



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## 3B BASKI TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK OTONOM SUALTI ARACI TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

### AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE DESIGN AND PROTOTYPE PRODUCTION USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

**Yazarlar (Authors):** Mevlut Karaçor<sup>ID</sup>, Buğrahan Delioğlu<sup>ID</sup>, Cihan Şahin<sup>ID\*</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karaçor M., Delioğlu B., Şahin C. "3b Baskı Teknolojisi Kullanılarak Otonom Sualtı Aracı Tasarımı Ve Prototip Üretimi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5(3): 663-675, (2021).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1017297

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# 3B BASKI TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK OTONOM SUALTI ARACI TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Mevlut Karaçor<sup>a</sup>, Buğrahan Delioğlu<sup>a</sup>, Cihan Şahin<sup>b</sup>\*

<sup>a</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE  
<sup>b</sup>Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [cihan.sahin@cbu.edu.tr](mailto:cihan.sahin@cbu.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.11.2021; Düzeltme/Revised: 20.11.2021; Kabul/Accepted: 27.12.2021)

## ÖZ

Bu çalışmada 3B baskı teknolojisi kullanılarak otonom sualtı aracı tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Dünyanın büyük bir bölümü denizler ve okyanuslardan oluşmaktadır. Bu gerçeğe rağmen sualtı araştırmaları kara ve hava ile karşılaştırıldığında geriden gelmektedir. Fakat son yıllarda dünyamızda ve ülkemizde sualtı araştırmaları önem kazanmaktadır. Özellikle sualtı maden, petrol ve doğalgaz yataklarına olan ilgiyle bu alandaki eksik daha çok hissedilmekte ve teknolojik çalışmalara ilgi daha da artmaktadır. Bu noktada en önemli ve en fazla ilgiyi sualtı robotları almaktadır. Yapılan bu çalışmada tüm bu ilgi ve ihtiyaç gereksinimleri ışığında, ilgili her alanda kullanılabilecek bir otonom sualtı aracı prototipi gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen otonom sualtı aracı, hidrodinamik, sualtı sabit basınç ve dinamik basınç değişkenleri açısından değerlendirilerek kabiliyet yetenekleri artırılmıştır. Otonom sualtı robotunun kabuk tasarımı sualtında manevra yeteneği yüksek canlılar gözlemlenerek gerçekleştirilmiş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır. Kabuk tasarımı ve imalatının gerçekleştirilmesinin ardından, tahrik sistemi ve elektronik donanımlar tamamlanarak otonom sualtı aracının fiziki yapısı tamamlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Otonom sualtı aracı. 3B baskı. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği.

## AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE DESIGN AND PROTOTYPE PRODUCTION USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

### ABSTRACT

In this study, autonomous underwater vehicle design and application was carried out using 3D printing technology. Most of the world consists of seas and oceans. Despite this fact, underwater research lags behind when compared to land and air. However, in recent years, underwater research has gained importance in our world and in our country. Especially with the interest in underwater mines, oil and natural gas deposits, the deficiency in this area is felt more and the interest in technological studies is increasing. At this point, underwater robots receive the most important and most attention. In this study, in the light of all these interests and needs, an autonomous underwater vehicle prototype that can be used in all relevant fields has been realized. The autonomous underwater vehicle, which was manufactured, was evaluated in terms of hydrodynamic, underwater constant pressure and dynamic pressure variables, and its capability capabilities were increased. The shell design of the autonomous underwater robot was carried out by observing creatures with high maneuverability underwater, and Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were made. After the shell design and manufacturing was completed, the propulsion system and electronic equipment were completed and the physical structure of the autonomous underwater vehicle was completed.

**Keywords:** Autonomous underwater vehicle. 3D printing. Computational Fluid Dynamics.

## 1. GİRİŞ

Dünyamızın dörtte üçü denizler ve okyanuslardan oluşmaktadır. İnsanoğlunun en büyük arzularından biri dünyayı her yönüyle keşfetmektir. Özellikle sular altındaki biyolojik çeşitlilik geçmişten günümüze önemli bir araştırma konusudur. Ayrıca son yıllarda enerji ihtiyacının artması, her türlü maden ve yeraltı enerji kaynaklarının keşfi özellikle de su altında bulunan keşfedilmemiş kaynaklar oldukça önem kazanmıştır. Tüm bunların paralelinde sivil ve askeri alanda sualtı robotlarına olan ilgide geçmişten günümüze katlanarak gelmiştir. Bu amaçlarla ROV (Remotely Operated Underwater Vehicle) olarak da bilinen çeşitli uzaktan kontrollü sualtı araçları kullanılmaktadır [1]. Uzaktan kontrollü sualtı araçları 1960'lı yıllardan bu yana petrol ve doğalgaz gibi yeraltı kaynaklarını arama çalışmalarında önemli bir yere sahiptir [2]. Bu çalışmaların paralelinde son yıllarda yaşanan önemli teknolojik gelişmeler ve büyük teknolojik adımlar her alanda uygulanan dijital dönüşümle kendini göstermektedir. Özellikle dördüncü sanayi devrimi ve Endüstri 4.0 insanoğlunun tüm hayatına bir noktada temas etmektedir. Bu durumun temelinde hiç kuşkusuzdur ki elektronik dünyasında özellikle de sensör teknolojileri ve kontrol tekniklerinde yaşanan gelişmelerdir. Teknoloji firmaları tarafından insansı düşünen robot teknolojileri gelecek hayatımızın her noktasında arzu edilmektedir. Bunun yanında, çevreden aldığı ses, renk ve koku gibi fiziksel bileşenlerin sonucunda karar vererek hareket eden öncü robot teknolojileri de artık insanoğlunun hayatına girmiş bulunmaktadır. Yaşanan bu teknolojik ilerlemeler sualtı araştırmalarında da kendini göstermiştir. Araştırmacılar, sivil ve askeri alanda uzaktan kontrollü sualtı araçlarının yanında, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) olarak da bilinen otonom sualtı araçlarını kullanmaya başlamışlardır. Otonom sualtı aracı ve uzaktan kontrollü sualtı aracı en popüler sualtı robotik araçlar olarak literatürde yerini almaktadır [3]. Otonom sualtı aracı, kaynak arama, çevresel izleme ve okyanus araştırmaları için özel ekipman olarak küçük boyutlu ve kontrol edilebilirliği uygun bir mobil taşıyıcıdır. Uzun süreli navigasyon ve büyük ağırlık taşıma yeteneğine de sahip olabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde askeri, bilim ve ekonomi alanlarının farklı taleplerini karşılamaktadır [4]. Uzaktan kontrollü sualtı araçları ve otonom sualtı araçları'nın kullanım amaçları aynı olsa da teknolojik olarak birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Uzaktan kontrollü sualtı araçları, belirli bir bağlantı kablosu aracılığıyla kullanıcı işlemlerine hızlı (veya gerçek zamanlı) yanıt verme özelliğine sahipken, otonom sualtı araçları nadiren ve hatta insanlarla herhangi bir ara yüz olmadan sahip olduğu otomasyonuna göre işlemlerini icra etmektedir [3]. Diğer bir ifadeyle otonom sualtı araçları, karmaşık, tehlikeli ve zaman alıcı operasyonları tamamlayarak, insanların sualtı ortamındaki çalışmalarının yerini alabilir [5]. Bu nedenle, otonom sualtı araçlarının kontrol sistemleri oldukça kritik bir öneme sahiptir [3]. Çünkü otonom sualtı araçları çok zorlu ortamlarda çalışır ve çevre koşulları çok hızlı değişir, bu nedenle aracın güvenliğini sağlamak için doğru ve güvenilir bir kontrol sistemi tasarlamak oldukça önemlidir. Kontrol sisteminin kendi kendine arıza teşhisini gerçekleştirmek de otonom sualtı araçlarının sahip olduğu zekanın bir sembolüdür [6].

