay fotogrametrisi ve yakın-mesafe fotogrametrisi vb. çeşitleri olan bu yöntem tersine mühendislik çalışmalarında sıklıkla başvurulan yöntemlerdendir (Santillan, t.y.).

Fotogrametrik ölçüm ve veri işleme yöntemleri; analog, analitik ve dijital olmak üzere üç ana grupta incelenmektedir.

3.2.1. Analog Fotogrametri

Veri toplama sırasında görüntü ile nesne arasında var olan geometrik ilişkiyi fiziksel olarak modelleyen karmaşık araçlar kullanır. Bu enstrümanlar analog bilgisayarlar gibi davranır (Santillan, t.y.). Analog fotogrametride görüntüleme geometrisi, optik veya mekanik cihazlar aracılığıyla yeniden oluşturulmaktadır. İki görüntü, nesnenin üç boyutlu bir modeli oluşturulacak şekilde yönlendirilebilmektedir. Bir insan operatör bu modelde kayan bir işareti hareket ettirebilmekte ve bu hareketi stereoskopik görüş altında kontrol edebilmektedir. Bu, nesnenin yapısal çizgilerinin yanı sıra kontur çizgilerinin de doğrudan haritalanmasını sağlamaktadır. Optik ve mekanikteki ilerlemeler sayesinde, analog fotogrametrik cihazlar, onlarca yıl içinde adım adım iyileştirilmiş ve böylece çok yüksek bir doğruluğa ulaşmıştır. Gelişimin bu aşamalarında fotogrametri, manuel hesaplamalardan

kaçınan bir teknik haline evrilmiştir (Wiedemann, 1998). Şekil 3.6’da bir analog fotogrametrik cihaz görülmektedir.



Şekil 3.6. Analog fotogrametrik cihaz (Hughes vd., t.y.)

3.2.2. Analitik Fotogrametri

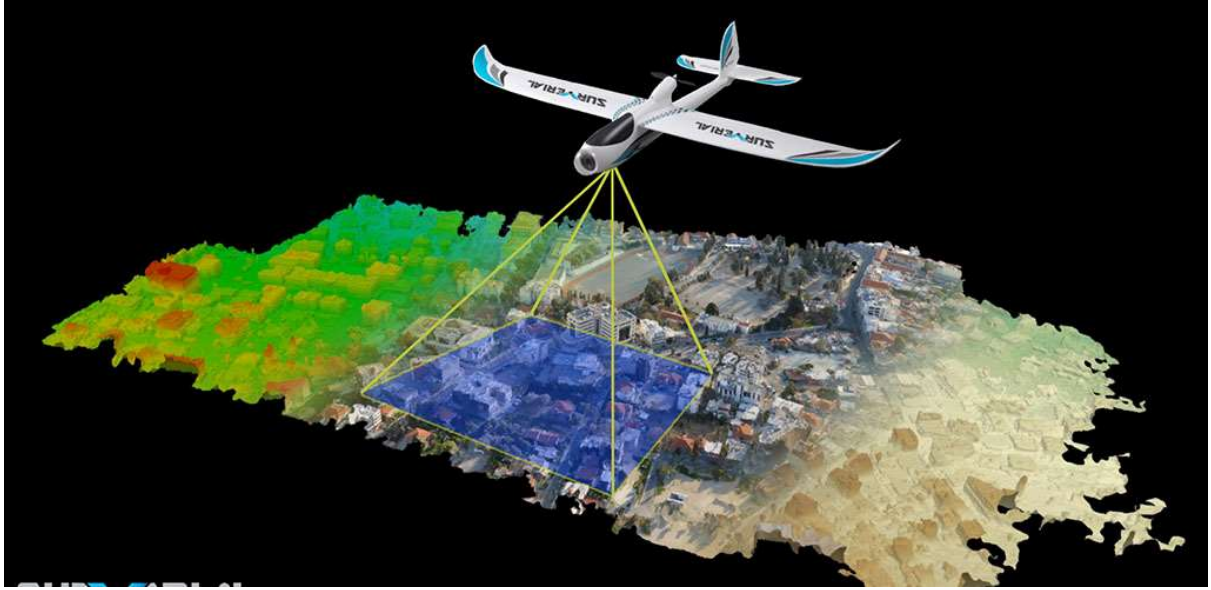
Analitik fotogrametri; kamera parametrelerine, ölçülen fotoğraf koordinatlarına ve yer kontrolüne dayalı olarak nesne uzayındaki noktaların koordinatlarının titiz matematiksel hesaplamasını tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Fotogrametrik işlemler matematiksel modelleme ile gerçekleştirilmektedir. Tarihsel süreçte, bilgisayarların evrimi sayesinde, bir nevi analitik çiziciler geliştirmek mümkün hale gelmiştir. Bu tür fotogrametrik sistemlerde, görüntü noktaları ile nesne noktaları arasındaki ilişkiler, doğrusallık denklemlerine dayalı sayısal hesaplamalarla tanımlanmaktadır. Bu sistemler operatörü desteklediğinden, yüksek doğruluk, büyük esneklik ve verimlilik sunmaktadır. Ayrıca sonuçlar doğrudan CAD sistemlerine aktarılabilir. Bu avantajlardan dolayı analitik çizicinin giderek analog enstrümanların yerini aldığı açıktır (Wiedemann, 1998). Şekil 3.7’de analitik bir çizici gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Analitik fotogrametrik istasyon (Singh, t.y.)

3.2.3. Dijital Fotogrametri

Dijital fotogrametrinin ilk adımı taranan görüntülerdeki görüntü koordinatlarının ekranda ölçülmesidir. Dijital görüntü verisinin uygulanmasıyla fotogrametri, daha fazla esneklik ve otomasyon için muazzam bir potansiyel sağlayan özel bir dijital görüntü işleme alanı haline gelmektedir. Dijital stereofotogrametrik sistemler halihazırda piyasada ve geliştirme aşamasındadır. Birçok kurumdaki araştırma faaliyetleri, yönlendirme ve fotogrametrik restitüsyonun otomasyonuna ayrılmıştır. Bununla birlikte, halihazırda çalışır durumda olan stereoskopik sistemler hava fotogrametrisi için çok uygundur ancak yakın mesafe uygulamaları için uygun değildir (Wiedemann, 1998). Şekil 3.8’de dijital hava fotogrametrisi örneği görülmektedir.



Şekil 3.8. Dijital hava fotogrametrisi (Twech, t.y.)

3.2.4 Fotogrametride Veri Toplama ve Kamera Kalibrasyonu

Dijital görüntü verilerini üretmenin iki farklı yolu vardır. Birincisi metrik, yarı metrik veya amatör kameralarla çekilen analog fotoğrafların taranmasıdır. İkinci yol, dijital görüntü verilerini doğrudan dijital CCD (charge coupled device) kameralar aracılığıyla elde etmektir. (CCD sensör, kadrada gördüğümüz odaklanmış görüntüyü sensöre kaydetmek amacıyla dijital fotoğraf makinalarında kullanılan elektronik algılama çiplerine verilen isimdir (Erdal, t.y.).) Sorun, günümüzde büyük CCD dizilerinin üretilmesinin zor ve çok pahalı olmasıdır. Düşük maliyetli diziler kullanarak yeterli doğruluğa ulaşmak için dijital kameraların hassas kalibrasyon verileri gereklidir. Bunlar, kendi kendine (otomatik) kalibrasyon yaklaşımları ve demet ayarlaması ile sağlanabilmektedir. Ayrıca, yakın mesafeli uygulamalarda kameraların iyi odaklanması gerekir ki bu, iç yön parametreleri üzerinde etkisi olan bir işlemdir. Bu nedenle nesnede odak ayarlandıktan sonra, kalibrasyona çok uygun konfigürasyonlar geliştirilmelidir. CCD kameraların özel geometrik özellikleri, iç yönelimin belirlenmesi için genişletilmiş yaklaşımlar gerektirmektedir. Odak uzaklığının yanı sıra, temel noktanın konumu ve bozulma parametreleri, görüntü koordinatlarında farklı ölçekleri tanımlayan faktörlerdir (Wiedemann, 1998).

3.3. Yersel Lazer Tarama (YLT) Tekniği

Birçok meslek dalında sıklıkla kullanılmakta olan yersel lazer tarama teknolojisi; özellikle mühendisler, mimarlar, arkeologlar, biyologlar, tarihçiler ve doktorlar tarafından başvuru alan bir yöntemdir. Tüm bu mesleklerde YLT teknolojisi kullanılarak ölçümler yapılmakta ve 3B modeller üretilmektedir (Yılmaz vd., 2012).

Yersel lazer tarayıcılarda kullanılan ölçüm metodunun temel çalışma mantığı; lazer ışığı sinyalinin ölçüm cihazı ile ölçülen cisim arasındaki gidiş-dönüş süresinin ölçülmesi ilkesine dayanmaktadır (Özdoğan ve Deliormanlı 2018).

Yatay ve düşey ekseninde lazer ışını gönderen bir mekanizmaya sahip olan yersel lazer tarayıcıların elektronik ünitesinden çıkan ışın, cihazın gövde kısmında bulunan optik üniteye çarpar ve bu yüzeyden yansyarak cihazdan çıkar. Cihazdan çıkan ışın yatay eksenle bir açı yapar. Düşey eksen etrafında çok küçük açılarla dönerek tarama işlemine devam eden cihaz veri almaya devam eder. Bu süreç tarama işlemi tamamlanana kadar devam eder (Vozikis vd. 2004; Özdoğan 2015; Kanun vd. 2021).

Her tarama sonunda veriler nokta bulutu adı verilen noktalar olarak kullanıcıya sunulur ve bu nokta bulutundaki her lazer noktası kutupsal koordinatlarla (r, ϕ, θ) tarayıcıya kaydedilir. Bu kutupsal koordinatlarla ifade edilen noktaların kartezyen koordinatları (x, y, z) tarayıcı yazılımı tarafından hesaplanır ve kullanıcıya kartezyen koordinatlar olarak sunulur (Yakar vd., 2010; Özdoğan ve Deliormanlı 2018; Kanun vd. 2021).

3.4. Uygulama

Saha çalışmasına ilk olarak Nusret Mayın Gemisi Kültür Parkı içerisinde ölçüm ve çekimler yapabilmek için gerekli izinlerin alınması ile başlanmıştır. Gerekli izinler alındıktan sonra fotogrametrik alım ve lazer tarama işlemleri için gün ve saat planlaması yapılmıştır. Saha çalışması süreci; İHA ve mobil fotogrametrik alım için 1 gün, iç ve dış mekan lazer tarama adımları için de 1 gün olmak üzere toplam 2 gün sürmüştür. Çalışma sonunda doğruluk analizinde kullanmak üzere gemi üzerinden el ile ölçü alma işlemleri ise ilk gün tamamlanmıştır.

Fotogrametrik alımlara ilk olarak Parrot Anafi 4K HDR Drone kullanılarak başlanmıştır. Tekne çevresinde farklı yüksekliklerden ve farklı uzaklıklardan olmak üzere manuel uçuş yöntemiyle toplamda 108 adet fotoğraf çekilmiştir. Çekilen fotoğraflarda doğruluk analizinde kullanılacak noktaların açıkça görünmesine dikkat edilmiştir. Tablo 3.1’de uçuş yapılan İHA’nın teknik özellikleri görülmektedir. Şekil 3.9’da ise kullanılan İHA gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çalışmada kullanılan İHA (Parrot Anafi 4K HDR Drone) (Parrot, 2021)

Tablo 3.1. Parrot Anafi 4K HDR Drone teknik özellikleri (Parrot, 2021)

Özellik	Değer
<u>Drone</u>	
Katlanmış boyut	244x67x65 mm
Katlanmamış boyut	175x240x65 mm
Ağırlık	320 g
Maks. iletim mesafesi	Kumandayla 4 km
Maks. uçuş süresi	25 dk
Maks. yatay hız	15 m/s
Maks. dikey hız	4 m/s
Maks. rüzgar direnci	50 km/sa
Tavan servis irtifası	4500 m
Operasyon sıcaklığı	-10°C ve 40°C arası
<u>Lens</u>	
Sensör	1/2.4" CMOS
Açıklık	f/2.4
Odak uzaklığı	23-69 mm (foto)
Alan derinliği	1.5 m - ∞
ISO aralığı	100-3200
Dijital yakınlaştırma	3x
Çözünürlük	21MP (5344x4016) / 4:3 / 84° HFOV

Yaklaşık 1 saatlik uçuş süresi ile fotoğraf alım süreci tamamlanmıştır. Şekil 3.10’da İHA kullanılarak alınan fotoğraflardan bazıları gösterilmiştir.



Şekil 3.10. İHA kullanılarak alınan fotoğraflar

İHA ile fotogrametrik alım işlemlerinin tamamlanmasının ardından mobil fotogrametrik alım adımına geçilmiştir. Çalışmanın mobil fotogrametrik alım sürecinde Samsung Galaxy S10 cep telefonu kamerası kullanılmıştır. Şekil 3.11 ve Tablo 3.2’de kullanılan cep telefonu ve kameraya ait teknik özellikler gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Samsung Galaxy S10 ana kamera özellikleri (Camera FV-5, t.y.)

Özellik	Değer
Çözünürlük	12 MP
Sensör boyutu	5.6 x 4.2 mm
Min. netleme mesafesi	0.10 m
Hiperfokal mesafesi	3.60 m
Odak uzaklığı	4.32 mm
Açıklık	f/1.5
35 mm. eşdeğer odak	27.7714 mm
Yatay görüş alanı	66.3°
Dikey görüş alanı	52.2°
Dijital yakınlaştırma	10x



Şekil 3.11. Samsung Galaxy S10 cep telefonu (Camera FV-5, t.y.)

Mobil fotogrametrik alım sürecinde gemi çevresince 231 adet fotoğraf çekilmiştir. Fotoğraflar çekilirken otomatik odaklama kullanılmış ve herhangi bir dijital yakınlaştırma yapılmamıştır. Şekil 3.12’de cep telefonuyla çekilen bazı fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 3.12. Cep telefonu kullanılarak alınan fotoğraflar

Fotoğraf çekim işlemlerinin tamamlanmasının ardından lazer tarama adımına geçilmiştir. Gemi çevresinde ve güvertelerinde olmak üzere iç ve dış lazer taramaları gerçekleştirilmiştir. Gemi çevresinde 8 tarama, güvertelerin üzerinde ise 13 tarama yapılarak toplam 21 oturumda süreç tamamlanmıştır. Kamaralar, kaptan köşkü, makine dairesi gibi iç mekan taramaları izin alınamadığı için yapılamamıştır. Tarama işlemleri Faro Focus S model yersel lazer tarayıcı ile gerçekleştirilmiştir. EK-1’de kullanılan yersel lazer tarayıcıya ait teknik özellikler görülmektedir (Paksoy, t.y.). Ayrıca Şekil 3.13’te de kullanılan yersel lazer tarayıcının görseli sunulmaktadır.



