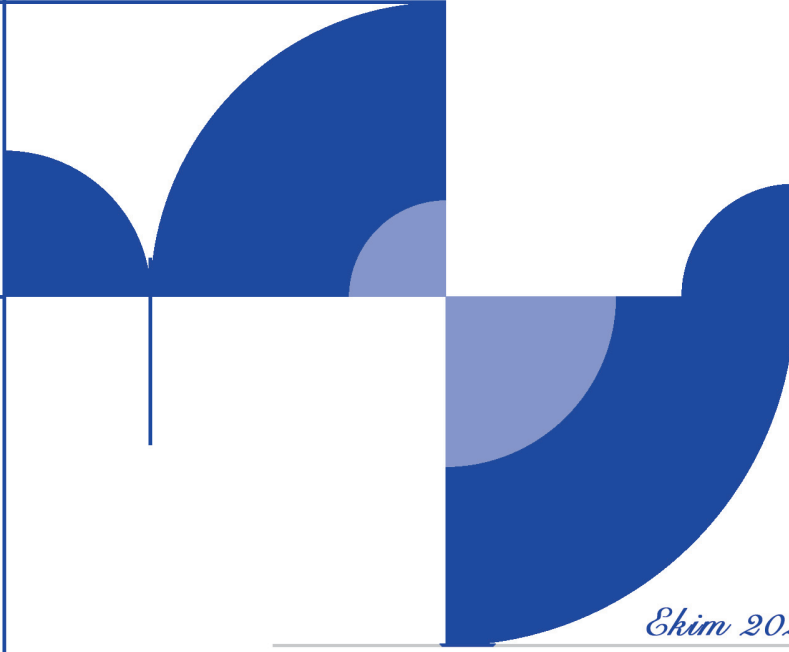




MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMA VE DEĞERLENDİRMELER

EDİTÖRLER

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP

PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2024

ISBN • 978-625-6172-11-1

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI ÇALIŞMA VE DEĞERLENDİRMELER

Ekim 2024

Editörler

PROF. DR. COŞKUN ÖZALP
PROF. DR. SELAHATTİN BARDAK

İçindekiler

Bölüm 1

YÜZEN GÜNEŞ PANELLERİ: GELECEĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ ÇÖZÜMÜ

Gülşah ÇAKMAK 1

Bölüm 2

SPİRAL KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİ, KAREKTERİZASYONU, KALİTE KONTROL VE KAPLAMA İŞLEMLERİ

Levent Cenk KUMRUOĞLU..... 13

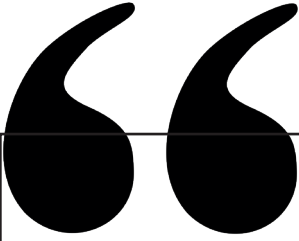
Nurullah AYDIN..... 13

Bölüm 3

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK QUADCOPTER KOLUNUN TASARIM VE ANALİZİ

Funda KAHRAMAN 25

Mehmet KÜÇÜK..... 25



Bölüm 1

YÜZEN GÜNEŞ PANELLERİ: GELECEĞİN SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ ÇÖZÜMÜ

Gülşah ÇAKMAK¹

¹ Doç. Dr.; Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü. gulcakmak@firat.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-6809-2421