Kontrol, navigasyon, yapay zeka, malzeme bilimi, bilgisayar, sensör ve iletişimde yaşanan gelişmelerle birlikte, otonom sualtı araçları çeşitli sualtı görevleri için oldukça çekici hale gelmiş bulunmaktadır. Fakat yine de bir otonom sualtı aracının tasarımı, geliştirilmesi, navigasyonu ve kontrol süreci karmaşık ve pahalı bir iştir [7]. Otonom sualtı araçlarının özerkliğini artırmaya yardımcı olmak için çeşitli kontrol mimarileri üzerinde çalışılmaktadır. Aynı zamanda çeşitli tasarımlar da otonom sualtı araçları için bir araştırma alanıdır.

Bu çalışmada, daha esnek bir özerkliğe sahip olması istenen bir otonom sualtı aracı için birincil ve temel aşaması olan fiziksel tasarım aşamaları yer almaktadır. Çalışmanın sunumunda, giriş bölümünün ardından ikinci bölümde otonom sualtı araçları için genel ve gerçekleştirilen otonom sualtı aracının fiziksel tasarımı hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölüm tasarım ve montaj aşamalarını içermekte, dördüncü bölümde ise yapılan analizler ve testler yer almaktadır. Son bölümde ise çalışmanın kısa bir özeti ve sonucu verilmiştir.

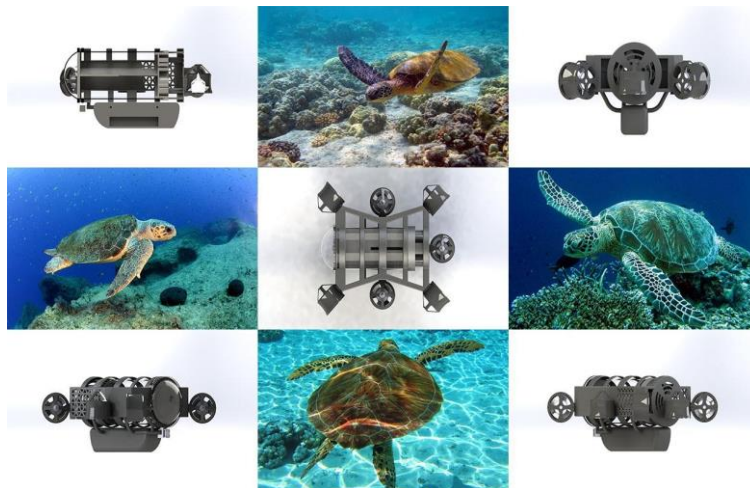
## 2. OTONOM SUALTI ARACI

Son yıllarda, deniz araçları, kara robotları, insansız hava araçları da dahil olmak üzere otonom araçların hareket kontrolü, askeri ve bilimsel alanlardaki geniş uygulamaları nedeniyle giderek artan bir ilgiye sahiptir [8]. Özellikle sualtı araçları, deniz bilimi, denizaltı kurtarma, veri toplama vb. gibi kullanımlar için bir süredir deniz görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Deniz araçlarının kontrol etmenin

ana zorluğu, yetersiz çalıştırma özelliklerinden kaynaklanmaktadır, diğer bir ifadeyle aktüatörlerin sayısının serbestlik derecelerinden (DOF: degrees of freedom) daha az olmasıdır. Deniz araçlarının hareket kontrol senaryosu; yörünge izleme, yol izleme ve filo kontrolünü kapsamaktadır. Özellikle yol izleme, istenen bir yol boyunca geometrik ve dinamik kontrol hedeflerinin ayrılabilmesi anlamına gelmektedir [8]. Bu durum otonom sualtı araçları için de geçerlidir. Birçok askeri ve sivil uygulamada yaygın olarak tercih edilen otonom sualtı araçları genellikle insansızdır ve uzaktan kumandası yoktur, bu nedenle genellikle bir yol planlama problemi olarak ifade edilen görev yerine ulaşmak için güvenli ve zaman kazandıran bir yol bulma yeteneğine sahip olmalıdırlar. Bundan dolayı, bu araçların yol planlama algoritması yoğun ilgi görmektedir [10].

Otonom sualtı araçlarının sahip olduğu dinamikler yüksek oranda doğrusal olmayan bir özelliğe sahiptir. Okyanus akıntıları ve dalgalar gibi ciddi dış etkenler nedeniyle, kendilerine atanan görevleri zorlu ve dinamik ortamlarda gerçekleştirebilirler. Bu nedenlerden dolayı, her daim sağlam ve verimli otonom sualtı aracı kontrol tasarım stratejileri geliştirilmektedir [11,12]. Otonom sualtı araçlarının hareket kontrol sistemini öğrenme ve kendini o anki duruma uyarılma yeteneğine sahip olması gerekmektedir. Hatta bazı özel görevler için sualtı araçlarının kontrol ettikleri yapıya yakın konumlarını hassas bir şekilde korumaları gerebilir [9]. Ayrıca, tek bir otonom sualtı aracı, sınırlı enerjisi nedeniyle karmaşık geniş kapsamlı algılama görevlerini tamamlayamayabilir. Bu nedenle, işbirlikçi çoklu otonom sualtı araçları tam kapsama yöntemini ortaya çıkarmaktadır. Bu durum birden fazla robotun belirli bir işbirlikçi strateji aracılığıyla belirlenmiş alanların tüm kapsamını verimli bir şekilde tamamlamak için entegre bir sistem oluşturması anlamına gelmektedir. Bu yüzden otonom sualtı araçları rota planlaması ve çok araçlı işbirliği kombinasyonuna ihtiyaç duymaktadırlar [13]. Bahsedilen bütün bu özelliklerin bir otonom sualtı aracı tarafından sağlıklı icra edilebilmesi için, kontrol algoritması kadar fiziksel özellikleri de büyük önem arz etmektedir. Doğadan ilham alınarak tasarlanmış bir otonom sualtı aracı, diğer bir ifadeyle Biyomimetik yaklaşımla tasarlanmış olan bir araç her türlü zorlu koşulda kolaylıkla kendini adapte edebilecektir.