Şekil 3.13. Faro Focus S serisi yersel lazer tarayıcı (sağda) (Paksoy, t.y.)

Saha çalışmaları ve veri toplama sürecinin son adımı olan lazer tarama işlemleri sonucunda elde edilen 21 oturumluk taramanın kuşbakışı tarama planı Şekil 3.14’te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.14. Yersel lazer tarama (YLT) oturumlarının üstten görünüşü

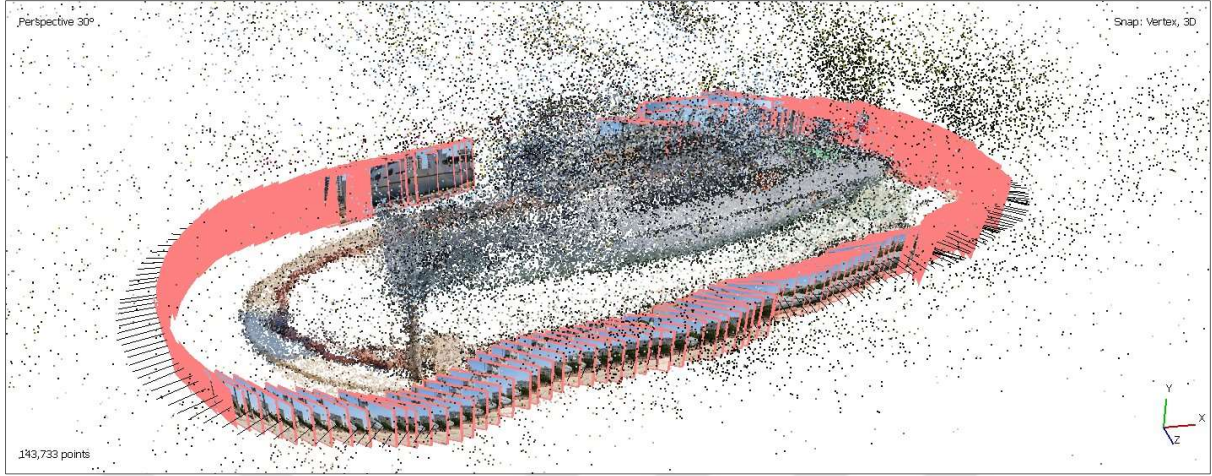
Yersel lazer tarama sürecinin tamamlanmasının ardından saha çalışmaları fazı son bulup ofis çalışmaları safhasına geçilmiştir. Ofis çalışmalarında kullanılan bilgisayara ait teknik özellikler Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3. Kullanılan bilgisayarın teknik özellikleri

Özellik	Değer
İşlemci	Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @ 2.81 GHz
RAM	32,0 GB
Ekran kartı	NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti

Ofis çalışmaları safhasına ilk olarak yersel fotogrametrik modelin elde edilmesi için gerekli işlemlerle başlanmıştır. İlk olarak, Samsung Galaxy S10 cep telefonu kamerasının distorsiyon (kamera bozunum) parametrelerini hesaplamak için kamera kalibrasyonu yapılmıştır. Kamera kalibrasyonu, Agisoft Metashape Professional yazılımında bulunan kalibrasyon modülü kullanılarak yapılmıştır. Kamera bozunum parametreleri hesaplandıktan sonra sahada çekilen 231 adet fotoğraf programa yüklenmiştir. Çekilen fotoğrafların hizalamasının doğru yapılması 3 boyutlu modelin en az hatayla oluşturulması sürecinde büyük öneme sahiptir. Bu sebeple gemi üzerinde sancak baş omuzluk, sancak paralel gövde, sancak kış omuzluk ve bu 3 noktanın iskele tarafındaki yansımaları olmak üzere toplamda 6 adet bağlantı noktası işaretlenmiştir. Bu bağlantı noktaları, çekilen her fotoğrafta işaretlenerek fotoğrafların yüksek doğrulukta birleşmesi ve hizalanması hedeflenmiştir. Fotoğrafların hizalanması adımıyla yüksek doğruluk seçeneği işaretlenmiştir. Fotoğraflar arası bağlantı noktaları için limit değerler varsayılan ayarlarda bırakılmıştır. Uyarlanabilir kamera modeli seçeneği de aktif edilerek

fotoğrafların hizalanması süreci tamamlanmıştır. Şekil 3.15'te fotoğraf hizalama süreci sonrası elde edilen seyrek nokta bulutu verisi ve kamera konumları görülmektedir.



Şekil 3.15. Kamera konumları ve seyrek nokta bulutu (mobil)

Seyrek nokta bulutunun elde edilmesinin ardından yoğun nokta bulutu verisinin elde edilmesi için gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Seyrek nokta bulutu verisi üzerinde istenmeyen noktalar manuel olarak temizlenmiştir. Kalite yüksek olarak seçilmiştir. Derinlik filtrelerinden “hafif” olan seçenek işaretlenirken, nokta renklerinin hesaplanması seçeneği aktif edilerek süreç başlatılmıştır. Elde edilen yoğun nokta bulutuna ait görüntü Şekil 3.16’da sunulmaktadır.



Şekil 3.16. Yoğun nokta bulutu verisi (mobil)

Elde edilen yoğun nokta bulutu verisi kullanılarak 3 boyutlu katı model elde edilecektir. Bunun için öncelikle seyrek nokta bulutuna uygulandığı gibi istenmeyen noktaların temizlenmesi adımı uygulanmıştır. Mesh oluştururken kaynak verisi olarak yoğun nokta bulutu kullanılmıştır. Yüzey tipi Arbitrary (3D) olarak seçilmiştir. Yüzey sayısı “yüksek” olarak seçilmiştir. Enterpolasyon aktif

edilmiştir. Renkli model üret seçeneği seçildikten sonra proses başlatılmıştır. Elde edilen 3B katı model Şekil 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.17. 3B katı model (mobil)

Mobil fotogrametrik yöntem ile 3B katı modelin elde edilmesinden sonra İHA ile çekilen fotoğrafların işlenmesi adımına geçilmiştir. İlk olarak, Parrot Anafi 4K HDR Drone kamerasının distorsiyon (kamera bozunum) parametrelerini hesaplamak için kamera kalibrasyonu yapılmıştır. İHA’nın kamera kalibrasyonu, cep telefonu kamerasında olduğu gibi, Agisoft Metashape Professional yazılımında bulunan kalibrasyon modülü kullanılarak yapılmıştır. Kamera bozunum parametreleri hesaplandıktan sonra sahada çekilen 93 adet fotoğraf programa yüklenmiştir. Çekilen fotoğrafların hizalamasının doğru yapılmasının 3 boyutlu modelin en az hatayla oluşturulması sürecinde büyük öneme sahip olduğuna değinilmiştir. Bu sebeple gemi üzerinde sancak baş omuzluk, sancak paralel gövde, sancak kış omuzluk ve bu 3 noktanın iskele tarafındaki yansımaları olmak üzere toplamda 6 adet bağlantı noktası işaretlenmiştir. Bu bağlantı noktaları, çekilen her fotoğrafta işaretlenerek fotoğrafların yüksek doğrulukta birleşmesi ve hizalanması hedeflenmiştir. Mobil fotogrametrik yöntemde yapılan işlemler tekrar edilmiştir. Fotoğrafların hizalanması adımı yüksek doğruluk seçeneği işaretlenmiştir. Drone ile çekilen fotoğraflar halihazırda koordinatlı geldiği için birleştirme işlemi daha yüksek doğrulukta olmaktadır. Fotoğraflar arası bağlantı noktaları için limit değerler varsayılan ayarlarda bırakılmıştır. Uyarlanabilir kamera modeli seçeneği de aktif edilerek fotoğrafların hizalanması süreci tamamlanmıştır. Şekil 3.18’de fotoğraf hizalama süreci sonrası elde edilen seyrek nokta bulutu verisi ve kamera konumları (drone için) görülmektedir.



Şekil 3.20. 3B katı model (İHA)

Fotogrametrik yöntemlerle modelleme işlemlerinin tamamlanmasının ardından lazer tarama verilerinin işlenmesi ve 3B model üretimi safhasına geçilmiştir. Faro Focus S model yersel lazer tarayıcı kullanılarak 21 oturumda gerçekleştirilen tarama sürecine ait ham veriler Faro SCENE yazılımına aktarılmıştır. Öncelikle ham tarama verileri işlenmiştir. Taramaları renklendirme seçeneği aktif edilmiştir. 100 metrelik mesafe filtresi ayarlanmış olup başıboş nokta filtreleme ve kenar algılama gibi algoritmalar aktif edilmiştir. Taramaların işlenmesinin ardından elde edilen nokta bulutlarının birleştirilmesi ve çakıştırılması aşamasına geçilmiştir. Meyil ölçer ve pusula verileri yersel lazer tarama cihazında kaydedildiği için bu veriler de birleştirme aşamasında kullanılmıştır. Birleştirme işlemine ait rapor Ek-2’de sunulmuştur. Birleştirme hatası ve 3B model doğruluğu gibi konulara Bulgular ve Tartışma bölümünde değinilmiştir. Lazer tarama işlemi sonrası elde edilen seyrek nokta bulutu görüntüsü, yoğun nokta bulutu verisi ve 3B katı modele ait görüntüler Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’te sunulmuştur.



Şekil 3.21. Seyrek nokta bulutu (lazer)

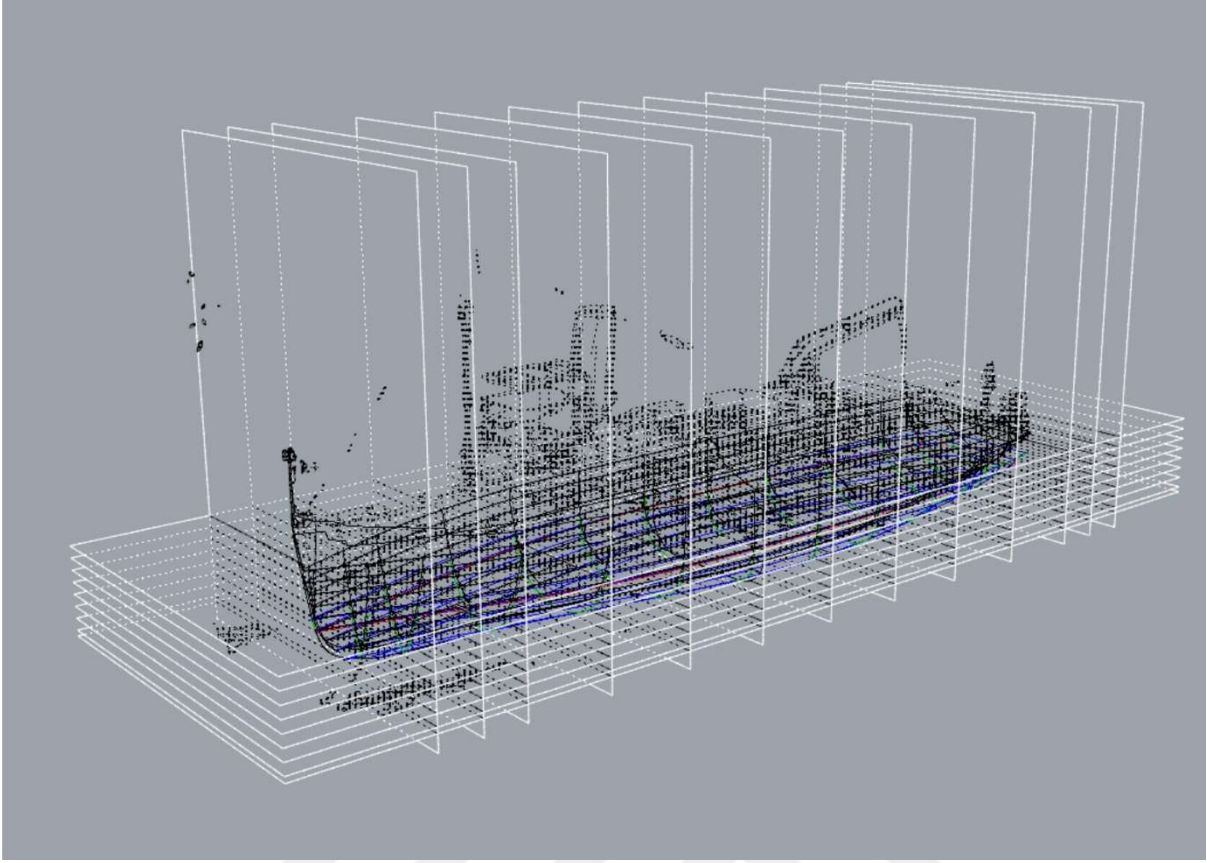


Şekil 3.22. Yoğun nokta bulutu verisi (lazer)



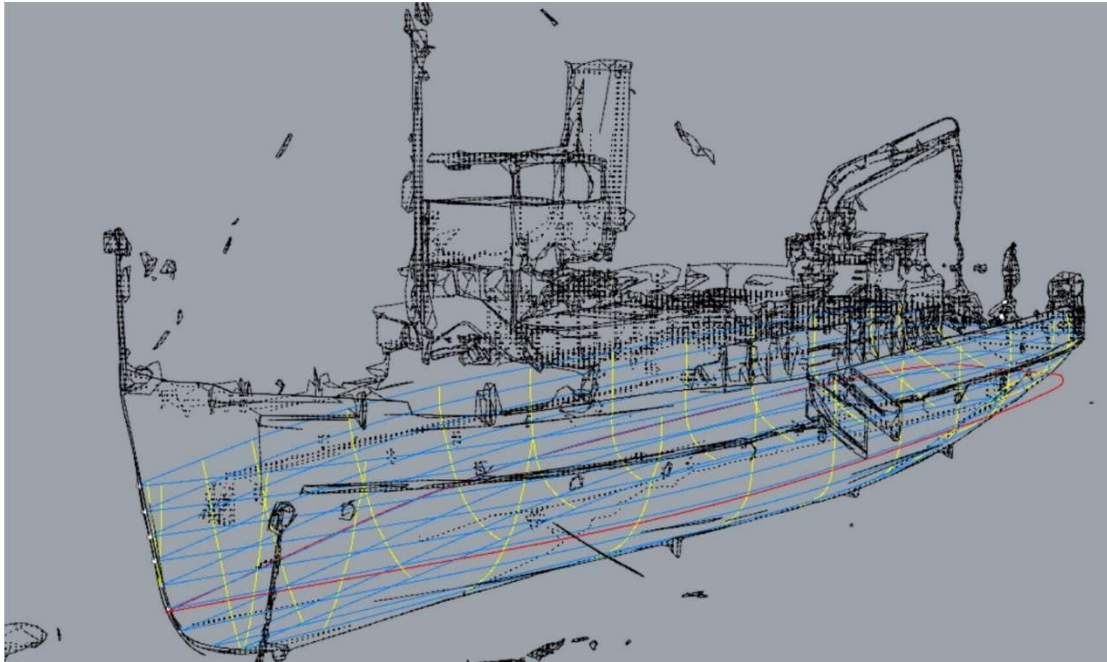
Şekil 3.23. 3B katı model (lazer)

Çalışma kapsamında Nusrat Mayın Gemisi'nin 3 farklı tersine mühendislik metoduyla (yersel lazer tarama, mobil fotogrametri ve İHA fotogrametrisi) 3B modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen modeller Rhinoceros yazılımına aktararak endaze planları çıkarılmıştır. Endaze planlarını çıkarmak için öncelikle her model ayrı ayrı işleme alınmıştır ve anlatılan süreç her model için aynı şekilde gerçekleşmiştir. Endaze planını çıkarmak için ilk adım, oluşturulan modelin kış pik düşey doğrusu ile kaide hattının kesiştiği noktayı 3B koordinat sisteminde (0,0,0) noktasına yerleştirmektir. Gemi boyu X-ekseni boyunca ve yüksekliği ise Z-ekseni boyunca artacak şekilde ayarlanmıştır. Y-ekseninin pozitif değerleri geminin sancak tarafını ifade etmekte, negatif değerleri ise iskele tarafını temsil etmektedir. Koordinat sistemine yerleştirilen 3B modelin, 0.5 metre aralıklarla +Z yönünde dilimlenmesi sonucu elde edilen kesit eğrileri su hatlarını oluşturmuştur. Modelin +X yönünde 4.02 metre aralıklarla dilimlenmesi sonucu elde edilen kesit eğrileri ise posta kesitlerini (en kesit eğrilerini) oluşturmuştur. 3B modelin Rhinoceros yazılımında endaze eğrilerini elde etme maksatlı dilimlere ayrılma işlemi Şekil 3.24'te görülmektedir. Modelin X ve Z yönünde dilimlenmesi sonucu Rhinoceros'ta elde edilen bir görüntü de Ek-3'te sunulmuştur.