GİRİŞ

Son yıllarda, küresel düzeyde yenilenebilir enerji kaynakları büyük bir ivme kazanmaktadır. Bu kaynakların içinde güneş enerjisi geniş yaygınlığı ve sürdürülebilirliği sayesinde en umut verici enerji alternatifleri arasında yer almaktadır. Güneş enerjisi, dünya genelinde geniş bir şekilde bulunabilir ve erişilebilirdir. Fotovoltaik (PV) sistemler aracılığıyla güneş enerjisinin kullanımı ise en yaygın uygulamadır ve bu sistemler, yenilenebilir enerji sektöründe etkin, çevre dostu ve sürdürülebilir ürünlerdir. Güneş PV kurulumları, genellikle yoğun arazi gereksinimiyle ilişkilendirilse de, mevcut su kütlelerinin kullanımı arazi tasarrufu sağlayabilir ve enerji üretim maliyetlerini düşürebilir. Bu nedenle, su üzerinde kurulan güneş enerjisi projeleri, ekonomik açıdan mantıklı bir seçenek olarak değerlendirilebilir. Fotovoltaik enerji üretimi, uzun süreli kullanımda %15'in altında bir verimlilik sağlayabilirken, yüzen güneş sistemleri suyun soğutma etkisi sayesinde karasal ve çatı üstü sistemlere kıyasla daha yüksek elektrik üretebilir ve aynı zamanda suyu gölgeleyerek rezervuar buharlaşmasını ve yosun büyümesini azaltabilir (Alam ve Ohgaki, 2001; Ferrer-Gisbert vd., 2013).

Yüzen PV Sistemi Kavramı

21. yüzyıl, enerji sektörünün yeniden geliştirilmesi yönünde bir değişime şahit olmuştur ve bu, daha fazla yenilenebilir enerji teknolojisinin kullanılması amaçlamaktadır. Biomass, güneş ve diğer yenilenebilir enerji teknolojileri için geniş alanlar gerekmektedir olup, bu da tarımsal amaçlar için arazi kullanımını kısıtlamaktadır. Bu durum, enerji ve gıda üretimi için arazi kullanımı tartışmalarını ortaya çıkarmış (Sliz-Szkliniarz, 2013; Turney ve Fthenakis, 2011) deniz üstü yenilenebilir teknolojilerde araştırma çabalarını artırmıştır (Esteban vd., 2011) ve ticari elektrik üretimi için yüzen fotovoltaik (FPV) dizisi konseptinin gelişimine yol açmıştır.

Bir araştırmaya göre, rezervuarlardaki duba ve PV panelleriyle sağlanan bu etkin kaplama, rezervuarlardaki su buharlaşmasını azaltmıştır. Avustalya'daki araştırmalar, açık rezervuarlardaki suyun %40'ına kadarının buharlaşma sırasında kaybedilebileceğini öne sürmektedir (Theocharis, 2005). Dolayısıyla, su buharlaşmasında önemli bir azalma tarım işletmeleri için kesinlikle olumlu bir gelişmedir.

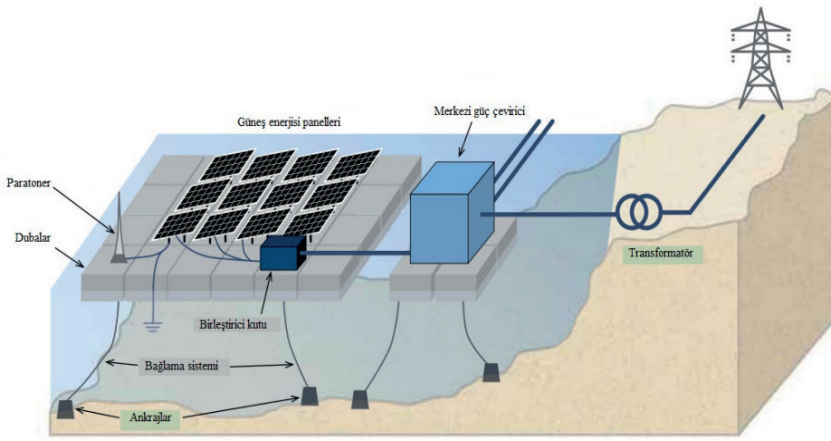
FPV'nin performans değerlendirmesi için en önemli parametre, çalışma koşullarında PV'nin etkili dönüşüm verimliliğidir. Bu durum, elektrik üretimini ve dolayısıyla bir PV modülünün en değerli bileşeni olan dönüşüm verimliliğini etkiler. PV modülünün dönüşüm verimliliği, alınan güneş radyasyonu yoğunluğuna göre üretilen elektrik gücü arasındaki oranla belirlenir ve bu oran genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{el} = (P_{max} / (S \times A_{pv})) \times 100\% \quad (1)$$