Biyomimetik, doğadaki canlıların yapısal ve fonksiyonel özelliklerinin incelenmesi sonucunda, yapılar ve fonksiyonlarının taklit edilerek oluşturulan mekanizma ve sistemlerin tümünü ifade etmektedir [14]. Günümüzde bu yaklaşım, otomobil, uçak, robot hatta mekanik el aletlerinin tasarımında dahi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla tasarımı gerçekleştirilen otonom sualtı aracı için su altında manevra kabiliyeti yüksek canlılar araştırılmıştır. Önerilen araç için Caretta Caretta olarak da bilinen deniz kaplumbağasından ilham alınmıştır. Şekil 1'de gerçekleştirilmiş olan otonom sualtı aracı ve deniz kaplumbağası görselleri görülmektedir.

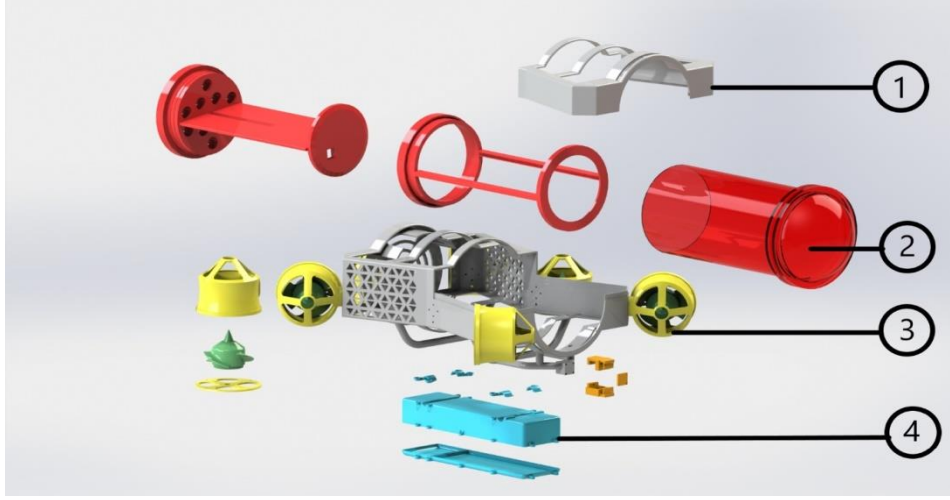


Şekil 1. Deniz kaplumbağası ve önerilen otonom sualtı aracı.

### 3. OTONOM SUALTI ARACI TASARIM AŞAMALARI VE GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER

Tasarımı gerçekleştirilen otonom sualtı aracı temel olarak kabuk (ana gövde), fanus, thruster (itici) ve batarya kutusu olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır. Araç tasarımı yapılırken dikkat edilen en

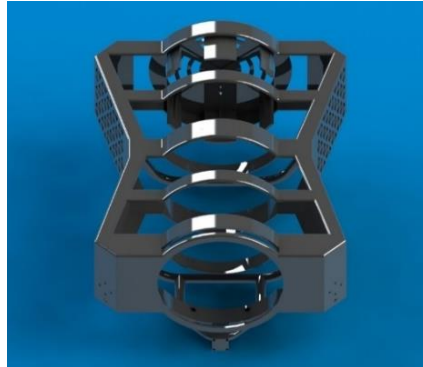
önemli nokta parçaların mümkün olduğunca dayanıklı ve hafif olacak şekilde imalatının gerçekleştirilmesidir. Şekil 2’de prototip otonom sualtı aracının bütün temel parçaları bir arada görülmektedir. Şekil 2’de 1 numara ana gövde kabuk (ana gövde), 2 numara fanus, 3 numara thruster (itici) ve 4 numara batarya kutusunu göstermektedir.



Şekil 2. Prototip otonom sualtı aracı temel parçaları.

### 3.1. Kabuk

Tasarımı gerçekleştirilen otonom sualtı aracı için en önemli parametrelerden biri su altında rahat bir hareket yeteneğine sahip olmasıdır. Bunun içinde aracın en önemli parçası olarak bütün parçaları bir arada tutacak olan kabuk yapısıdır. Şekil 3’de render görseli görülen kabuk tasarımı, deniz kaplumbağalarından örnek alınarak tasarlanmıştır. Kabuk yapısının ön tarafı deniz kaplumbağasının kafa bölgesi olarak kabul edilmiş, aracın dışarıya bakan gözü olarak tasarlanmıştır. Ayrıca aracın elektronik aksamında olası bir arıza durumunda rahat bir şekilde müdahale için kabuk yapısı dış gövde ve kapak olacak şekilde iki parça olarak üretilmiştir. Tüm bunlara ilaveten kabuk tasarımı yapılırken suya karşı direncin minimize edilebilmesi amacıyla açık iskelet sistemi tercih edilmiştir. Şekil 3’de kabuk tasarımının render görseli görülmektedir.



Şekil 3. Kabuk tasarımı render görseli.

Prototipi gerçekleştirilecek olan otonom sualtı aracının ana parçaları 3B üretim tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3B baskı, bilimsel alanda hızla gelişen ve oldukça ilgi duyulan konulardan biridir [15]. Son yıllarda özellikle performans/fiyat ilişkisinin artmasıyla 3B yazıcılar birçok araştırmacı ve girişimcinin ilgisini çekmektedir [16]. 3B üretim, bilgisayar destekli tasarım programlarında oluşturulmuş elektronik verinin bir yazıcı yardımıyla fiziksel olarak üretilmesidir [17]. Bu sayede fiziksel parçalar geleneksel yöntemlerdeki üretim sınırlamaları olmaksızın tek aşamada imal edilebilmektedir [18]. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır [19].