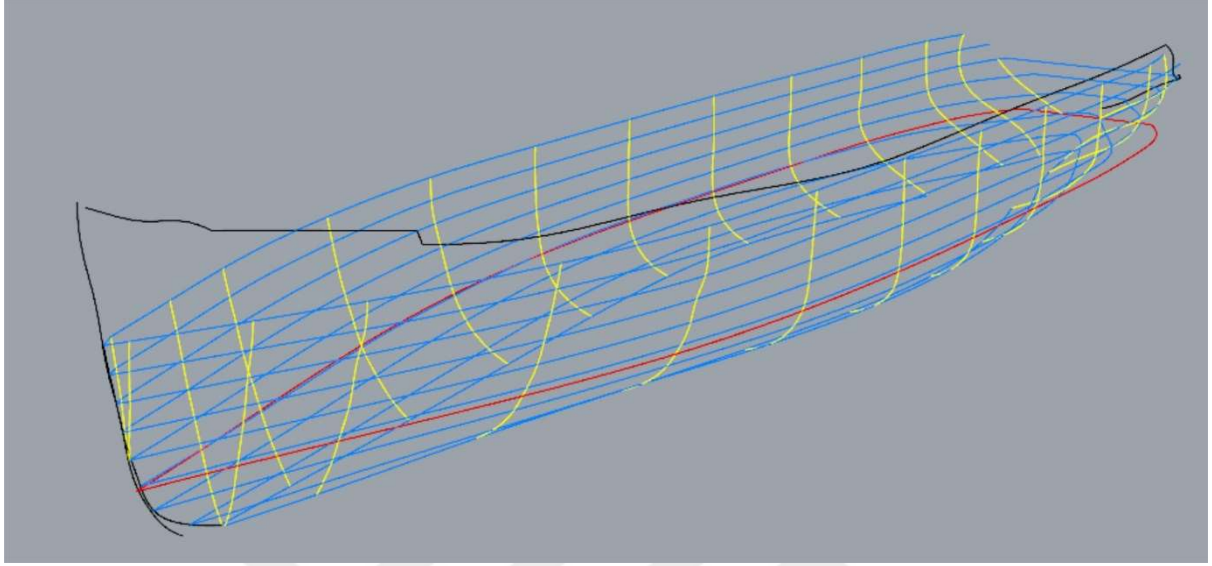
Şekil 3.24. 3B modelden kesit alma işlemi

Oluşturulan kesit düzlemleri ile 3B modelin kesişimi “MeshIntersect” komutuyla elde edilmiştir. Şekil 3.25’te kesişim komutu sonrası elde edilen eğriler görülmektedir.



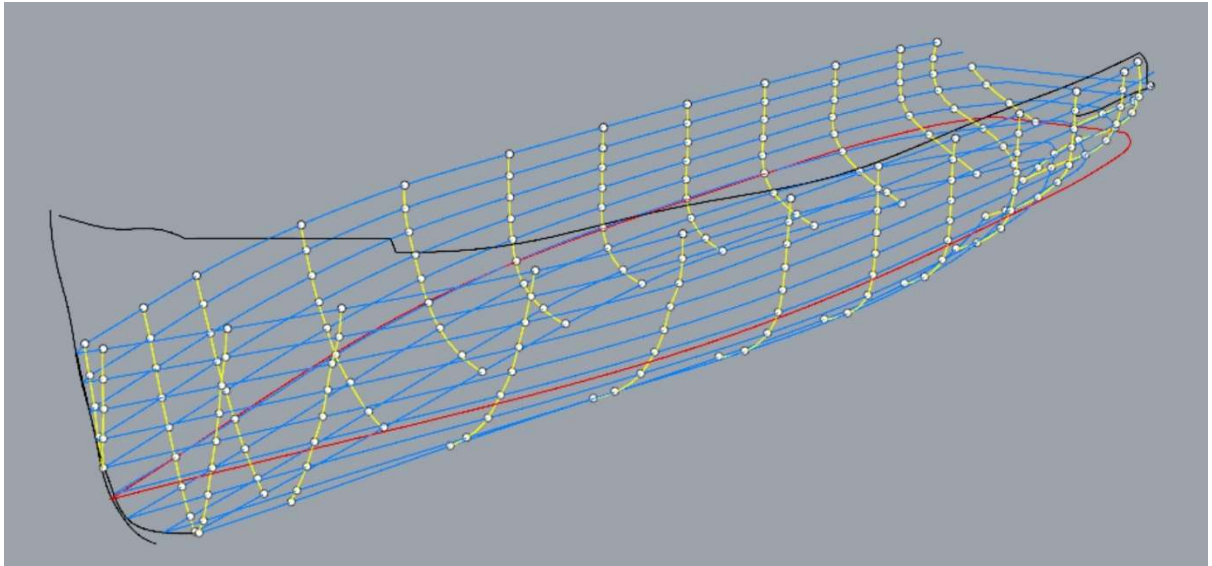
Şekil 3.25. Kesişim işlemi sonucunda oluşan eğriler

Bir sonraki adımda ise model üzerinden fribord çizimi yapılmıştır. 3B model gizlendikten sonra geriye kalan eğriler Şekil 3.26’da görülmektedir. Sarı renkli eğriler posta eğrilerini, mavi renkli eğriler ise su hatlarını göstermektedir.



Şekil 3.26. Su hattı ve posta eğrileri

Su hatları ve en kesit eğrilerinin kesişim noktaları ise yine “intersect” komutu ile elde edilmiş olup bu noktaların koordinat değerleri gemiye ait ofset tablosunun elde edilmesinde kullanılmıştır. Şekil 3.27’de eğrilerin kesişimlerinden elde edilen noktalar görülmektedir.



Şekil 3.27. Ofset tablosunu oluşturan kesişim noktaları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının saha çalışmaları safhasına ilk olarak İHA ile geminin fotoğraflarının çekilmesiyle başlanmıştır. Çekilen fotoğrafların koordinatlı gelmesi, fotoğrafların birleştirme ve hizalama sürecine zaman ve doğruluk açısından oldukça fayda sağlamıştır. Elde edilen 3B nokta bulutu verisi incelendiğinde, Şekil 3.19’da da görüldüğü gibi, gemi üzerinde düzensiz ve boşluklu bölgeler bulunmaktadır. Bu düzensizliklerin çoğunun mesh üretme algoritması tarafından giderildiği Şekil 3.20’de görülmektedir. İHA fotogrametrisi sonucu elde edilen modelin, diğer yöntemlerle elde edilen modellere kıyasla, pozitif ve negatif yönleri bulunmaktadır. İHA ile çekilen fotoğraflarda, geminin üst yüzeylerine ait detayların daha çok alınabildiği görülmektedir. Fakat çok alçak uçuş yapılmadığı için gemi gövdesinin alt kısımlarına ait detaylar alınamamıştır. Bu da kaime hattı ile su hattı arasındaki draft seviyelerinde modelin hatalı ve eksik olabilmesine yol açmıştır. Çok alçak uçuş yapılması ve gövde altındaki detayların alınması bu durumu ortadan kaldıracaktır.

Mobil fotogrametrik yöntemde ise İHA kadar yüksekten fotoğraf alımı yapılamadığı için güverte detayları ve geminin üst detayları doğru işlenememiştir. Gemi gövdesine ait detaylar alçaktan çekim yapılabildiği için yeterli seviyede alınabilmiştir. Mobil fotogrametrik yöntemin bir diğer dezavantajı ise, fotoğrafların koordinatlı gelmemesidir. Bu sebeple fotoğraf birleştirme adımı, İHA fotogrametrisine göre daha çok zaman almakta ve daha az doğruluk vermektedir.

Yersel lazer tarama yönteminde diğer iki yönteme kıyasla en detaylı nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Birleştirme hatasının en düşük olduğu ve model üzerinden alınan ölçülerle gerçek gemi ölçülerinin en yakın olduğu yöntem lazer tarama olmuştur. Bunun yanında diğer iki yönteme göre sahada veri toplama işleminin en uzun sürdüğü yöntem de lazer tarama yöntemidir. Lazer tarama oturumlarının her biri 14 dakika sürmüştür ve 21 adet oturum yapılmıştır. Fotoğraflama işlemleri ise birkaç dakikada tamamlanmıştır.

4.1. Zaman, Maliyet ve Uygulanabilirlik Açısından Yöntemlerin Kıyaslanması

Zaman açısından kıyaslamak söz konusu olduğunda, sahada fotoğraf çekme işlemlerinin birkaç dakika içerisinde tamamlanabilmesi; fakat lazer tarama oturumlarının uzun sürmesi sebebiyle fotogrametrik yöntemler daha avantajlıdır. Sahada toplanan verilerin işlenmesi adımı ise; belirleyici faktör kullanılan bilgisayarın donanım gücüdür. Lazer tarama işlemi neticesinde oluşan nokta bulutu verisi, fotogrametrik yöntemlere kıyasla çok daha büyük olduğundan dolayı işlenmesi de daha uzun zaman almıştır.

Maliyet açısından en avantajlı yöntem cep telefonu tabanlı fotogrametridir. Bu kıyaslama ortalama fiyatlar için geçerlidir, zira günümüzde İHA’dan daha pahalı cep telefonları da bulunmaktadır. Yersel lazer tarama cihazları ise diğer iki cihaza göre çok daha yüksek mertebededir.

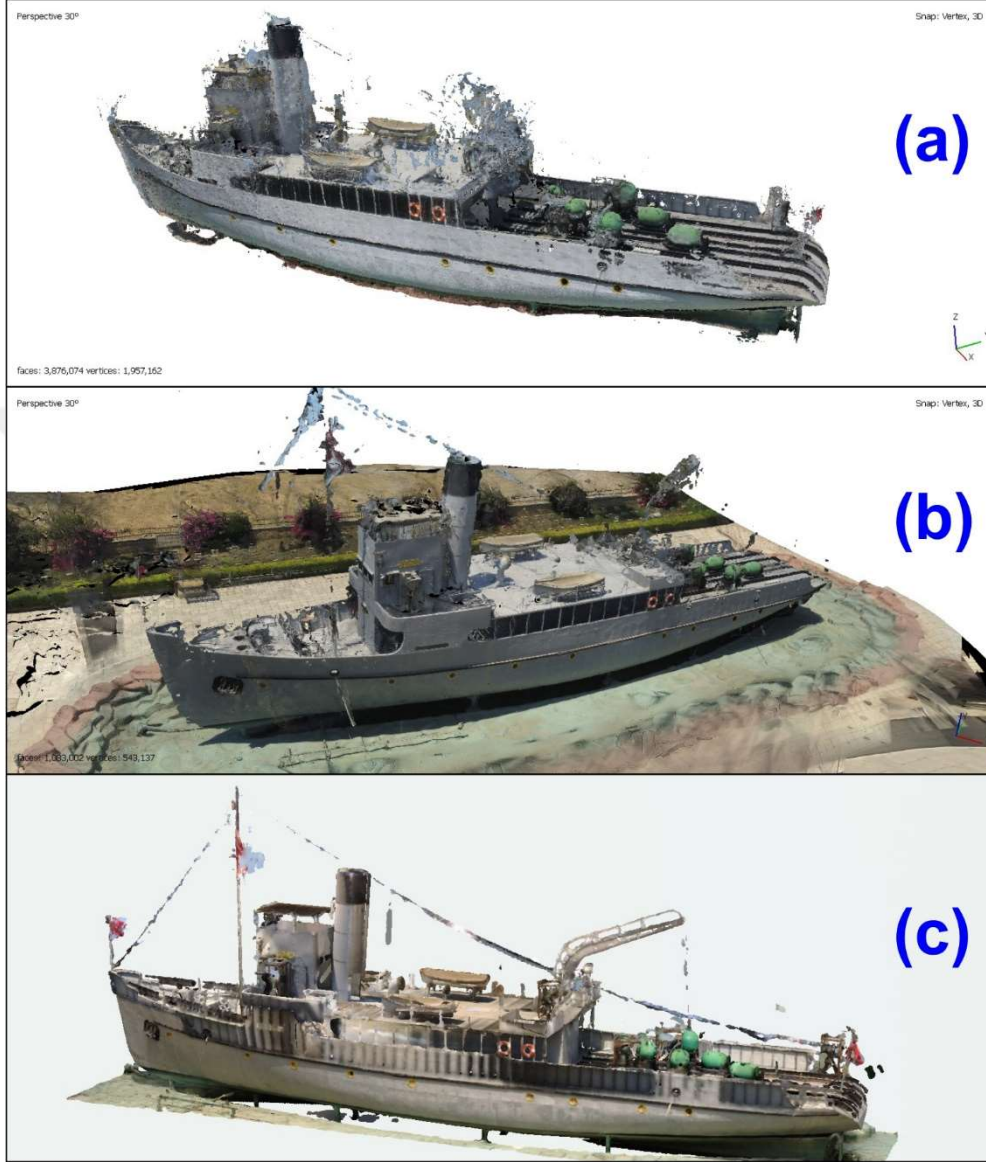
Uygulanabilirlik yönünden kıyaslamak gerekirse, cep telefonu ile fotoğraflar çekmek en basit yöntemdir. İHA ile fotoğraf alımı yapılırken bir yandan fotoğraflar çekilmekte, bir yandan da İHA kontrol edilmektedir. Otomatize edilmiş İHA uçuş planları da mevcuttur. Bu planlar sayesinde İHA istenilen bölgede istenilen planda uçuş yaparak otomatik fotoğraf alımı yapabilmektedir. Fakat bu durumda istenilen detaylar, manuel uçuştaki gibi alınamamaktadır. Ayrıca rüzgar ve yağış durumu, uçuş bölgesinde uçuşu etkileyecek nesneler, ağaçlar, elektrik telleri, insanlar vb. fotoğraf alım işlemini zorlaştırabilmektedir. Yersel lazer tarama işlemleri ise operatörü en az yoran yöntem denebilir. Oturumu başlattıktan sonra operatörün herhangi bir işlem yapmasına gerek kalmamaktadır. Fakat yersel lazer tarayıcının düzeçlerinin doğru hizalanması, tarama sırasında kıpırdamasının önlenmesi gibi etmenlere dikkat edilmelidir. Taranacak nesne ile tarayıcı arasında hareketli nesnelerin ya da kişilerin olması veya yağış durumu taramayı engelleyecektir. Çok yoğun güneş altında tarama yapmak da hem cihazın fazla ısınmasına yol açabilmekte hem de nesne yüzeyindeki yansımaların hatalı okumalara sebebiyet vermesine yol açmaktadır. Lazer tarama yönteminin diğer yöntemlere nazaran en önemli avantajı ise iç detay alımlarının yapılabilmesidir. Geminin sadece gövde ve dış kısmının değil, güverte detaylarının da yüksek hassasiyetle alınabildiği Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Yersel lazer tarama detay alımları

4.2. 3B Modellerin Kıyaslanması

Şekil 4.2’de her üç yöntemle elde edilen 3B modeller birlikte görülmektedir.