Burada, η elektriksel verimlilik (%), P_{max} PV modülü tarafından üretilen güç (W), S PV modülüne gelen güneş radyasyonu yoğunluğu (W/m^2) ve A_{pv} güneş radyasyonu yoğunluğuna maruz kalan PV modülünün ön yüzey alanıdır (m^2).

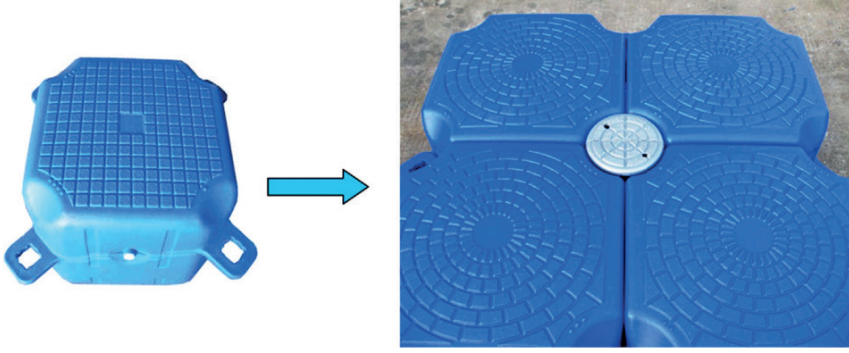
Yüzen PV Sistemin Bileşenleri

Bu sistemlerde enerji üretimi, PV santral teknolojisi ve yüzen teknolojinin birleşiminden sağlanmaktadır. Bu yenilikçi teknoloji, değerli araziler üzerine kurulacak olan geleneksel fotovoltaik enerji santrallerinin yerini alabilir. Yüzen PV santralleri genellikle bir duba veya benzeri yüzdürme sistemleri, bağlama sistemleri, güneş panelleri ve kablolardan oluşur (Şekil 1).



Şekil 1: Yüzen güneş enerjisi sistemi şematiği (World Bank, ESMAP, SERIS)

Duba: Bir duba, kendisi ve ağır bir yük ile birlikte yüzebilmesi için yeterli yüzerliğe sahip bir yüzer cihazdır. Platform, mevcut alana ve enerji gereksinimlerine uygun sayıda modülü seri-paralel kombinasyonunda barındıracak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Şekil 2, dubaların ve duba yapısının görünümünü göstermektedir.



Şekil 2:Duba yapısı

Yüzdürme elemanları: Birden fazla plastik boş yüzdürme elemanı, etkin yüzerlik-ağırlık oranına sahip olarak tekrar tekrar bir araya getirilerek devasa bir duba oluşturur. Yüzdürme elemanları genellikle çekme dayanımı, bakım gerektirmemesi, UV ve korozyon direnci ile bilinen yüksek yoğunluklu polietilenden (HDPE) yapılıdır. Cam elyafı takviyeli plastik (GRP) de yüzer platform yapımında kullanılabilir.

Bağlama sistemi, genellikle bir konteynerin güvenli bir şekilde sabitlenebileceği kalıcı yapıları kapsar. Bu yapılar arasında rıhtımlar, iskeleler, ankraj şamandıraları ve bağlama şamandıraları bulunabilir. Yüzen güneş sistemlerinde ise bağlama sistemi, panelleri sabit bir konumda tutarak dönme veya sürüklenmeyi önler. Derin sularda bağlama sistemi kurulumu zor ve maliyetli olabilir.