Aracın iskelet yapısı olan kabuk üretimi için HP JET FUSION 3D 4210 Printer kullanılmıştır. Jet Fusion teknolojisi, parça üretimi esnasında toz halde bulunan poliamid malzemenin katmanlar halinde tablaya serilmesini, ardından üzerine “agent” olarak adlandırılan katkı maddesinin damlatılmasını ve son olarak da ısı veren lambalar yardımıyla bu tozları birleştiren teknolojik bir yöntem kullanılmaktadır. Burada damlatılan agent adlı malzeme sayesinde bölgedeki tozlar ısı altında birbiriyle bağlanmakta ve katılaşmaktadır. Bu katılaşma sonucunda elde edilmek istenen parça üretimi gerçekleştirilmektedir. İskelet yapısı oluşturulurken “HP 3D High Reusability PA 12” saf malzemesi kullanılmıştır. Çizelge 1’de kullanılan PA12 saf malzemesine ait genel teknik özellikler verilmekte, Şekil 4’de ise üretimi gerçekleştirilen kabuk yapısı görülmektedir.

**Çizelge 1.** PA12 saf malzemesine ait teknik özellikler.

Ölçüm	Değer
Toz erime noktası	187°C/369°F
Parçacık boyutu	60 µm
Tozun toplu yoğunluğu	0.425 g/cm <sup>3</sup>
Parçaların yoğunluğu	1.01 g/cm <sup>3</sup>
Gerilme direnci, mak. yük, XY	48 MPa/6960 psi
Gerilme direnci, mak. yük, Z	48 MPa/6960 ps
Bükülme mukavemeti (@ 5%), XY	65 MPa/9425 psi
Bükülme mukavemeti (@ 5%), Z	70 MPa/10150 psi
Isı sapma sıcaklığı (@ 0.45 MPa, 66 psi), XY	175°C/347°F
Isı sapma sıcaklığı (@ 0.45 MPa, 66 psi), Z	175°C/347°F



**Şekil 4.** Otonom sualtı aracı kabuk yapısı.

### 3.2. Fanus

Fanus bölümü, pleksiglas malzeme kullanılarak kubbe bölümü ve düz silindir olmak üzere iki parça şeklinde üretilmiştir. Fanus bölümü elektronik kartların, sensörlerin ve kameranın korunması için kullanılmaktadır. Bu bölüm aracın gözü konumundadır. Fanus üretimi için belirlenen ölçülerde pleksiglas bloklar şekillendirilebilmek için öncelikle ısıtılmaktadır. Isıtılan pleksiglas blok belirlenmiş olan çapta yuvarlanarak içi boş silindir şeklini almaktadır. Böylece fanus’un düz silindir parçası elde edilmektedir. Kubbe bölümü için pleksiglas blok vakum bölmesi içerisine yerleştirilerek, makine tarafından vakumlanarak belirlenen çapta kubbe oluşturulmaktadır. Elde edilen kubbe ve silindir birbirine kaynaklanarak aracın fanus bölmesi elde edilmektedir. Şekil 5’de fanus üretimi, fanus render görseli ve fanus’un ana gövde içerisine montajı görülmektedir.



Şekil 5. Fanus render görseli ve fanus montajı.

### 3.3. Thruster

Thruster'lar otonom sualtı aracının hareketini sağlayacak olan temel parçalardır. Tasarımı gerçekleştirilen araç üzerinde toplam yedi adet thruster bulunmaktadır. Deniz kaplumbağalarının suda hareketini sağlayan ve kürek görevi gören dört adet bacağı bulunmaktadır. Otonom sualtı aracında kullanılan dört thruster bu dört bacağı temsil etmektedir. Ek olarak kullanılan üç thruster aracın dikey hareketi ve dengesi için kullanılmaktadır. Thruster'ların montajı aracın ağırlık merkezi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

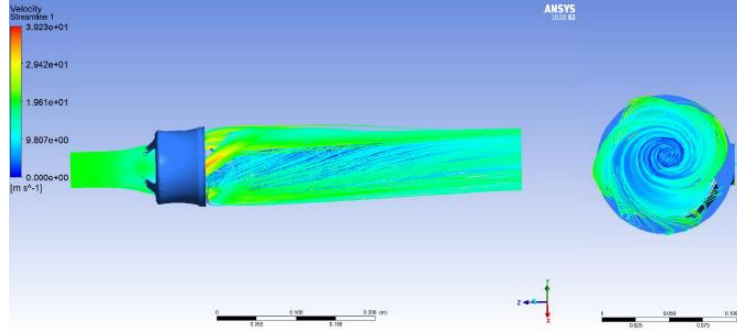
Thruster; gövde, kapak ve motor pervanesi olmak üzere üç parçalı olarak dizayn edilmiştir. Thruster gövde tasarımında, su akışına yardımcı olabilmesi için su girişi konik şekilde tasarlanmıştır. Üç, beş ve yedi bıçak olarak tasarlanan motor pervanelerinin analiz programında yapılan kavitasyon testleri sonucunda motor pervaneleri üç bıçaklı olarak tercih edilmiştir. Thruster'ların üretimi PLA (Polilaktik Asit) filament kullanılarak 3B yazıcı da gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PLA filament malzemenin özellikleri ve parça üretiminde tercih edilen yazıcı parametre değerleri çizelge 2'de verilmektedir. Ayrıca şekil 6'da Thruster parça görseli, şekil 7'de ise kavitasyon analiz görseli görülmektedir.

Çizelge 2. Filament ve yazıcı parametre değerleri.

PLA filament özellikleri		Yazıcı parametre değerleri	
Basım sıcaklığı	205-225 °C	Nozzle sıcaklığı	210 °C
Tabla sıcaklığı	60-80 °C	Tabla sıcaklığı	60 °C
Gerilme direnci	65 Mpa	Malzeme doluluk oranı	%50
Bükülme direnci	75 Mpa	Desteklerin doluluk oranı	%25