Şekil 4.2. Elde edilen 3B modeller (a-mobil, b-İHA, c-lazer)

Şekil 4.2(a)’da görüldüğü üzere mobil fotogrametrik model diğer iki modele göre daha çok çapak (hatalı-istenmeyen ağ örgüleri) içermektedir. Gemi bordası ve karinası düzgün modellenmiş olsa da güvertenin yüksek kesimlerinde fotoğraf alımı yapılamadığı için bu bölgelerde hatalar mevcuttur. En çok çapak içeren yöntem mobil fotogrametrik yöntemidir. Bu durum çekim yapılan cep telefonu kamerasının çözünürlüğü ve sensörün derinlik algısı artırılarak çözülebilir.

Şekil 4.2(b)’de İHA ile elde edilen 3B model görülmektedir. Resim dokusu en kaliteli olan model budur. Görsellik yönünden en iyi sonucu İHA kamerası sağlamıştır. Bunun sebebi kullanılan

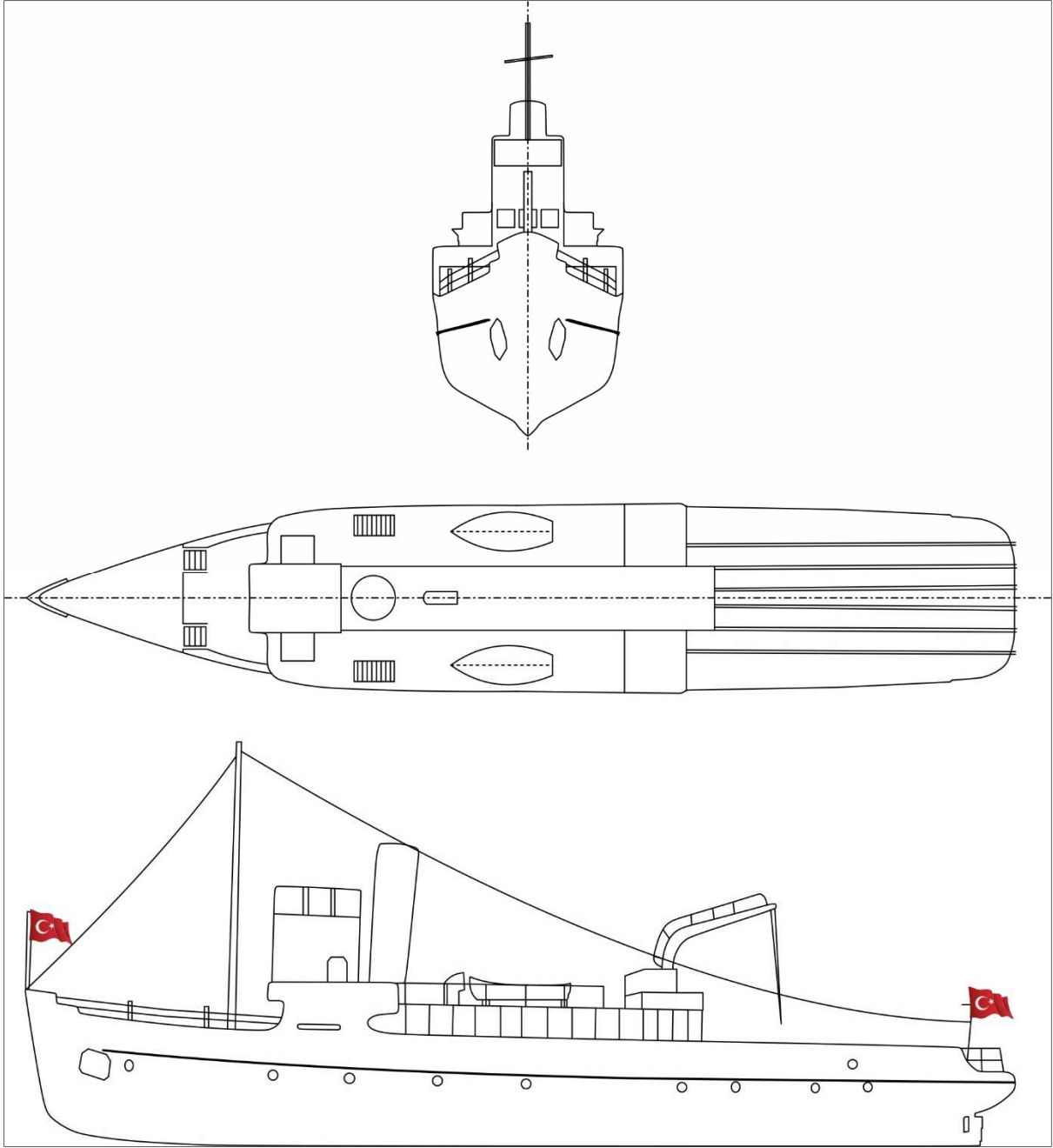
lensin 4K HDR kalitede çekim yapıyor olmasıdır. Elde edilen mesh modeli ise her ne kadar paylaşılan açıdan kaliteli gözüke de, resim dokusu kaldırıldığında karina bölgesinde akmalar ve hatalar içermektedir. Bunun sebebi, daha yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere, karinadan detaylı görüntü alacak kadar alçaktan uçuş yapılmamasıdır. Güverte detaylarını mobil yöneme göre çok daha iyi elde eden bu yöntem, lazer taramaya kıyasla daha geride kalmıştır. Bunun sebebi lazer tarama ile güvertede birçok detay alım yapılmasıdır.

Şekil 4.2(c)'de yersel lazer tarayıcı ile elde edilen 3B model görülmektedir. Oluşturulan bu model diğer iki modele göre en hassas doğruluğa sahip olmaktadır. Ayrıca sadece gemi gövdesi değil, güverte elemanları da detaylı şekilde modellenmiştir. Güverte elemanlarına ait hassas ölçümlerin yapılabildiğine dair görüntü Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



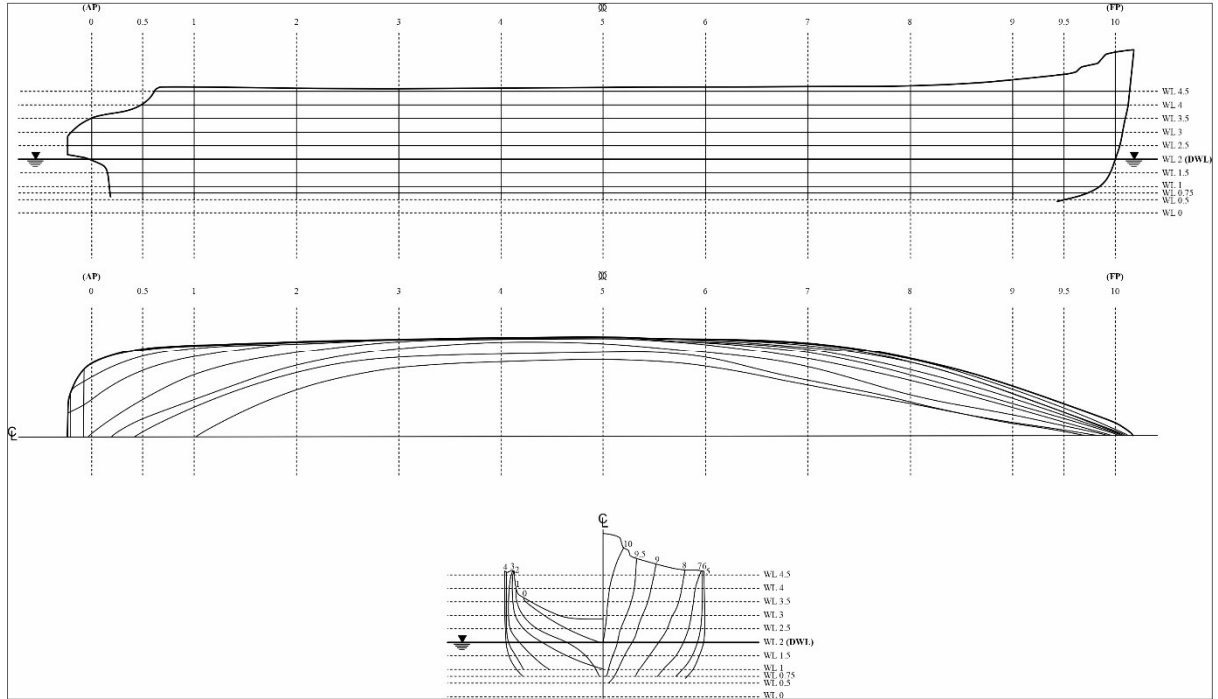
Şekil 4.3. Güverte elemanlarının ölçülmesi

Çalışma kapsamında elde edilen 3B modeller üzerinde taslak çizimler de yapılabilmektedir. Bu, her 3 yöntem için de geçerli olmakla birlikte, görsellik üretimi maksatlı projelerde kullanılabilecek bir özelliktir. Bu çalışma kapsamında lazer tarama ile elde edilen model üzerinde taslak çizim çalışması yapılmış ve Şekil 4.4'te sunulmuştur.

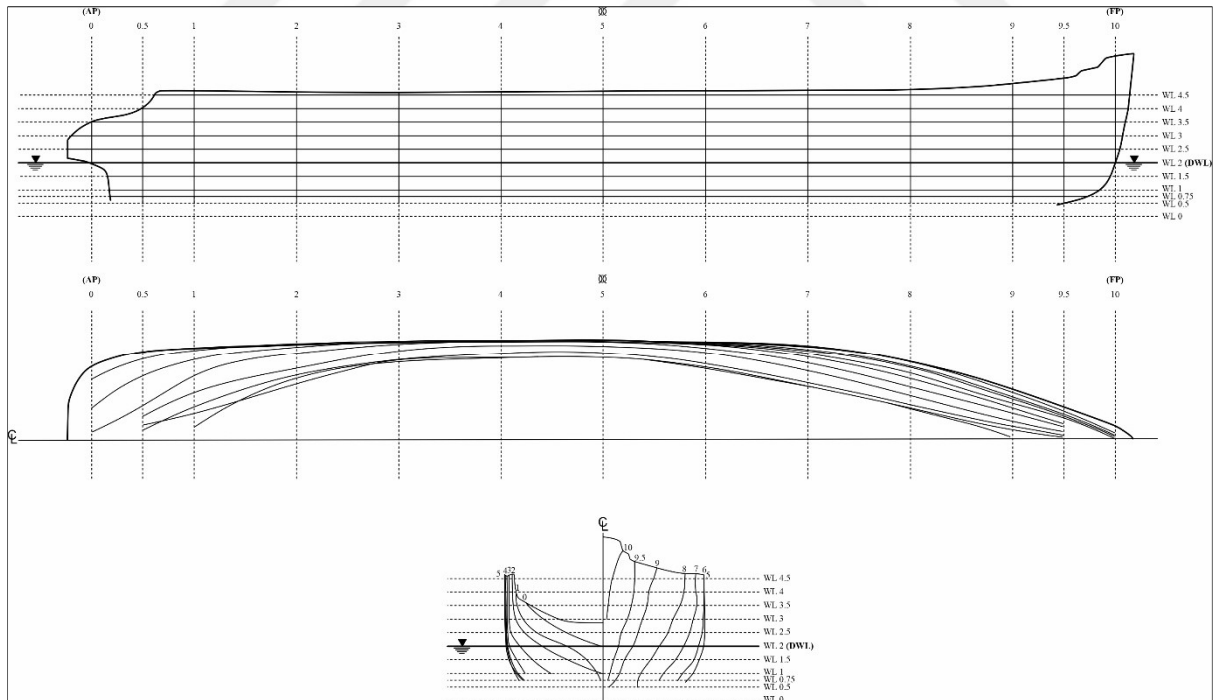


Şekil 4.4. Nusrat Mayın Gemisi taslak çizimi

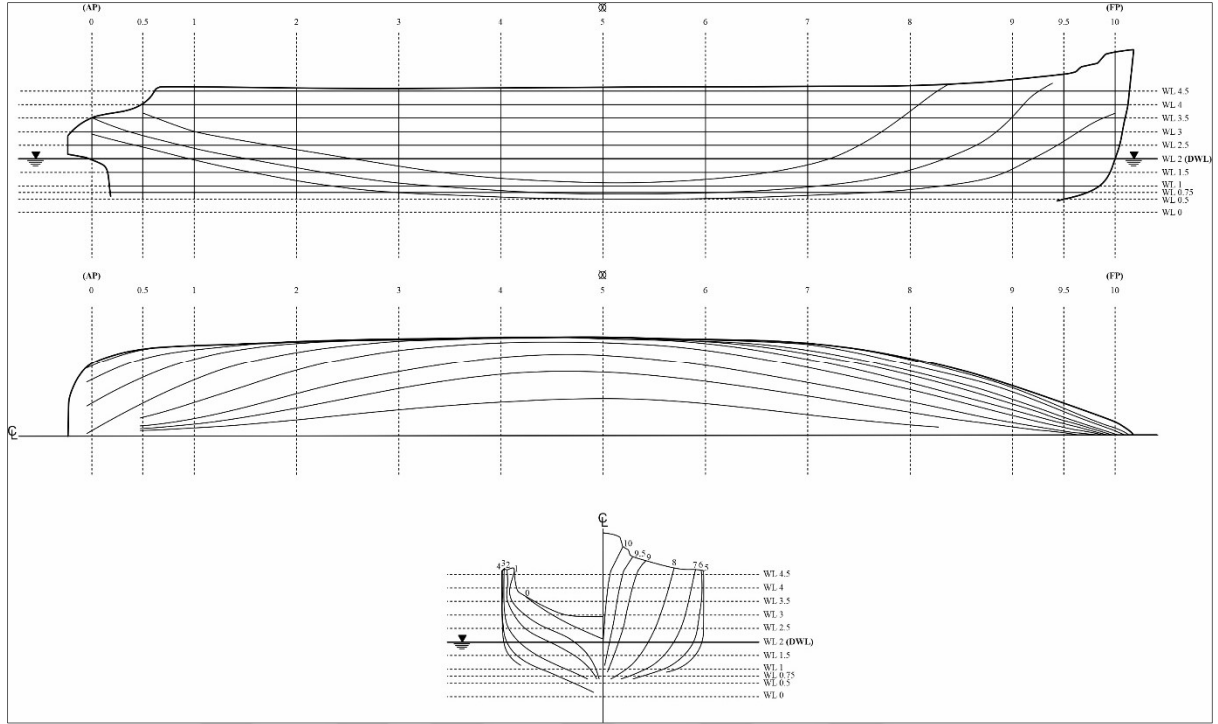
4.3. Endaze Planlarının Kıyaslanması



Şekil 4.5. Endaze planı (mobil)