Güneş PV modülü: Şimdiye kadar standart kristal güneş PV modülleri yüzer güneş sistemleri için kullanılmıştır. Ancak daha fazla proje tuzlu su yüzeylerinde kurulduğunda, uzun süreli tuzlu su maruziyetine dayanacak şekilde özel olarak üretilmiş modüllere ihtiyaç duyulacaktır. Hemen hemen her metal zamanla korozyona uğrayacaktır ve bu nedenle standart alüminyum çerçeveler ve montajlara alternatif olarak polimerden yapılmış çerçevelere ihtiyaç vardır.

Kablolar ve konnektörler: Yüzen PV sistemlerinde kullanılan kablolar ve konnektörler, suya dayanıklı özelliklere sahip olmalıdır. Bu sistemlerde genellikle özel olarak tasarlanmış kablo ve konnektör çözümleri kullanılır. Bu çözümler, su altında güvenilir bir elektrik iletimi sağlamak üzere korunmuş ve yalıtılmıştır. Ayrıca, yüzen PV sistemlerinde kabloların ve konnektörlerin montajı, su içindeki hareketliliği ve değişken koşulları göz önünde bulundurularak özenle yapılmalıdır. Bu sayede sistemlerin dayanıklılığı ve verimliliği artırılır, aynı zamanda bakım gereksinimleri minimize edilir.

Yüzen Güneş Enerjisi Sistemi Uygulamaları

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin çoğu için, çok büyük alanlara ihtiyaç duyulur ki bu da çok megavat ölçeğine ulaşan elektrik üretimi avantajı sağlar. Bu durum, tarımsal kullanım, iş geliştirme, gayrimenkul veya enerji üretimi için arazi kullanımı konusunda tartışmalı konuları ortaya çıkarır. Sonuç olarak, araştırmacılar, toplumun ihtiyaçlarını karşılamak için yenilenebilir enerji üretimini sağlayabilecek uzlaşmacı çözümler bulma konusunda kaynaklarını ve çabalarını yoğunlaştırmaktadırlar. Bu nedenle, güneş endüstrisi de yüzen PV kurulumları konseptine kapılarını açmıştır.

Bugüne kadar çok az sayıda yüzen PV kurulumu bulunmaktadır çünkü bu teknolojinin doğası henüz genç ve gelişim aşamasındadır. Bu sistemlerin çoğu, önceden kullanılamayan alanlarda ya da sulama amaçlı rezervuar gibi göllerde, göletlerde ve rezervuarlarda kurulmuştur ve bu nedenle tarımsal değeri yüksek arazilere alternatif bir çözüm olarak seçilmiştir.

Aichi projesi, bilinen ilk su üzerine inşa edilen güneş projesidir. Japonya Ulusal İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nden bir grup araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir ve Japon Çevre Bakanlığı tarafından finanse edilmiştir (Ueda vd., 2008). Bu araştırmanın amacı, yüzen PV sistemlerinin konseptini tanıtmak ve PV sistemi performansı üzerinde modül sıcaklığının etkisini analiz etmektir. Çalışma, üç PV sistem konfigürasyonu arasında karşılaştırma içermiştir: Biri su soğutmalı, diğeri soğutmasız iki yüzer konfigürasyon ve yakınlarda bir kara bazlı PV konfigürasyonu.

Su, rezervuardan serbestçe temin edilen su kaynağından pompalanmış ve aralıklı olarak bir yüzen sistem üzerine püskürtülmüşken, diğer sisteme harici kaynaklar uygulanmamıştır. Her iki yüzen sistem de yaklaşık olarak 1.3° eğimli bir köpük polistiren levha üzerine inşa edilmiş olarak güneye bakmaktadır. Karşılaştırma olarak, kara tabanlı sistem yerel konum için optimal eğime (30°) güneye bakacak şekilde inşa edilmiştir (Şekil 3).