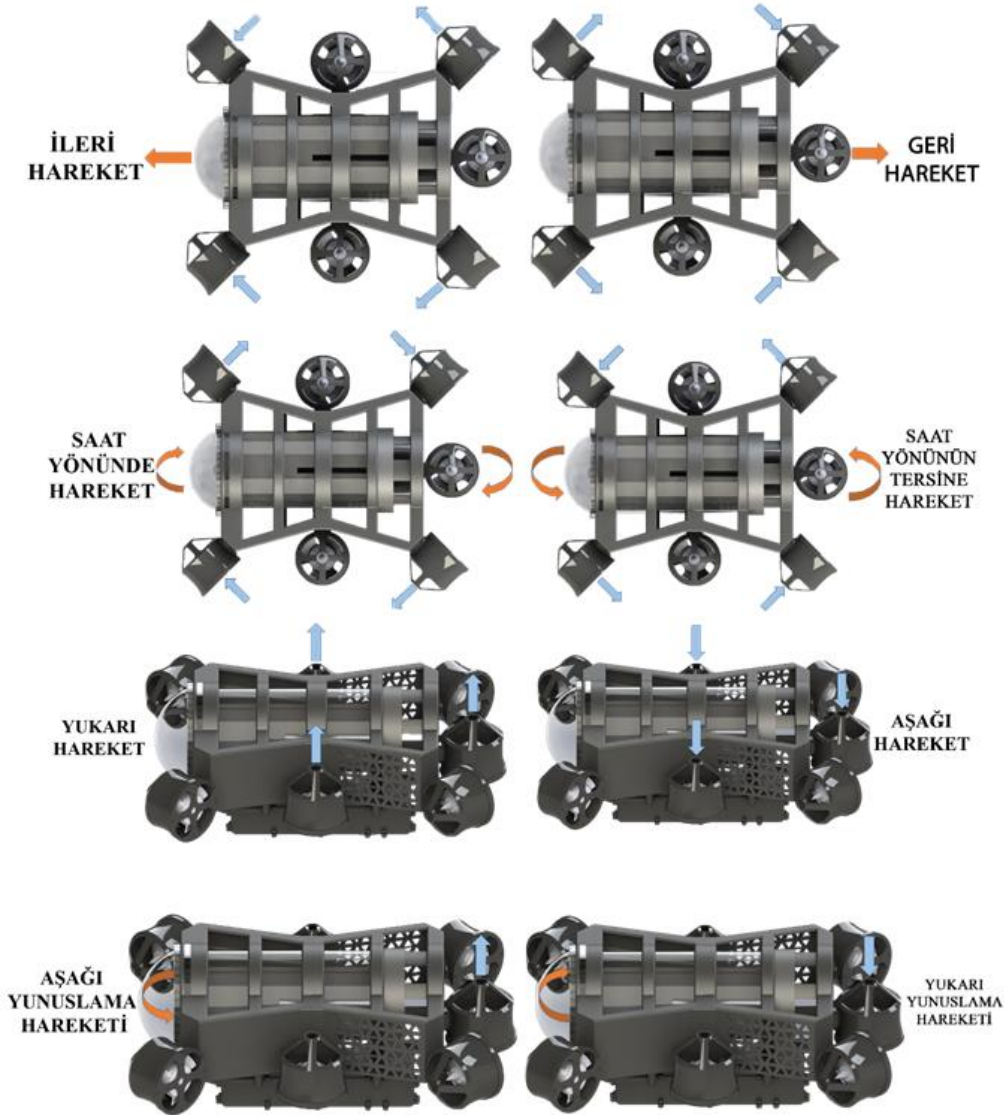


Şekil 6. Thruster parçaları.



Şekil 7. Kavitezyon analizi.

Tasarımı gerçekleştirilen otonom sualtı aracında thruster'ların dört adeti araç üzerine konumlandırılırken ileri, geri, sağ ve sol hareketlerini rahatça yapabilmesi amacıyla  $45^{\circ}$  açılarla yatay olarak montajlanmıştır. Dalma ve yükselme hareketleri için de aracın sağına ve soluna birer adet thruster dikey olarak konumlandırılmıştır. Son olarak yunuslama hareketi için aracın arkasına bir adet olmak üzere toplam yedi adet thruster montajı tamamlanmıştır. Şekil 8'de otonom sualtı aracının hareket kabiliyeti görülmektedir.



Şekil 8. Otonom sualtı aracı hareket kabiliyeti.



### 3.4. Batarya kutusu

Batarya kutusunun dış iskeletin ayak kısmına montajlanmıştır. Bu sayede aşırı ısınma veya patlamalar sonucunda fanusun iç kısmında bulunan elektronik bağlantıların ve kartların zarar görmesi engellenmiştir. Batarya kutusu imalatı içinde PLA filament tercih edilmiştir.

Prototip otonom sualtı aracının parça üretiminde 3B teknolojisi kullanılmış, üretilen parçaların birbiriyle montajı manuel olarak yapılmıştır. Araç arka kapak üzerinde konnektör bağlantıları için gravür ve matkap kullanılmıştır. Fanus ve iç iskeleti birleştirmek, giriş/çıkış yapan kabloların yalıtımı için de epoksi uygulama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elektronik kartların yerleştirileceği tabla parçası ayrı olarak üretilmiş arka kapak parçasına plastik kaynak uygulamasıyla monte edilmiştir. Şekil 9'da montaj fotoğrafları görülmektedir.



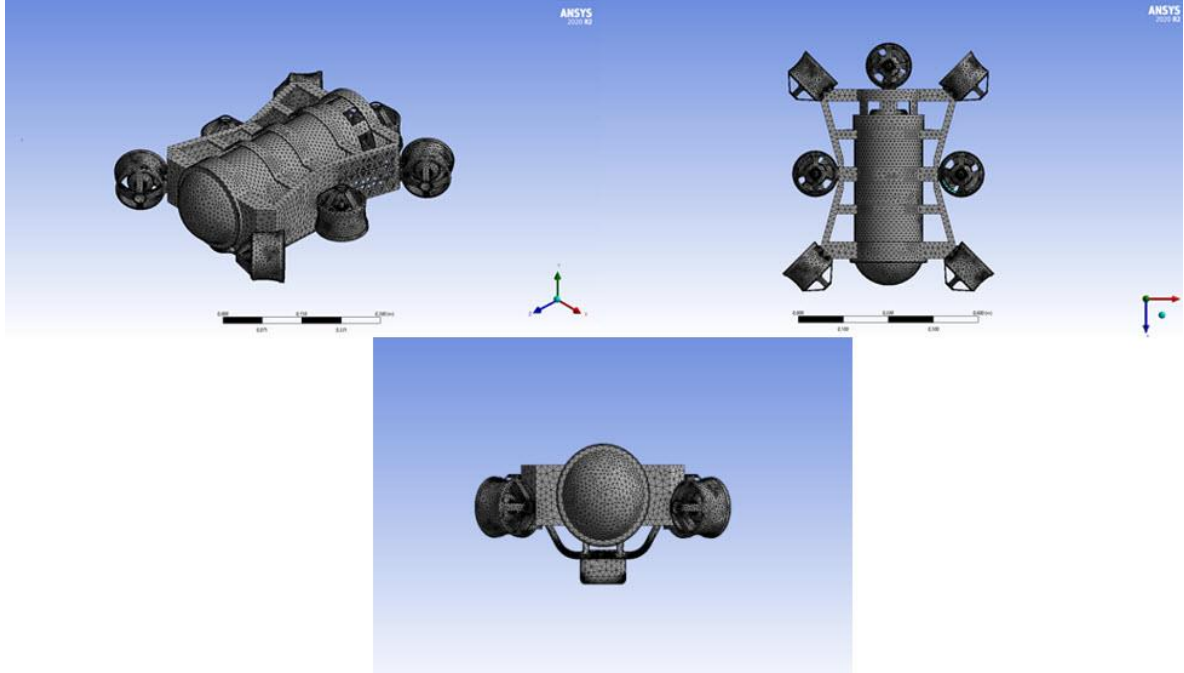
Şekil 9. Montaj fotoğrafları.