Şekil 4.6. Endaze planı (İHA)



Şekil 4.7. Endaze planı (lazer)

Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de her üç yöntem ile elde edilen endaze planları sunulmaktadır. Burada göze çarpan en belirgin detay, fotogrametrik yöntemlerle elde edilen en kesit eğrileri kıvrımlar içermektedir. Bunun sebebi elde edilen 3B mesh modeli üzerindeki girinti ve çıkıntılardır. Bu durum; kamera lenslerinin derinlik algısından, kalibrasyon parametrelerinin hesaplanmasındaki küçük hatalardan veya güneş ışığının gemi yüzeyinde oluşturduğu yansılardan kaynaklanabilmektedir. Lazer tarama yöntemiyle elde edilen kesit eğrilerinde ise böyle bir durum söz konusu değildir. Bir başka deyişle, gemilerin gövde formu dizayn edilirken tiriz eğrileri oluşturacak şekilde hesaplamalar yapılmaktadır. Fotogrametrik yöntemle elde edilen bu en kesit eğrileri tiriz eğrisi olma özelliği taşımamaktadır ve düzeltilmesi gerekmektedir. Eğrileri yumuşatma gibi algoritmalar bu tarz durumlarda kullanılabilmektedir; fakat bu çalışma kapsamının dışına çıktığı için o uygulamalara girilmemiştir.

Yukarıdaki 3 şekilde göze çarpan bir diğer detay da, sıfırıncı su hattı (kaide hattı) ile birinci su hattı (0.5 m) arasındaki bölgede verilerin eksik olmasıdır. Bunun sebebi gemi tabanının ne fotoğraflarla ne de lazer tarayıcı ile okuma yapılamayacak bir çukurun içinde yer almasıdır. Lazer tarayıcı nispeten veri yakalayabilse de, İHA ve cep telefonu kamerası bu seviyelerden veri alamamıştır.

Şekil 4.5’te mobil fotogrametrik yöntemle elde edilen endaze eğrileri görülmektedir. Su hattı eğrileri incelendiğinde, bazı seviyelerde en kesit eğrilerinde olduğu gibi, tiriz özelliğinin bozulduğu ve gemi formunun hatalı ifade edildiği görülmektedir. Hatta bazı su hattı eğrilerinin birbiri ile kesiştiği görülmektedir ki bu da fiziksel olarak gemi gövdesindeki çukur bölgeler varmış kanısı yaratmaktadır. Görsel olarak çok iyi sonuçlar verse de, model doğruluğu yönünden mobil fotogrametrik yöntem diğer yöntemlere nazaran geride kalmıştır.

Şekil 4.6’da İHA ile elde edilen fotogrametrik model sunulmaktadır. Buradaki en belirgin bulgulardan birincisi; alt seviyelerde (0.00-1.00 m), su hattı ve en kesit eğrilerinin belirgin hatalar içermesidir. İHA ile alım belirli bir irtifadan yapıldığı için, düşük seviyelerde modelde akmalar mevcuttur ve bu durum en kesit eğrilerinde açıkça görülmektedir. Aynı şekilde, su hatlarının da birbiriyle kesişmesi, alçak su hattı seviyelerinde modelin hatalı oluşturulduğunu göstermektedir.

Şekil 4.7’de ise yersel lazer tarayıcı ile elde edilen endaze planı sunulmaktadır. Su hattı ve en kesit eğrilerinin en düzgün ve detaylı şekilde elde edildiği yöntemin lazer verileri olduğu görülmektedir. Görsel açıdan fotogrametrik yöntemler kadar başarılı sonuçlar vermese de, model doğruluğu yönünden diğer yöntemlere nazaran üstünlük sergilemiştir. Ek-2’de lazer tarama sonucu elde edilen verilerin birleştirilmesi işlemine ait rapor sunulmaktadır. Rapor incelendiğinde, ortalama 5.3 mm’lik bir hata hesaplanmıştır. 40 metre mertebesindeki bir gemi için bu hata değeri oldukça makul olarak yorumlanmıştır. Bu değer nokta verilerinin birleştirilmesi sonucu hesaplanan değerdir. Nokta bulutu verisi kullanılarak elde edilen mesh modeline ait doğruluk analizi sonuçları ise Tablo 4.4’te sunulmaktadır.

Tablo 4.4. 3B model doğruluk analizi (lazer) [cm]

Gerçek	Model	Fark	Fark ²
88.5	86.09	2.41	5.8081
278	277.85	0.15	0.0225
58	57.85	0.15	0.0225
56.3	55.17	1.13	1.2769
26.5	25.46	1.04	1.0816
131	130.27	0.73	0.5329
202	200.42	1.58	2.4964

Tablo 4.4’te gemi üzerinden alınan gerçek uzunluk değerleri ve oluşturulan 3B model üzerinden alınan uzunluk değerleri sunulmaktadır. Değerlerin farkı ve ardından farkların karesi alınarak ortalama karekök hata (RMSE) değeri hesaplanmıştır. Toplam değer, veri sayısına bölünerek karekökü alınmıştır. İşlemler sonucunda RMSE değeri 1.27 cm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, gemi boyuna oranla %0.03’e denk gelmektedir. Tabii ki buradaki hesaplama, gemi üzerindeki rastgele 7 uzunluğun karşılaştırılması ile elde edilmiştir ve model bütünündeki doğruluğu yansıtmamaktadır. Model ile gerçek nesne arasındaki ölçek için doğruluk analizi olarak yorumlanabilir.

Tablo 4.5. 3B model doğruluk analizi (mobil) [cm]

Gerçek	Model	Fark	Fark ²
88.5	93.58	5.08	25.8064
278	281.25	3.25	10.5625
58	62.48	4.48	20.0704
56.3	61.72	5.42	29.3764
26.5	23.12	3.38	11.4244
131	137.1	6.1	37.21
202	205.88	3.88	15.0544

Tablo 4.5'te mobil fotogrametrik yöntemle elde edilen 3B modele ait doğruluk analizi sunulmuştur. İşlemler sonucunda RMSE değeri 4.62 cm olarak hesaplanmıştır. Cep telefonu kamerası ile 3B fotogrametrik model üretme işleminin lazer taramaya göre çok daha pratik olmasına karşın, doğruluk yönünden arka planda kaldığı görülmektedir.

Tablo 4.6. 3B model doğruluk analizi (İHA) [cm]

Gerçek	Model	Fark	Fark²
88.5	91.62	3.12	9.7344
278	275.42	2.58	6.6564
58	60.17	2.17	4.7089
56.3	58.22	1.92	3.6864
26.5	25.57	0.93	0.8649
131	132.98	1.98	3.9204
202	204.28	2.28	5.1984

Tablo 4.6'da İHA ile elde edilen fotogrametrik 3B modele ait doğruluk analizi hesaplaması sunulmuştur. Hesaplamalar sonucunda RMSE değeri 2.23 cm olarak elde edilmiştir. Bu değere bakıldığında, mobil fotogrametrik yöntemle kıyasla daha iyi sonuç verdiği; fakat lazer sonuçlarına göre ise daha düşük doğruluk elde edildiği görülmüştür. Yukarıda da belirtildiği üzere, hesaplanan RMSE değerleri oluşturulan 3B modellerin bütününe ait bir doğruluk ifade etmemektedir. Gemi üzerinde rastgele yerlerden alınan bu ölçüler, yöntemlerin ölçek doğruluğu yönünden genel bir fikir verebilmektedir. Ölçülerin nerelerden alındığı da sonuçları doğrudan etkilemektedir. Örneğin güverte üzerindeki ölçümlerde lazer tarama ve İHA verileri yüksek doğruluk sağlarken, mobil fotogrametrik yöntemde tam tersi durum söz konusudur. Yine, gemi karinasının alt bölgelerinde İHA verileri düşük doğruluk sağlarken, diğer iki yöntem daha yüksek doğruluk vermektedir.

4.4. Gemiye Ait Eski Proje Verilerinin Günümüzdeki Restore Edilmiş Haliyle Kıyaslanması ve Yorumlanması

Ek-4'te Nusrat Mayın Gemisi'ne ait 2007 yılında restore edilmiş bir plan sunulmuştur. Göltekin ve Karakaş tarafından oluşturulan bu plan, Deniz Müzesi bünyesindeki 1914 planı ve çeşitli senelerdeki fotoğrafları kullanılarak üretilmiştir. Günümüzdeki restore edilmiş hali ile bu plan arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır. Çift pervaneli yapısı yerini tek pervaneye bırakmıştır. Daha narin olan kık formu ise daha dolgun hale getirilmiştir. Pervane çapı büyümüş, kullanılan dümen de buna bağlı olarak büyümüş ve farklı profilde monte edilmiştir. Gövde takıntılarının yeri ve boyutları tamamen değişmiştir. Kullanılan çapalar da günümüzde tamamen farklıdır. Gemi kık formunun dolgunlaştırılması sonucunda en kesit eğrileri ve su hatları farklı eğilim sergilemektedir. Güverte yerleşimi ise genel hatlarıyla korunmuştur. Günümüzdeki versiyonunda, mayınları suya bırakmaya yarayan raylar asimetrikler içermektedir.

Ek-5'te gemiye ait Alper tarafından 2009 yılında çizimi yapılan bir pafta sunulmaktadır. 1915 yılına ait genel yerleşim planı olduğu belirtilen çizim incelendiğinde, kış formu hem günümüz restore haliyle hem de Ek-4'teki çizimlerle farklılık göstermektedir. Yine çift pervaneli ve daha narin gövde yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu paftada ek olarak makine dairesi, ana güverte altı ve yaşam mahali detayları da bulunmaktadır. Fakat günümüzde müze gemisi olarak sergilenen bu geminin, çalışma yaptığımız süre boyunca söz konusu yerlerine giriş imkanımız bulunmadığı için kıyaslama yapılamamıştır.

Ek-6'da geminin hangi yıla ait olduğu bilinmeyen ve kaynak üzerinde de okunamayan bir paftası sunulmuştur. Bu paftada da Ek-4 ve Ek-5'te olduğu gibi daha narin bir gövde formu ve çift pervaneli bir kış yapısı görülmektedir. Gözetleme kulesi de günümüzdeki restore edilmiş halinden farklı görünmektedir. Güverte üzerindeki filikalar da günümüzde daha küçük şekilde konumlandırılmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında tersine mühendisliğin tanımına değinilmiş, başlıca tersine mühendislik yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalara da “Kaynak Araştırmaları” başlığı altında değinilmiştir.

Piyasada en sık kullanılan tersine mühendislik yöntemlerinden ikisi (lazer tarama ve fotogrametri) hakkında detaylı bilgi verilmiş ve bu yöntemler ile 3B model üretim süreci anlatılmıştır. Çalışma sonucunda ise yöntemler kendi aralarında zaman, maliyet, doğruluk, uygulanabilirlik gibi faktörler açısından kıyaslanmıştır.

Günümüzde tasarlanan ve üretilen gemilerin hepsinin dizayn verileri, teknik çizimleri ve mühendislik hesaplamaları gemi projesi bünyesinde ve elektronik ortamda bulunmaktadır. Tüm bu belgeler geminin tasarım sürecinden ömrünü tamamlayıp sudan çekilmesi sürecine kadar saklanmakta ve ihtiyaç halinde kullanılmaktadır. Gemiye ait belgeler; geminin karaya oturması sonucunda kurtarma işlemi, çarpma hasarının giderilmesi, restorasyon ve modifikasyon işlemleri, tamir-bakım ve onarım gibi işlemlerde ihtiyaç duyulan ve başvuru belgeleridir. 3B model, teknik çizimler ve mühendislik hesaplamaları gibi detayları barındıran bu belgeler gemi yaşam döngüsü süresince kaybolmuş, hasar görmüş ve ulaşılamaz durumda olabilmektedir. Tersine mühendislik yöntemleri tam da bu durumda, halihazırda var olan bir geminin 3B modelinin ve bazı teknik çizimlerinin yeniden oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Çalışma kapsamında; ülkemiz açısından tarihi öneme ve milli değere sahip olan Nusrat Mayın Gemisi’nin 3B modeli, üç farklı tersine mühendislik yöntemiyle elde edilmiştir. Elde edilen 3B modeller kullanılarak gemiye ait endaze planları oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonuçlar üzerinde doğruluk analizi yapılmış ve “Bulgular” başlığı altında sunulmuştur.

Elde edilen 3B modeller ve endaze planları incelendiğinde, sonuçların gemi boyuna göre oransal açıdan iyi olduğu kanısına varılmıştır. Fakat elde edilen modeller hatasız değildir ve model bütünlüğü açısından farklı kusurlar içermektedir. Benzer çalışmalarda daha iyi sonuçlar elde edebilmek için, literatürdeki benzer çalışmalar da göz önünde bulundurularak, aşağıdaki öneriler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Fotoğraf çekimi işlemleri ya homojen ışık içeren bir stüdyo ortamında ya da güneşin yarattığı parlama etkilerinin olmadığı saatlerde gerçekleştirilmelidir.
- Fotoğraf çekiminde kullanılacak lenslerin derinlik alıgısı yüksek olmalıdır.
- Kamera kalibrasyon işlemleri hassasiyetle ve titizlikle yürütülmelidir.
- Lazer tarama işlemleri güneşin cisim üzerinde yarattığı parlama etkilerinin minimumda olduğu saatlerde yapılmalıdır.
- Lazer tarama oturumları, zaman olması halinde, daha yüksek kalitede ve detaylı gerçekleştirilmelidir. Aynı şekilde fotoğraf çekim işlemleri de daha detaylı ve sistematik yapılmalıdır. Bunun sonucunda verileri işlemek için gerekli olan bilgisayar donanımı gücü de yükselecektir.