Kara tabanlı sistem, belirli konum için optimal eğim açısına sahip olduğundan referans noktası olarak kullanılmıştır. Aslında, yüzen sistemlerin aldığı toplam ışınlam, kara monte sistemine göre yaklaşık olarak %15'tir. Bununla birlikte, maksimum sistem verimi su soğutmalı PV konfigürasyonu ile elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, su soğutmalı konfigürasyonun performansının yaz aylarında diğer yüzen sistemleri %9,6 faktöründe aştığını göstermektedir. Aslında, su soğutmalı sistemin modül sıcaklığı yaz aylarında neredeyse 25°C kadar düşmüştür. Su soğutmalı sistem performansı, kış aylarında da su soğutmalı olmayan yüzen sistemini %3 faktöründe aşmıştır. İki yüzen sistem arasındaki fark, aralıklı olarak sağlanan suyun, su soğutmalı yapılandırmada panelin üzerindeki kuş dışkısı birikimini temizlemiş olabileceği gerçeğine atfedilebilir (Trapani ve Redón Santafé, 2014).



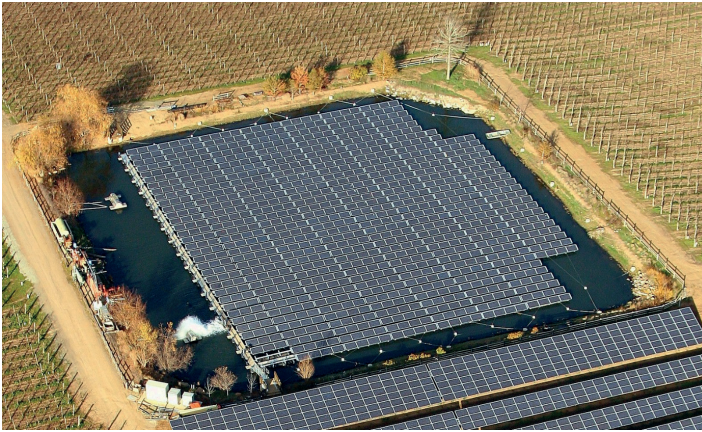
Şekil 3: Aichi yüzer projesi

Far Niente Şarapları, su üzerinde kurulmuş ilk büyük şebekeye bağlı güneş enerji sistemine sahiptir. Bu konseptin ardındaki motivasyon, iş sahiplerinin ve ortaklarının, üzüm bağlarının büyümesini engellemeden sürdürülebilir ve çevre dostu çözümler arayışındır. Bölgede üzüm bağı arazisinin dönümü \$200,000 - \$300,000 arasında olduğu için, SPG Solar'ı verimsiz alanı etkin bir şekilde kullanmak üzere görevlendirdiler.

Floatovoltaic sistemi, bir gölette pontonlar üzerine monte edilmiş modüller kristal PV panellerden oluşmaktadır (Şekil 4). Yüzen yapı, panel sıraları arasında panel temizliği ve bakımı için kolay erişim sağlamak amacıyla dahili yürüyüş yollarına sahiptir.

Bu ticari proje, şarap bağlarına enerji ihtiyaçlarının %100'ünü sağlamaktadır ve fazla enerji şebekeye aktarılmaktadır. Projenin raporuna göre (Smyth vd., 2011):

- (i) Suyun soğutma etkisi nedeniyle elektrik üretiminde %1 artış oldu,
- (ii) Buharlaşma nedeniyle su azalması olasılığı %70 azaldı,
- (iii) Alga büyümesi azaldı (çünkü paneller, alglerin büyümesi için ihtiyaç duyduğu güneş ışığını engelliyor).



Şekil 4: Far Niente yüzer PV projesi

İtalya'nın Suvereto şehrinde bir şaraphanede kurulan sistem ise, önceki tartışılan sistemlerden farklı olarak, güneşin hareketine göre diziyi döndüren bir izleme mekanizmasıyla donatılmıştır; ayrıca panelin önüne güneş ışınlarını maksimize etmek için bir reflektör yerleştirilmiştir(Şekil 5). Güvenlik ve izleme özellikleri, Scienza Industria Technologia (SCINTEC) adlı bir araştırma grubu tarafından analiz edilmiş, tasarım ve inşaat ise Terra Moretti Holdings tarafından yapılmıştır. Bu konsept, "Floating Tracking Cooling Concentrating Systems (FTCC)" olarak adlandırılmaktadır.