## 4. GERÇEKLEŞTİRİLEN ANALİZLER VE PROTOTİP OTONOM SUALTI ARACI

Prototip olarak üretimi gerçekleştirilen otonom sualtı aracının çalışma şartlarında nasıl bir karakteristik yapıya sahip olduğu hakkında bilgi sahibi olabilmek amacıyla ilgili HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD, bilgisayar tabanlı simülasyonlar sayesinde akışkan akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar içeren sistemlerin analizlerinde kullanılmaktadır [20]. Diğer bir ifadeyle HAD; ısı, akış ve kütle transferi problemlerinin çözümlendiği bir analiz yöntemidir [21]. Akışkanın hareketini ifade eden diferansiyel denklemlerin çözümlenmesinde kullanılmakta, çeşitli sayısal yöntemleri kullanarak akış fiziğinin anlaşılmasını sağlamaktadır [21,22]. Özellikle deneysel çalışmalarda gerilme, basınç, hız ve sıcaklık dağılımları hakkında ayrıntıları elde etmek için deney sayısını düşürerek tasarım sürecinin minimize edilmesine katkıda bulunmaktadır [21]. Geçmişte sadece uzay ve havacılık alanında yüksek mühendislik uygulamalarında kullanılan HAD, günümüzde modern mühendislikte karmaşık problemlerin çözümünde yaygın olarak tercih edilmektedir [23]. HAD analizinde, akışın statik veya dinamik durumunun tanımlanarak çözümlenmesi yapıldığı hacme hesaplama hacmi veya akış hacmi denmektedir [23].

Genel olarak her türlü akışkan ve akışın değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntem olan HAD analizleri temel olarak süreklilik, momentum ve enerji olmak üzere üç ana denklemi esas alınmaktadır. Bu denklemler sayısal çözümlere akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve de bunlarla ilgili çeşitli verilere ulaşmaktadır [24,25]. HAD hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken önemli husus, HAD yöntemlerinin yaklaşık bir hesap yaparak tam kesinlikle çözümler oluşturmadıklarıdır [25].

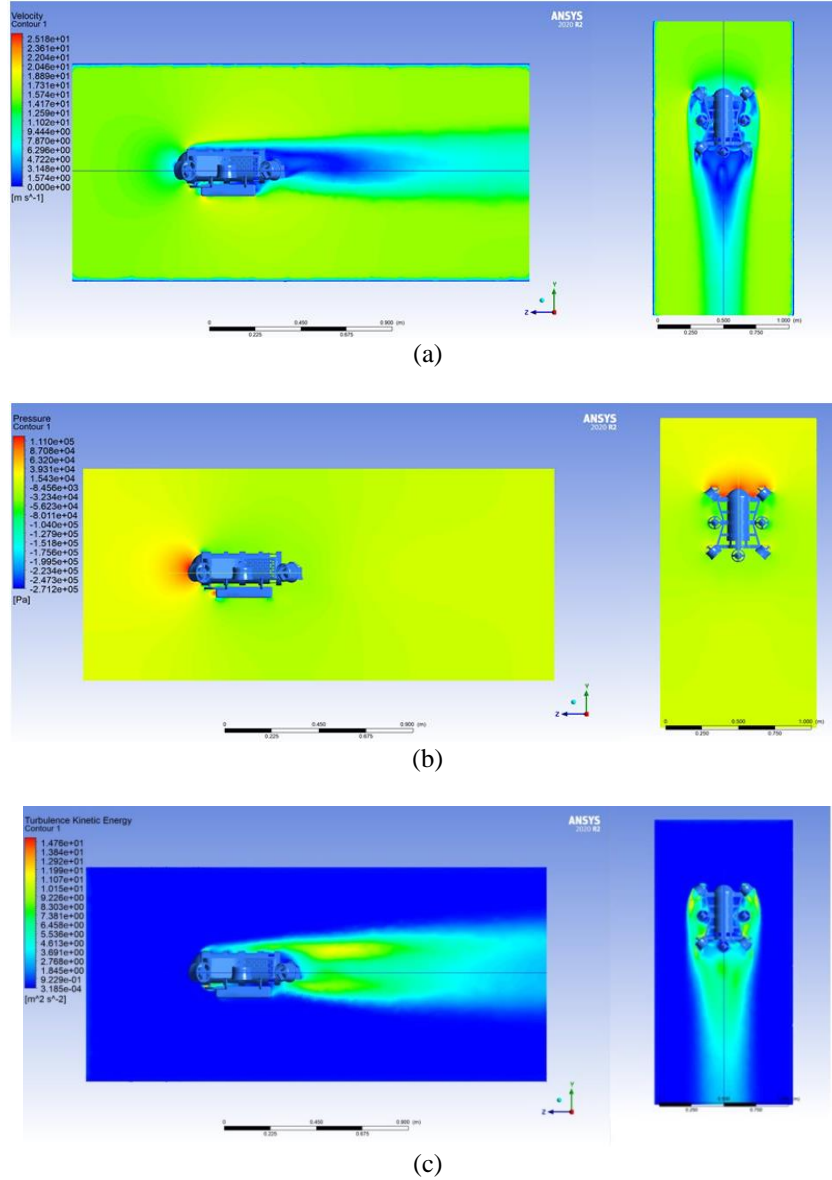
Prototipi gerçekleştirilen otonom sualtı aracı hız, basınç, türbülans ve viskozite gibi testlerden geçirilmiştir. Aracın hareketinde oluşan direnç noktaları ve arkasında oluşan türbülans girdapları incelenerek hareket karakteristiği çıkarılmıştır. Gerçekleştirilen analizler de akış hızı 3 m/s olarak alınmıştır. Ayrıca analizler 2000 iterasyon alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da aracın mesh yapısı ve çizelge 3'de analiz parametre değerleri görülmektedir. Şekil 11-a'da ise iki farklı açıdan hız analiz görselleri, Şekil 11-b'de iki farklı açıdan basınç analiz görselleri, Şekil 11-c'de iki farklı açıdan türbülans analiz görselleri ve de Şekil 11-d'de iki farklı açıdan viskozite analiz görselleri görülmektedir.



Şekil 10. Otonom sualtı aracı mesh görselleri.

Çizelge 3. Analiz parametre değerleri.