- İmkan var ise daha yüksek veri işleme yeteneğine sahip bilgisayarlarda en yüksek kalitede prosesler gerçekleştirilmelidir.
- İHA ile mümkün olduğu kadar alçak irtifadan uçuş yapılarak gemi karinasındaki detaylar da fotoğraflanmalıdır.

Bu tez çalışmasının devamı niteliğinde Nusrat Mayın Gemisi'ne ait gemi direnci ve motor gücü hesaplamaları da yapılarak benzer gemilerin verileriyle kıyaslanması planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

- Abbas, M. A., Lichti, D. D., Chong, A. K., Setan, H., Majid, Z., Lau, C. L., Idris, K. M., & Ariff, M. F. M. (2017). "Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 100, 301–310. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.053>
- Housel, T. J., Mun, J., Ford, D. N. and Hom, S. (2015). "Benchmarking naval shipbuilding with 3D laser scanning, additive manufacturing, and collaborative product lifecycle management." *Acquisition Research Program Sponsored Report Series*. Monterey: CA.
- Aldao, E., González-Jorge, H., and Pérez, J. A. (2021). "Metrological comparison of LiDAR and photogrammetric systems for deformation monitoring of aerospace parts." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 174(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109037>
- Anwer, N. and Mathieu, L. (2016). "From reverse engineering to shape engineering in mechanical design." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 165–168. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.052>
- Baehr, J., Bernardini, A., Sigl, G. and Schlichtmann, U. (2020). "Machine learning and structural characteristics for reverse engineering." *Integration*, 72(October 2019), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2019.10.002>
- Balletti, C., Beltrame, C., Costa, E., Guerra, F., & Vernier, P. (2015a). "Photogrammetry in maritime and underwater archaeology: two marble wrecks from Sicily." *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology V*, 9527(December), 95270M. <https://doi.org/10.1117/12.2184802>
- Balletti, C., Beltrame, C., Costa, E., Guerra, F., & Vernier, P. (2015b). "Underwater photogrammetry and 3D reconstruction of marble cargos shipwreck." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), 7–13. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-7-2015>
- Bauer, F., Schrapp, M., & Szijarto, J. (2019). "Accuracy analysis of a piece-to-piece reverse engineering workflow for a turbine foil based on multi-modal computed tomography and additive manufacturing." *Precision Engineering*, 60(July), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.07.008>

Bruno, F., Lagudi, A., Ritacco, G., Agrafiotis, P., Skarlatos, D., Cejka, J., Kouril, P., Liarokapis, F., Philpin-Briscoe, O., Poullis, C., Mudur, S., & Simon, B. (2017). “Development and integration of digital technologies addressed to raise awareness and access to European underwater cultural heritage.” An overview of the H2020 i-MARECULTURE project. OCEANS 2017 - Aberdeen, 2017-(June), 1–10. <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084984>

Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A., & Volpe, Y. (2018). “Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach.” *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(2), 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.009>

Bursa Teknik Üniversitesi Doğa Bilimleri Ve Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Tersine Mühendislik Deney Föyü. (t.y.).

Che, J., Zhang, Y., Wang, H., Liu, Y., Du, M., Ma, S., Zhao, Y., & Suo, C. (2021). “A novel method for analyzing working performance of milling tools based on reverse engineering.” *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 197(September 2020), 107987. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107987>

Chitsaz, N., Siddiqui, K., Marian, R., & Chahl, J. (2021). “An experimental study of the aerodynamics of micro corrugated wings at low Reynolds number.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 121(September 2020), 110286. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110286>

Ciocănea, A., Nicolaie, S., & Băbuțanu, C. (2017). “Reverse Engineering for the Rotor Blades of a Horizontal Axis Micro-hydrokinetic Turbine.” *Energy Procedia*, 112(October 2016), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1056>

Kaplan, A. (2016). Francis tipi türbin çarkının tersine mühendislik ile tasarımı ve rehabilitasyonu, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Dinçer, A. E., Temel, S. C., & Öztürk, S. M. (2021). “Safranbolu-İncekaya Bölgesi’nde bir mimari stüdyo deneyimi.” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(1), 278–292.

Elizondo, A., & Reinert, F. (2019). “Limits and hurdles of reverse engineering for the replication of parts by additive manufacturing (Selective laser melting).” *Procedia Manufacturing*, 41, 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.027>

Engel, B., & Al-Maeni, S. S. H. (2019). “An integrated reverse engineering and failure analysis approach for recovery of mechanical shafts.” *Procedia CIRP*, 81, 1083–1088. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.257>

Fondevilla, A., Bousseau, A., Rohmer, D., Hahmann, S., & Cani, M. P. (2017). “Patterns from photograph: Reverse-engineering developable products.” *Computers and Graphics (Pergamon)*, 66, 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.05.017>

Fuentes, F. J., Cordier, J. J., Leonard, P., Scherrer, L., Wilson, D., Gagueche, H., & Popa, T. (2019). “Methodology for reverse engineering analysis of ITER as-built integrated systems.” *Fusion Engineering and Design*, 146(April), 2268–2272. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.169>

Gameros, A., de Chiffre, L., Siller, H. R., Hiller, J., & Genta, G. (2015). “A reverse engineering methodology for nickel alloy turbine blades with internal features.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 9, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.12.001>

Gauthier, S., Puech, W., Bénéière, R., & Subsol, G. (2017). “Analysis of digitized 3D mesh curvature histograms for reverse engineering.” *Computers in Industry*, 92–93, 67–83. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.06.008>

Georgiev, P. (2016). “3D printing and naval architecture: A literature review.” *Varna Teknik Üniversitesi Yıllık Dergisi*.

Gómez, A., Olmos, V., Racero, J., Ríos, J., Arista, R., & Mas, F. (2015). “Manufacturing of Custom-made Parts for Assembly of Large Aircraft Components.” *Procedia Engineering*, 132, 1006–1013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.589>

Guan, G., & Gu, W. W. (2019). “Reconstruction of propeller and complex ship hull surface based on reverse engineering.” *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 27(6), 498–504. [https://doi.org/10.6119/JMST.201912_27\(6\).0002](https://doi.org/10.6119/JMST.201912_27(6).0002)

Günpınar, E. (2016). “Tersine mühendislik yoluyla üç boyutlu geometrik modelin oluşturulması ve gemi yapı endüstrisindeki bazı uygulamaları.” *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik*, 18(54), 624–624. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2016185426>

Helle, R. H., & Lemu, H. G. (2021). “A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control.” *Materials Today: Proceedings*, 45, 5255–5262. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>

Herráez, J., Martínez, J. C., Coll, E., Martín, M. T., & Rodríguez, J. (2016). “3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 87, 216–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.005>

Hofmann, R., & Gröger, S. (2019). “Closed loop geometrical tolerance engineering with measuring data for reverse information processing.” *Procedia CIRP*, 84, 311–315. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.242>

Hua, S., Li, B., Shu, L., Jiang, P., & Cheng, S. (2021). “Defect detection method using laser vision with model-based segmentation for laser brazing welds on car body surface.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 178(March), 109370. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109370>

Hunter, J. W., & Jateff, E. (2016). “From Battleship to Breakwater: post-military adaptive reuse of the Australian warship Protector.” *International Journal of Nautical Archaeology*, 45(2), 423–440. <https://doi.org/10.1111/1095-9270.12177>

İşbilir, F., Çelik, B., Özsan, A., & Kaynak, M. F. (2018). “Tersine mühendislik temelli araç üstyapı tasarımı, analiz ve üretiminin incelenmesi.” *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*. 1(2), 72–79.

Jing, X., Zhang, C., Sun, Z., Zhao, G., & Wang, Y. (2015). “The Technologies of Close-range Photogrammetry and Application in Manufacture.” *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation, ICMRA 2015, Shenzhen, China*, pp. 988-994.

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

Kohtala, S., Erichsen, J. F., Wullum, O. P., & Steinert, M. (2021). “Photogrammetry-based 3D scanning for supporting design activities and testing in early stage product development.” *Procedia CIRP*, 100, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.047>

Kovács, I., Várady, T., & Salvi, P. (2015). "Applying geometric constraints for perfecting CAD models in reverse engineering." *Graphical Models*, 82, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2015.06.002>

Larocco, J., & Paeng, D. G. (2020). "A functional analysis of two 3d-scanned antique pistols from New Zealand." *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 85–94. <https://doi.org/10.4995/var.2020.12676>

Liang, B., Liu, W., Liu, K., Zhou, M., Zhang, Y., & Jia, Z. (2021). "A Portable Noncontact Profile Scanning System for Aircraft Assembly." *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.09.017>

Li, L., Li, C., Tang, Y., & Du, Y. (2017). "An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 48(February), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.02.004>

Liu, X., Wei, Y., Wu, H., & Zhang, T. (2020). "Factor analysis of deformation in resistance spot welding of complex steel sheets based on reverse engineering technology and direct finite element analysis." *Journal of Manufacturing Processes*, 57(May), 72–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.028>

Liu, X., Wei, Y., Wu, H., Zhang, T., & Liu, S. (2019). "Effect of stamping dimensional deviations on residual stresses and deformation of resistance spot welded steel sheets." *Journal of Materials Processing Technology*, 272(April), 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.045>

Makar, A., Specht, C., Specht, M., Dąbrowski, P., & Szafran, M. (2020). "Integrated geodetic and hydrographic measurements of the yacht port for nautical charts and dynamic spatial presentation." *Geosciences (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/geosciences10050203>

Matys, M., Krajcovic, M., & Gabajova, G. (2021). "Creating 3D models of transportation vehicles using photogrammetry." *Transportation Research Procedia*, 55, 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.025>

McCarthy, J. K., Benjamin, J., Winton, T., & van Duivenvoorde, W. (2020). "3D Recording and Interpretation for Maritime Archaeology." In *Underwater Technology* (Vol. 37, Issue 2). <https://doi.org/10.3723/ut.37.065>

Mejia, D., Ruiz-Salguero, O., Sánchez, J. R., Posada, J., Moreno, A., & Cadavid, C. A. (2018). "Hybrid geometry / topology based mesh segmentation for reverse engineering." *Computers and Graphics (Pergamon)*, 73, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.03.004>

Mora, S. M., Gil, J. C., & López, A. M. C. (2019). “Influence of manufacturing parameters in the dimensional characteristics of ABS parts obtained by FDM using reverse engineering techniques.” *Procedia Manufacturing*, 41, 968–975. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.022>

Morini, M., Pavan, C., Pinelli, M., Romito, E., & Suman, A. (2015). “Analysis of a scroll machine for micro ORC applications by means of a RE/CFD methodology.” *Applied Thermal Engineering*, 80, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.039>

Mouloudi, S., Rahmanpanah, H., Burvill, C., & Davies, H. M. S. (2019). “Accuracy Quantification of the Reverse Engineering and High-Order Finite Element Analysis of Equine MC3 Forelimb.” *Journal of Equine Veterinary Science*, 78, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.004>

Munthe-Kaas, N. H. (2018). Estimating the Design Parameters of a Highly Skewed Ship Propeller by Automated 3D-scanning, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Athanasios, P. (2020). Development of reverse engineering algorithms for automated generation of ship hulls from hydrostatic curves and general ship data, Diploma Thesis, National Technical University of Athens, Athens, Greece.

Önçağ, A. Ç., Tekcan, Ç., & Özden, H. (2018). “Assessment and application of modeling mechanic parts with reverse engineering.” *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(1), 43–49. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.05925>

Özdoğan, M. V. (2015). Madencilik faaliyetleri sonucu oluşan yüzey hareketlerinin yeni teknolojiler ile belirlenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 183s, İzmir, Türkiye.

Özdoğan, M. V. & Deliormanlı, A. H. (2018). “Yersel lazer tarayıcı ile yeraltı galerisinde meydana gelen deformasyonların belirlenmesi.” *Dokuz Eylül Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 663-675.

Peuzin-Jubert, M., Polette, A., Nozais, D., Mari, J.-L., & Pernot, J.-P. (2021). “Survey on the View Planning Problem for Reverse Engineering and Automated Control Applications.” *Computer-Aided Design*, 141, 103094. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103094>

Raffo, A., Barrowclough, O. J. D., & Muntingh, G. (2020). "Reverse engineering of CAD models via clustering and approximate implicitization." *Computer Aided Geometric Design*, 80, 101876. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2020.101876>

Rakesh, K., Satyanarayana, B., & Bollu, M. S. (2021). "Manufacturing of complex components using photogrammetry in association with additive manufacturing." *Materials Today: Proceedings*, 44, 2389–2392. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.451>

Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Naveen, E., Rekha, G., Vidhyarajan, M., Manivannan, M., & Dhanush, J. (2018). "Implementation of Concurrent Redesign & Manufacture procedure for an automotive component." *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1418–1424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.228>

Roskosch, D., & Atakan, B. (2015). "Reverse engineering of fluid selection for thermodynamic cycles with cubic equations of state, using a compression heat pump as example." *Energy*, 81, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.025>

Rupal, B. S., Mostafa, K. G., Wang, Y., & Qureshi, A. J. (2019). "A reverse CAD approach for estimating geometric and mechanical behavior of FDM printed parts." *Procedia Manufacturing*, 34, 535–544. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.217>

Şahin, İ., Şahin, T., Gökçe, H. ve Eren, O. (2017). "Hasarlı dişlilerin tersine mühendislik yaklaşımıyla yeniden oluşturulması." *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (2017) 485-495.

Saiga, K., Ullah, A. S., Kubo, A., & Tashi. (2021). "A Sustainable Reverse Engineering Process." *Procedia CIRP*, 98, 517–522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.144>

Satyanarayana, A., Chauhan, A. S., Pradyumna, R., & Baig, M. A. H. (2017). "Applications of LASER Inspection for Precision Components." *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1230–1235. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.142>

Segreto, T., Bottillo, A., Caggiano, A., & Martorelli, M. (2019). "Integration of reverse engineering and ultrasonic non-contact testing procedures for quality assessment of CFRP aeronautical components." *Procedia CIRP*, 79, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.082>

Singh, S. K., Raval, S., & Banerjee, B. (2021). "A robust approach to identify roof bolts in 3D point cloud data captured from a mobile laser scanner." *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(2), 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.01.001>

Skotarek, C., Markstaedter, K., Brueckner-Foit, A., & Rienaecker, A. (2019). "Determination of crack initiation in an interior cold-weld by combining reverse engineering and digital image correlation analysis." *Procedia Structural Integrity*, 23(2019), 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.130>

Sokół, K., & Cekus, D. (2017). "Reverse Engineering as a Solution in Parts Restoration Process." *Procedia Engineering*, 177, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.191>

Stentoumis, C., Kalisperakis, I., Drikos, L., & Grammatikopoulos, L. (2016). "Visual and geometric recording of cargo vessels." *International Conference on Maritime Safety and Operations*, October, 165–170.

Tang, D., Wu, J., Zeng, J., Gao, W., & Du, L. (2019). "Research on cigarette during smoking based on reverse engineering and numerical simulation." *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(10), 2359–2375. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.04.020>

Santillan, J. R. (t.y.). "Topic 1. Review of Basic Concepts and Principles of Photogrammetry." *Lecture Notes*, Division of Geodetic Engineering College of Engineering and Information Technology Caraga State University, Ampayon, Butuan City.

Valerga, A. P., Batista, M., Bienvenido, R., Fernández-Vidal, S. R., Wendt, C., & Marcos, M. (2015). "Reverse Engineering Based Methodology for Modelling Cutting Tools." *Procedia Engineering*, 132, 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.607>

Vijaya Ramnath, B., Elanchezhian, C., Jeykrishnan, J., Ragavendar, R., Rakesh, P. K., Dhamodar, J. S., & Danasekar, A. (2018). "Implementation of Reverse Engineering for Crankshaft Manufacturing Industry." *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 994–999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.175>

Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E. and Kraus, K. (2004). "Laser scanning: A new method for recording and documentation in archaeology." In *Proceedings of FIG Working Week*, Athens, Greece, May 22–27.

Wang, P., Yang, J., Hu, Y., Huo, J., & Feng, X. (2021). "Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing." *Alexandria Engineering Journal*, 60(3), 3445–3453. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.006>

Wiedemann, A. (1998). "From analogue to digital close-range photogrammetry." Department for Photogrammetry and Cartography, TU Berlin. <https://www.researchgate.net/publication/2332200>

Woloszyk, K., Bielski, P. M., Garbatov, Y., & Mikulski, T. (2021). "Photogrammetry image-based approach for imperfect structure modelling and FE analysis." *Ocean Engineering*, 223(January), 108665. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108665>

Yakar, M., Yilmaz, H. M. & Mutluoglu, O. (2010). "Comparative Evaluation of Excavation Volume by TLS and Total Topographic Station Based Methods." *Lasers in Engineering* 19 (5–6), 331–345.

Yang, Y., Fang, H., Fang, Y., & Shi, S. (2020). "Three-dimensional point cloud data subtle feature extraction algorithm for laser scanning measurement of large-scale irregular surface in reverse engineering." *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 151, 107220. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107220>

Yilmaz, H. M., Yakar, M., Mutluoglu, O., Kavurmaci, M. M. & Yurt, K. (2012). "Monitoring of soil erosion in Cappadocia region (SelimeAksaray-Turkey)." *Environ Earth Sci*, 66, 75–81.

Yuan, Z., Zeng, H., Xu, W., Qiu, J., Xu, Y., & Chen, X. (2021). "Reverse engineering for estimation of shear modulus for yarn models in finite element modelling for ballistic impact." *Composite Structures*, 274(July), 114371. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114371>

Zeraatkar, M., Khalili, K., & Foorginejad, A. (2015). "Studying and Generation of Saffron Flower's 3D Solid Model." *Procedia Technology*, 19, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.010>

Zhang, L., Yuan, J., He, S., Huang, S., Xiong, S., Shi, T., & Xuan, J. (2021). "Contact heat transfer analysis between mechanical surfaces based on reverse engineering and FEM." *Tribology International*, 161(March), 107097. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107097>

Zivkovic, S., Cerce, L., Kostic, J., Majstorovic, V., & Kramar, D. (2018). "Reverse engineering of turbine blades Kaplan's type for small hydroelectric power station." *Procedia CIRP*, 75, 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.037>

IndiaMART (2019). Portable Coordinate Measuring Machine. 9 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.indiamart.com/proddetail/portable-coordinate-measuring-machine-22062585012.html> adresinden erişildi.

Paksoy (t.y.). Faro Focus Serisi. 9 Mayıs 2022 tarihinde <https://paksoytekni.com.tr/index.php/paksoy-topcon/lazer-tarama/faro> adresinden erişildi.

Shabani, B. & Vrtanoski, G. & Dukovski, V. (2018). “Integrated Reverse Engineering and Additive Technology Systems.” Mechanical Engineering – Scientific Journal, Vol. 36, No. 1, pp. 47–54.

The New School (2017). Photogrammetry. 9 Mayıs 2022 tarihinde <https://tnsatlanta.org/tns-x-photogrammetry-computer-modeling-basics/attachment/photogrammetry/> adresinden erişildi.

Hughes, D., Fricker, P., Chapuis, A., Traversari, E., Schreiber, P., Schapira, F. (t.y.). The Development of Photogrammetry in Switzerland. 9 Mayıs 2022 tarihinde <http://www.wild-heerbrugg.com/photogrammetry1.htm> adresinden erişildi.

Singh, Y. (t.y.). Concepts of photogrammetry. 9 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.satpalda.com/blogs/concepts-of-photogrammetry> adresinden erişildi.

Erdal, B. (t.y.). CCD veya CMOS sensör nedir?. 9 Mayıs 2022 tarihinde <https://fotopanorama360.com/ccd-veya-cmos-sensor-nedir/> adresinden erişildi.

Twech. (t.y.). Digital photogrammetry. 9 Mayıs 2022 tarihinde <http://twechmapit.com/geodashboard/img/slider/image-10.jpg> adresinden erişildi.

Parrot (2021). Anafi white paper v1.4. 24 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-02/anafi-product-sheet-white-paper-en.pdf> adresinden erişildi.

Paksoy (t.y.). Faro Focus Serisi. 24 Mayıs 2022 tarihinde <https://paksoytekni.com.tr/paksoy-topcon/lazer-tarama/faro.html> adresinden erişildi.

Camera FV-5 (t.y.). Samsung Galaxy S10. 9 Mayıs 2022 tarihinde https://www.camerafv5.com/devices/manufacturers/samsung/sm-g973f_beyond1_1/ adresinden erişildi.

EKLER

Ek-1

FARO® Focus Lazer Tarayıcı

En kompakt hafiflikte ve kullanımı kolay lazer tarayıcı ürün grubu

FARO®



HASSASİYET
Focus® arttırılmış hassasiyet ve çift eksenli kompansatörü mesafe ve açısal ölçümle çevreyi yakalar.

YERİNDE KOMPANZASYON
Yerinde kompansasyon fonksiyonu ile kullanıcılar FocusS kompansasyonunu yerinde doğrulayıp ve ayarlayarak, yüksek kaliteli tarama verisini garanti ederler.

AKSESUAR SOKETİ
Aksesuar soketi, kullanıcılara çeşitli projelerde yardımcı olması için ilave 3D lazer tarama aksesuarlarının bağlantısını yapma imkanı vermektedir.

SICAKLIK
Arttırılmış sıcaklık aralığı zorlu ortamlarda taramaya imkan sağlar. Focus -20°C kadar düşük ve 55°C'ye kadar olan sıcaklıklarda çalışır.

IP KORUMA DERECEĞİ - SINIF 54
Sızdırmaz tasarımı ve endüstri standardı Koruma Derecesi (IP), IP54 ile Focus yüksek partiküllü ve yağmurlu hava şartlarında kullanılabilir.

KOMPAKT VE TAŞINABİLİR
Focus lazer tarayıcılar 230 x 183 x 103mm ebatları ve 4,2 kg ağırlığıyla piyasadaki en küçük ve en hafif tarayıcılardır. Cihazlar azami taşınabilirlik maksadıyla su geçirmez ve ergonomik bir taşıma muhafazasıyla donatılmıştır.

KISA, ORTA VE UZUN MESAFE UYGULAMALARI İÇİN LAZER TARAYICILAR

FARO Focus Lazer Tarayıcılar özel olarak Mimari, Mühendislik, İnşaat, Kamu Güvenliği ve Adli Tıp veya Ürün Tasarımı gibi sektörlerde hem iç mekan hem de dış mekan ölçümleri için tasarlanmıştır. Bütün cihazlar; tüm proje ve ürün kalitesini geliştirmek için gereken analiz, iş birliği ve daha iyi kararlar alınmasında kullanılan bilgiyi dijital dünyaya aktarmak maksadıyla, gerçek dünya bilgilerini yakalamaktadır. Tüm Focus® ve FocusM® tarayıcılar Koruma Derecesi (IP), geniş sıcaklık aralığı, HDR fonksiyonu, hepsi ultra portatif bir boyutta, fark edilebilir özelliklerle donatılmıştır. Lazer tarayıcı Focus® Serisi, ek olarak daha ileri fonksiyonellik sunar. Arttırılan mesafe ve açısal hassasiyetin yanı sıra, tüm Focus® tarayıcıları dahili bir aksesuar cebi ve bir yerinde dengeleme fonksiyonu kalite doğrulaması ile donatılmıştır. SCENE Yazılımı ile birlikte kullanıldığında, Focus® gerçek zamanda yerinde bir mobil cihaza/PC'ye doğrudan 3D tarama verisinin kablolu aktarılmasını, işlenmesini, eşlenmesini ve kaydedilmesini sağlayan, gerçek zamanlı, yerinde kaydı destekler.

FAYDALAR

- İzlenebilir müşteri kalibrasyonu ile güvenli ve belgeli veri kalitesi ve yerinde dengeleme pazar lideri
- Toz, moloz ve su sıçramalarından koruma sağlayarak, zorlu koşullarda tarama.
- Focus lazer tarayıcı portföyü tüm gerekliliklere ve bütçelere en ekonomik 3D tarama çözümünü sunmaktadır.
- Çevrimiçi pratik dersler ve kolay ve çalışması kolay dokunmatik arayüzü sayesinde, eğitim için çok az bir çaba gereklidir.
- Mevcut yazılım altyapılarına ve iş akışlarına etkili biçimde entegrasyon değişik standartlarda CAD sistemlerinde arayüzlerle sağlanmaktadır.

FARO® Focus Lazer Tarayıcı

www.faro.com

FARO®

PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

	FOCUS® SERİSİ S 350 S 150 S 70	FOCUS™	FOCUS® SERİSİ S 350 S 150 S 70	FOCUS™
MESAFE ÖLÇME ÜNİTESİ				
Keskinlik Aralığı:	122 ila 488kpts/s için 614m 976 kpts/s için 307m	belirtilmemiş		
MESAFE¹				
%90 yansima (beyaz)	0,6-350m 0,6-150m 0,6-70m	0,6 - 70m		
%10 yansima (koyu gri)	0,6-150m 0,6-150m 0,6-70m	0,6 - 70m		
%2 yansima (siyah)	0,6- 50m 0,6- 50m 0,6-50m	0,6 - 50m		
MESAFE ÖLÇME GÜRÜLTÜSÜ²				
	@10m @10m gürültü azaltma³ @25m @25m gürültü azaltma³ @10m @10m gürültü azaltma³ @25m @25m gürültü azaltma³			
	mm			
%90 yansima (beyaz)	0,30	0,15	0,30	0,15
%10 yansima (koyu gri)	0,40	0,20	0,50	0,25
%2 yansima (siyah)	1,30	0,65	2,00	1,00
Ölçme hızı (nokta/saniye):	122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000	122.000 / 244.000 / 488.000		
Mesafe ölçme hatası⁴	±1mm	±3mm		
Açısal hassasiyet⁵	dikey/yatay açılar için 19 arcsec	belirtilmemiş		
3D konum hassasiyeti⁶	10m: 2mm / 25m: 3,5mm	belirtilmemiş		
RENK ÜNİTESİ				
Çözünürlük:	165 megapiksel renge kadar			
Yüksek Dinamik Aralık (HDR)	Poz Braketlerle 2x, 3x, 5x			
Paralaks:	Eş eksenli tasarımı asgariye indirgenmiş			
DEFLEKTÖR BİRİMİ				
Görüş alanı (key/ yatay):	300° / 360°			
Adım boyu (dikey/yatay):	0,009° (360°de 40.960 3D piksel) / 0009° (360°de 40.960 3D piksel)			
Azami dikey tarama hızı:	97Hz			
LAZER (OPTİK VERİCİ)				
Lazer sınıfı:	Lazer Sınıf 1			
Dalga boyu:	1550nm			
Işın sapması:	0,3mrad (1/e)			
Çıkıştaki ışın demeti çapı:	2,12mm (1/e)			
VERİLERİN İŞLENMESİ VE KONTROLÜ				
Veri depolama:	SD, SDHC™, SDXC™; 32GB kart			
Tarayıcı kontrolü:	Dokunmatik ekran ve WLAN bağlantısıyla Mobil cihazlarla erişim HTML5			
ARAYÜZ BAĞLANTISI				
WLAN:	802.11n (150Mbit/s), Erişim Noktası veya mevcut ağlarda istemci olarak			
TÜMLEŞİK SENSÖRLER				
Çift eksenli kompensatör:	±2"de geçerli her bir taramanın 19 arcsec doğruluğunda bir seviye ayarlaması yapar			
Yükseklik sensörü:	Elektronik bir barometre vasıtasıyla sabit bir noktaya göre yükseklik tespit edilebilir ve bir taramaya eklenebilir.			
Pusula⁷:	Elektronik pusula taramaya bir konumlandırma sağlar.			
GNSS:	Tümleşik GPS & GLONASS			
Yerinde komparasyon	Mevcut kalite raporunu oluşturur ve cihaz dengelemesini otomatik olarak iyileştirme seçeneği sunar.	-		
Aksesuar Soketi	Aksesuar soketi lazer tarayıcının üzerinde bulunmaktadır ve çok yönlü aksesuarların tarayıcıya bağlanması için kullanılmaktadır.	-		
Gerçek zamanlı, yerinde SCENE kaydı	WLAN aracılığıyla SCENE'ye bağlanır. SCENE'de gerçek zamanlı olarak tarama verisinin işlenmesi, kayıt ve özet harita oluşturulması.	-		
GENEL ÖZELLİKLER				
Güç kaynağı voltajı:	19V (harici besleme), 14,4V (dahili batarya)			
Güç tüketimi:	15W boşta, 25W tarama, 80W şarjda			
Batarya hizmet ömrü:	4,5 saat			
Çalışma sıcaklığı:	-5 - 40°C			
Uzun çalışma sıcaklığı⁸:	-20 - 55°C			
Depolama sıcaklığı:	-10 - 60°C			
Giriş koruma (IP) derecelendirme sınıfı:	IP54			
Nem Direnci:	Yoğuşmasız			
Batarya dahil ağırlık:	4,2kg			
Ebat/Boyutlar:	230 x 183 x 103mm			
Bakım / kalibrasyon:	Yıllık			