Özellik	Kullanılan geometri ayarı
Uyarlanabilir boyutları kullanma	Evet
Çözünürlük	6
Sınırlayıcı kutu diyagonal	2,2595 m
Ortalama yüzey alanı	2,237e-003 m <sup>2</sup>
Minimum kenar uzunluğu	3,8074e-006 m
Mesh kalitesinin kontrol edilmesi	Evet, Hatalar
Yumuşatma	Yüksek
Mesh Metric	Hiçbiri
Geçiş oranı	0,272
Maksimum katmanlar	5
Büyüme oranı	1,2
Topoloji kontrolü	Evet
Düğümler	1495295
Elementler	8350332



Şekil 11. Otonom sualtı aracı analiz görselleri a) hız, b) basınç, c) türbülans.

Gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar aracın dinamik tasarımı hakkında bilgiler vermesinin yanında bir sonraki aşaması olan kontrol ve denetim aşaması için de temel olmaktadır. Otonom sualtı aracı, su ortamının özelliklerinden dolayı hareketleri sırasında doğrusal olmayan etkilere maruz kalmaktadır. Elde edilen analiz sonuçları, bizlere tasarım ve kontrol noktasında yardımcı olmaktadır. Şekil 11-a hız analizi incelendiğinde araç sabit durmakta, thruster'lar kapalı ve akışkan hız tanımlaması yapılmıştır. Akışkan hızı aracın temas noktalarında düşmekte özellikle de arka bölgede sıfıra kadar düştüğü görülmektedir. Buradan aracın hareket halinde en çok fiziksel kuvvete maruz kaldığı noktalar belirlenebilir ve o noktalarda iyileştirme çalışmaları yapılabilir. Aracın kafa olarak adlandırabileceğimiz ön bölgesinde ve alt bölgede bulunan batarya kutusunun ön yüzeyinde akışkan hızının oldukça düştüğü, fakat batarya kutusu ve kafa kısmının köşelerinde hızın yüksek olduğu görülmektedir. Bu verilerden ileriki tasarım aşamalarında kafa ve batarya yapısı üzerinde farklı geometrik yapılar ve optimizasyonların denenebileceği ifade edilebilir. Şekil 11-b'de görülen basınç analizinde, yüksek basıncın aracın kafa bölgesinde ve batarya kutusunun ön yüzeyinde olduğu net olarak görülmektedir. Hareket halindeki aracın üzerine uygulanan basıncın en yüksek o bölgelerde olması, araç tasarımının doğruluğunu, ayrıca sonraki aşamalarda araç performansını arttırmak için o bölgelerdeki malzeme mukavemetinin artırılarak geometrik optimizasyonlar üzerine çalışılabileceğini de ifade etmektedir.

Şekil 11-c'de ise türbülans analizi incelendiğinde türbülansın aracın arkasında dağılmadan sönmülenererek oluştuğu net olarak görülmektedir. Hareketli araçlar etrafında oluşan türbülanslardan olumsuz etkilenerek belirlenen rotadan sapabilmektedir. Bu durum başka etmenlerden oluşan türbülanslardan oluşabileceği gibi, kendi yarattıkları türbülanslardan da oluşabilmektedir. Tasarlanan otonom sualtı aracı için istenen durum, oluşabilecek türbülansların aracın arkasından sönmülenererek oluşmasıdır. Yapılan analiz sonucunda istenen bu durumun oluştuğu net olarak görülmektedir.

Üretimi gerçekleştirilen prototip otonom sualtı aracının, sualtı testlerine geçilmeden önce bazı ön test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar; sızdırmazlık, elektronik, yazılım, hareket kabiliyeti, fanus içi buğu ve motor titreşim-sonar etkileşim testidir. Sızdırmazlık testi batarya kutusu ve fanus için gerçekleştirilmiştir. Bu sayede batarya ve elektronik kart yuvalarının sızdırmazlığı sağlanmıştır. Elektronik testi; elektronik kartların çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Yazılım testi, alınan verilerin doğru işlenip işlenmediği hakkında bilgiler vermiştir. Hareket kabiliyeti testi, tanımlanan hareketleri esnek olarak yerine getirip getirmediği test edilmiştir. Fanus içi buğu testi sayesinde, fanusta bulunan elektronik komponentlerin ısınması sonucu fanus içinde bulunan havadaki nemin içeride buğu oluşturup oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Oluşan buğunun önlenmesi amacıyla fanus içerisine nem emici paketler yerleştirilmiştir. Motor titreşim-sonar testi, araç su altında aktif olarak çalışırken oluşan titreşimlerin sonar'a etki edip etmediği test edilmiştir. Şekil 12'de prototipi tamamlanan ve testleri gerçekleştirilen prototip otonom sualtı aracına ait fotoğraflar görülmektedir.



Şekil 12. Prototip otonom sualtı aracı.

## 5. SONUÇ

Son yıllarda dijitalleşmenin yaşamımızın her noktasına yaptığı etki gözle görülür bir şekilde kendini belli etmektedir. Dijitalleşmenin ana kollarından biride 3B baskı teknolojileridir. Sağlık, askeri ve sivil birçok uygulamada kullanıcılara büyük kolaylık sağlamaktadır. Sağlık sektöründe diş tedavilerinde kullanılan prototiplerden, yapay organ imalatına kadar birçok noktada farklı ihtiyaçlara cevap vermektedir. Benzer şekilde sanayi sektöründe çeşitli parçaların imalatında da tercih edilmektedir. Son yıllarda performans/fiyat ilişkisinin artmasıyla 3B baskı teknolojilerine olan ilgide artmaktadır. Bunların paralelinde sualtı araştırmalarına olan ilgide gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yeraltı kaynaklarının tespitinde, deniz ve okyanusların dip bölgeleri hakkında bilgi sahibi olmak önemli bir çalışma alanıdır. Bu çalışmada hem 3B baskı teknolojisini, hem de sualtı araçlarının önemini belirtmek için prototip otonom sualtı aracı imal edilmiştir. Üretim esnasında 3B baskı teknolojileri kullanılarak iki farklı 3B yazıcı kullanılmıştır. Bunlar klasik 3B yazıcı ve "fusion" teknolojisine sahip HP JET FUSION 3D 4210 yazıcıdır. Klasik 3B yazıcılar, PLA maddesini ısıtarak sıvı hale getirilip tabla üzerinde katmanlar oluşturmaktadır. Tabla ve kafa kısmının yapmış olduğu mekaniksel hareketler sayesinde üst üste gelen katmanlar nesnelere oluşmasını sağlamaktadır. Bu teknoloji büyük parçaların üretiminde yeterli olmamaktadır. Özellikle üretilecek nesnenin tablaya sığmama durumu büyük bir problem olarak kullanıcıların karşısına çıkmaktadır. Bu noktada yaşanan sıkıntılar yeni nesil fusion yazıcılarla rahat bir

şekilde aşılmaktadır. Bu teknolojiler filament kullanımı noktasında da birbirinden ayrılmaktadır. Kullanılan fusion teknolojisine sahip HP JET FUSION 3D 4210 yazıcıda klasik yazıcılardan farklı olarak toz filament kullanılmaktadır. Toz filament kullanan 3B yazıcılar katman oluşumu sırasında lazer aracılığıyla her kesiti ayrı ayrı sinterleme yaparak üretebildiği gibi, agent olarak adlandırılan katkı maddesi ekleyerek ve ardından ısıtarak toz zerreciklerinin birbirine yapışmasını sağlayarak da gerçekleştirebilmektedir. Çalışmada kullanılan yazıcı, agent katkı maddesi kullanarak yüksek kaliteli parçalar üretmektedir. Agent katkı maddesi, maruz bırakıldığı ısıyla toz zerreciklerinin birbirine yapışmasını sağlamaktadır.