CLASS 1
LASER PRODUCT

1 Lambert saçıcı için. 2 Mesafe gürültüsü 122.000 nokta/saniye ölçüm hızı için en uygun düzlemde değerlerin bir standart sapması olarak tanımlanmaktadır. 3 Bir gürültü azaltma algoritması ham verinin ortalamasıyla etkinleştirilebilir. 4

Mesafe hatası yaklaşık 10m ve 25m'de bir sistematik ölçüm hatası olarak tanımlanmaktadır. 5 Yerinde dengeleme gerekli. 6 25m'den büyük mesafeler için 0,1mm/m belirsizlik payı ekleyin. 7 2x150°, homojen nokta aralığı garanti edilmemektedir. 8 Ferromanyetik cisimler yüzünün manyetik alanını bozabilir ve hassas olmayan ölçüme neden olabilmektedir. 9 Düşük sıcaklıkta çalıştırma: tarayıcı dahili sıcaklık 15°C ve üzerindeki sıcaklıklarda çalıştırılmalıdır; yüksek sıcaklıkta çalıştırma: ilave aksesuar gerektirir, talep edildiğinde daha fazla bilgi mevcuttur | Aksi belirtilmedikçe, ısındıktan sonra ve çalışma sıcaklığı aralığında tüm hassasiyet tanımlamaları bir sigma'dır. Önceden bildirimde bulunulmadan değiştirilebilir.



www.faro.com
Freecall 00 800 3276 7253
info.emea@faro.com



Ek-2

Registration Report

Project	Nusret_Lazer
Cluster	Scans
Recording Period	6/24/2021, 10:41:07 AM - 7/8/2021, 1:16:20 PM
Location	
Report Date	5/24/2022, 2:09:53 PM

Color Coding

Point Error	< 8 mm	> 20 mm
Overlap	> 25.0 %	< 10.0 %

Overview

Scan Point Statistics

Maximum Point Error		9.5 mm
Mean Point Error		5.3 mm
Minimum Overlap		6.0 %

Scan Errors

Scan Point Statistics

Cluster/Scan	Connections	Max. Point Error [mm]	Mean Point Error [mm]	Min. Overlap
Scan_119	5	9.5	7.7	42.2 %
Scan_137	6	8.2	5.8	29.5 %
Scan_138	6	8.8	5.8	34.2 %
Scan_139	4	9.3	6.4	33.5 %
Scan_140	3	9.3	6.8	19.7 %
Scan_141	7	7.8	4.5	13.3 %
Scan_142	6	8.4	4.6	24.1 %
Scan_143	6	7.1	4.3	15.4 %
Scan_144	3	4.0	2.6	47.0 %
Scan_145	1	2.1	2.1	32.8 %
Scan_146	6	9.5	5.2	18.2 %
Scan_147	4	5.6	3.8	6.0 %
Scan_148	4	7.5	4.0	15.6 %
Scan_149	7	8.6	5.0	6.0 %
Scan_112	4	8.4	7.0	41.6 %
Scan_113	5	8.6	6.3	29.5 %
Scan_114	5	7.8	5.2	13.3 %
Scan_115	6	8.4	6.2	15.4 %
Scan_116	4	7.1	5.0	57.3 %
Scan_117	5	6.6	5.2	12.7 %
Scan_118	5	7.5	5.8	37.0 %

Detailed Errors

Scan Point Statistics

Cluster/Scan 1	Cluster/Scan 2	Point Error [mm]	Overlap
Scan_119	Scan_118	6.1	72.3 %
Scan_119	Scan_112	6.0	60.4 %
Scan_119	Scan_137	8.2	59.0 %
Scan_119	Scan_146	9.5	47.0 %
Scan_137	Scan_112	7.8	61.1 %
Scan_137	Scan_113	4.4	29.5 %
Scan_137	Scan_146	5.6	37.8 %
Scan_138	Scan_119	8.8	42.2 %
Scan_138	Scan_137	4.2	69.4 %
Scan_138	Scan_112	8.4	41.6 %
Scan_138	Scan_118	5.8	39.1 %
Scan_138	Scan_146	4.5	34.2 %
Scan_138	Scan_139	3.3	38.7 %
Scan_139	Scan_137	4.8	39.4 %
Scan_139	Scan_140	9.3	33.5 %
Scan_139	Scan_113	8.3	48.4 %
Scan_141	Scan_140	3.6	29.8 %
Scan_141	Scan_142	4.0	24.1 %
Scan_141	Scan_144	3.0	52.4 %
Scan_141	Scan_115	5.3	15.4 %
Scan_143	Scan_141	1.8	45.7 %
Scan_143	Scan_142	3.2	74.3 %
Scan_143	Scan_116	7.1	58.3 %
Scan_143	Scan_144	0.9	81.8 %
Scan_143	Scan_115	6.1	15.4 %
Scan_143	Scan_117	6.6	22.9 %
Scan_144	Scan_142	4.0	47.0 %
Scan_146	Scan_145	2.1	32.8 %
Scan_146	Scan_118	3.8	60.7 %
Scan_147	Scan_146	5.6	18.2 %
Scan_147	Scan_148	1.6	33.6 %
Scan_148	Scan_118	7.5	37.0 %
Scan_149	Scan_141	5.9	21.8 %
Scan_149	Scan_142	5.9	48.9 %
Scan_149	Scan_147	2.3	6.0 %

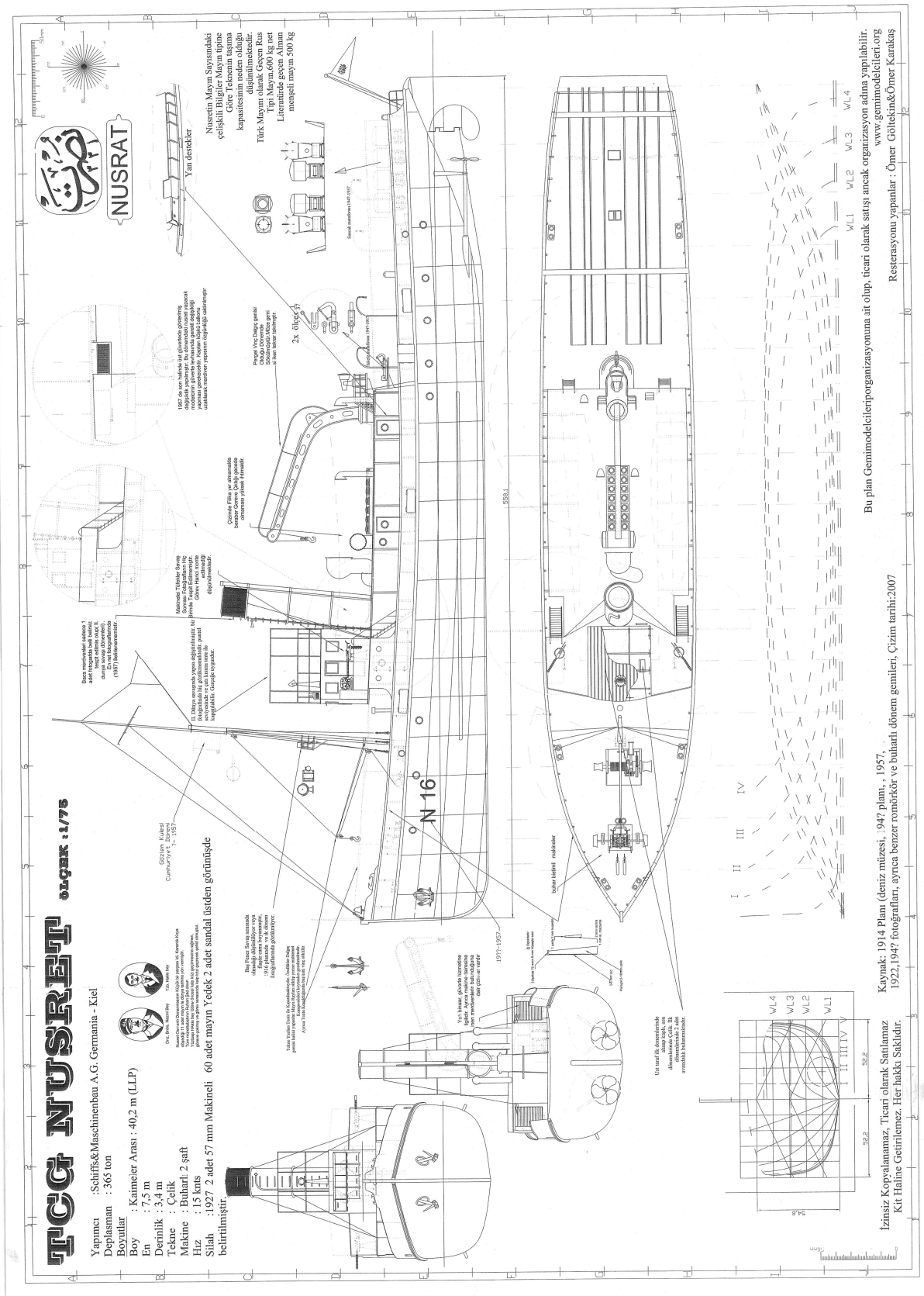
Scan_149	Scan_148	2.0	46.9 %
Scan_149	Scan_114	3.1	59.2 %
Scan_149	Scan_113	8.6	41.1 %
Scan_149	Scan_115	6.9	38.2 %
Scan_113	Scan_112	6.0	71.0 %
Scan_114	Scan_140	7.5	19.7 %
Scan_114	Scan_141	7.8	13.3 %
Scan_114	Scan_113	4.1	63.7 %
Scan_114	Scan_115	3.7	44.4 %
Scan_115	Scan_142	8.4	39.7 %
Scan_115	Scan_116	6.9	57.6 %
Scan_116	Scan_142	2.3	57.3 %
Scan_117	Scan_147	5.5	12.7 %
Scan_117	Scan_148	4.9	15.6 %
Scan_117	Scan_116	3.6	74.6 %
Scan_117	Scan_118	5.6	58.3 %

Inclinometer Mismatches

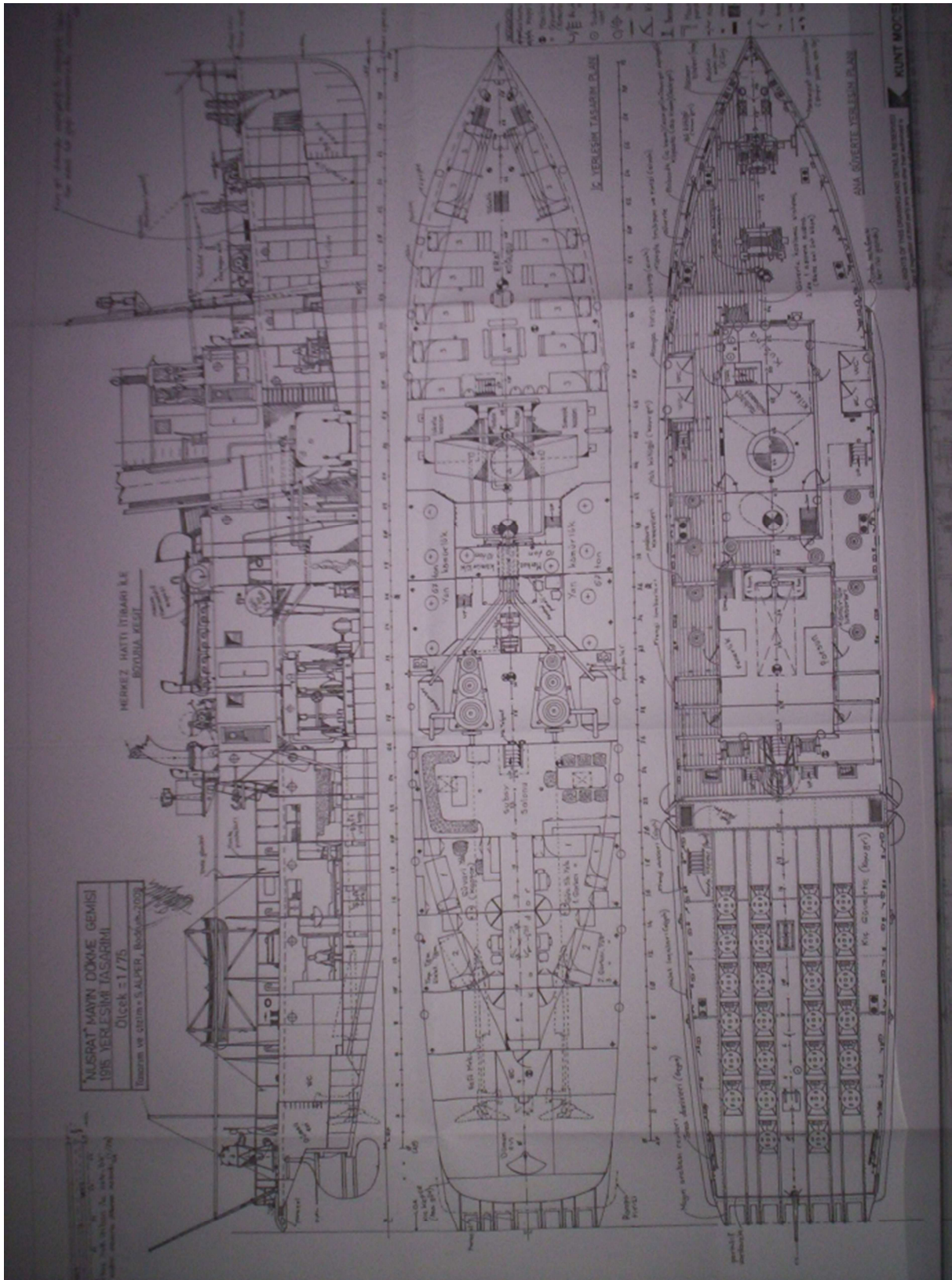
Cluster/Scan	Scan	Mismatch [deg]
Scan_138	Scan_138	0.1506
Scan_149	Scan_149	0.0587
Scan_143	Scan_143	0.0434
Scan_117	Scan_117	0.0374
Scan_114	Scan_114	0.0533
Scan_141	Scan_141	0.0823
Scan_115	Scan_115	0.0363
Scan_139	Scan_139	0.1019
Scan_147	Scan_147	0.0533
Scan_144	Scan_144	0.0419
Scan_119	Scan_119	0.1650
Scan_137	Scan_137	0.0737
Scan_148	Scan_148	0.0525
Scan_116	Scan_116	0.1080
Scan_113	Scan_113	0.0357
Scan_146	Scan_146	0.0370
Scan_118	Scan_118	0.0386
Scan_112	Scan_112	0.0933
Scan_145	Scan_145	0.0432
Scan_142	Scan_142	0.0806
Scan_140	Scan_140	0.0915

Ek-3



Ek-4

Ek-5



Ek-6