Çalışmada son olarak da aracın elektronik donanım alt yapısı bitirilerek ileriki çalışmalar için otonom sualtı aracı elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında eğitim amaçlı olarak kullanılacak otonom sualtı aracı sayesinde öğrenciler, 3B baskı teknolojilerinin kullanılma alanları hakkında bilgiler edinerek, otonom robotlar ve dijitalleşme alanında kendilerini geliştirme şansına sahip olacaklardır. Çalışmanın ileriki aşamaları, aracın yazılım altyapısını geliştirerek bulanıklık, dalga vb. zor koşullarda daha esnek ve sürü şeklinde çalışmalarını sağlamak olarak planlanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2021-059 numaralı genel araştırma projesi ve 2018-162 numaralı alt yapı projesi tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Albayrak, F., “İnsansız bir sualtı keşif aracının sistemlerinin incelenmesi ve matematiksel modelinin oluşturulması”, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Sayfa 1-2, 2019.
2. Üney, E., “İnsansız sualtı aracının matematiksel modelinin durum ölçümlerine dayalı olarak tanılanması ve hata toleranslı kontrol”, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Sayfa 17, 2012.
3. Li, J.H., Lee, P. M., Hong, S. W. and Lee, S. J., “Stable nonlinear adaptive controller for an autonomous underwater vehicle using neural networks”, International Journal of Systems Science, Vol. 38, Issue 4, Pages 327-337, 2007.
4. Zhao, J., “Neural network predictive control for autonomous underwater vehicle with input delay”, Journal of Control Science and Engineering, Vol. 2018, 2018.
5. Chen, M., Zhu, D., “A workload balanced algorithm for task assignment and path planning of inhomogeneous autonomous underwater vehicle system”, IEEE Trans. Cogn. Develop. Syst., Vol. 11, Issue 4, Pages 483-493, 2018.
6. Wang, J., Wan, L., Jiang, C., Sun, Y., He, B. and Li, J., “Wavelet neural network applied to fault diagnosis of underwater vehicle”, 30th Chinese Control Conference, Pages 4301-4306, Yantai, China, 2011.
7. García-Córdova, F., Guerrero-González, A., “A biologically inspired neural network for autonomous underwater vehicles”, International Work-Conference on Artificial Neural Networks, Pages 166-173, Santander, 2011.
8. Peng, Z., Wang, J., “Output-feedback path-following control of autonomous underwater vehicles based on an extended state observer and projection neural networks”, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Syst., Vol. 48, Issue 4, Pages 535-544, 2017.
9. Xia, G., Pang, C., Xue, J., “Fuzzy neural network-based robust adaptive control for dynamic positioning of underwater vehicles with input dead-zone”, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Vol. 29, Issue 6, Pages 2585-2595, 2015.
10. Chen, M., Zhu, D., “Optimal Time-consuming path planning for autonomous underwater vehicles based on a dynamic neural network model in ocean current environments”, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 69, Issue 12, Pages 14401-14412, 2020.

11. Ansari, U., Bajodah, A.H., “Autonomous underwater vehicles attitude control using neuro-adaptive generalized dynamic inversion”, IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, Issue 29, Pages 103-109, 2019.
12. Forouzentabar, A., Gholami, B., Azadi, M., “Adaptive neural network control of autonomous underwater vehicles”, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 6, Issue 7, Pages 866-871, 2012.
13. Sun, B., Zhu, D., Tian, C., Luo, C., “Complete coverage autonomous underwater vehicles path planning based on gladius bio-inspired neural network algorithm for discrete and centralized programming”, IEEE Trans. Cogn. Develop. Syst. Vol. 11, Issue 1, Pages 73-84, 2018.
14. Gelen, G., Özcan, S., “İnsan-robot etkileşiminin biyomimetik yaklaşımla sağlanması”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, Sayfa 188-198, 2019.
15. Selvi, Ö., Totuk, O.H., Mıstıkoğlu, S., Arslan, O., “Strengthening effect of flooding in 3D printed porous soft robotics scaffolds”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 293-301, 2021.
16. Saraç, M.F., “In-situ synthesis of 3D-printed magnetic nanoparticles embedded photopolymers”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 164-170, 2021.
17. Yuran, A.F., Asaroğlu, H., Çakmak, S., “Salgın döneminde 3B yazıcılar ile yüz koruyucu üretimi üzerine değerlendirmeler”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 4, Sayı 3, Sayfa 204-215, 2020.
18. Başçı, Ü.G., Yamanoglu, R., “Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 5, Sayı 2, Sayfa 339-352, 2021.
19. Demiröz, Ö.B., Dilibal, S., “Termoelektrik modüller için doğrudan metal lazer sinterleme eklemeli imalat yöntemi kullanılarak alüminyum alaşımı soğutucu tasarımı ve üretimi”, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, Cilt 5, Sayı 1, Sayfa 23-33, 2021.
20. Süfer, Ö., Kumcuoğlu, S., Tavman, Ş., “Gıda mühendisliğinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları”, Akademik Gıda, Cilt 14, Sayı 4, Sayfa 465-47, 2016.
21. Sözen, A., Çiftçi, E., “Isı tekerleği performansının hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile belirlenmesi”, Politeknik Dergisi, Cilt 19, Sayı 4, Sayfa 547-554, 2016.
22. Türk, S., “Transonik hızda kavite akışına maruz kalan mühimmat ayrılmasının HAD analizi”, Doktora tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Sayfa 26, 2021.
23. Aydın, A., “Yağlı tip bir vidalı kompresörün tasarım optimizasyonu ve HAD analizi”, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Sayfa 63, 2021.
24. Akbulut, C., “Düşük Hızlı Düşey Milli Mekanik Yüzey Havalandırıcının HAD Analizi”, Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Sayfa 76, 2010.
25. Ulu, B., “Torpidolarda step uygulamalarının performansa etkileri : 3-b HAD analizi”, Yüksek lisans tezi, Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Sayfa 11-12, 2015.