Önceki tartışılan motivasyonları yineleyerek, bu sistem değerli araziyi boşa çıkarmadan ekolojik sürdürülebilir bir yaklaşımı benimsemek üzere gerçekleştirilmiştir. Bu proje daha sonra 2011 yılında elektrik şebekesine bağlanmıştır (Cazzaniga vd., 2012).



Şekil 5: Petra's Winery' deki FPV sistem, İtalya.

Petra Şaraphanesi'ndeki izleme özelliğini inceleyen araştırma grubu, İtalya'daki bir gölette aşağıdaki kurulumu geliştirmiştir(Şekil 6). Bu sefer, paneller yatay olarak yerleştirilmiş ve gelen radyasyon miktarını maksimize etmek için her iki kenarda V şeklinde reflektörler kullanılmıştır. Bu durum daha yüksek çalışma sıcaklıklarını ima eder, ancak paneller suya daha yakın olduğu için soğutma etkisi Suvereto projesinin konfigürasyonundan daha etkili olmuştur. Bu konfigürasyon için de bir izleme sistemi kullanıldığını belirtmek önemlidir.

Sonuçlar, bu konfigürasyonun Suvereto projesine göre daha yüksek verimler sağladığını ve bu nedenle tercih edilen bir konsept olduğunu göster-

mektedir. Gerçekten de, bu konfigürasyonun, geleneksel kara tabanlı PV sistemlerine göre yıllık çıkışta %60-70 artış sağladığı rapor edilmiştir (Tina vd.,2011).



Şekil 6: *Petra's Winery PV sistemi, İtalya..*

Hollanda'daki bir gölette, parlak bir daire şeklinde ada üzerinde birçok güneş paneli bulunmaktadır. Ancak bu, sıradan bir güneş enerjisi dizisi veya dünyanın dört bir yanındaki diğer yüzen güneş çiftliklerinden biri değildir. Bu paneller, diğer yüzen güneş çiftliklerinin yapamadığı bir şeyi yaparak, gökyüzünde hareket eden Güneş'i titizlikle takip eder ve ondan mümkün olduğunca fazla güneş ışığı toplar (Şekil 7).

Bu yenilikçi kurulum, antik Yunan deniz tanrısı Proteus'tan esinlenerek adlandırılan Proteus adında bir adadır ve güneş panellerinin Güneş'i takip eden teknolojiyi yüzen güneş panelleriyle birleştiren ilk örneklerden biridir. Güneş enerjisi üretimini maksimize etmek amacıyla tasarlanan bu ada, Hollanda'nın güneybatısındaki Oostvoornse Meer gölünde yer almakta olup, 180 hareketli güneş paneli ile kaplıdır ve toplamda 73 kilovat pik güç (kWp) kurulu kapasiteye sahiptir. Proteus'u inşa eden Portekizli şirket SolarisFloat, bu küçük kurulumun büyük miktarda temiz elektrik üretecek şekilde ölçeklendirilebileceğine inanmakta ve önemlisi, değerli araziyi işgal etmeden bu hedefe ulaşmayı planlamaktadır.



Şekil 7: *Proteus adası*

İsrail’de Solaris Synergy adlı İsrail-Fransız ortaklığı, ilk yoğunlaştırılmış güneş fotovoltaik (F-CPV) sistemi olan bir proje kurmuştur ve bu proje “Arava Çevre Çalışmaları Enstitüsü Yenilenebilir Enerji ve Enerji Koruma Merkezi”nde yer almaktadır(Şekil 8). Aynı yıl içinde Solaris Synergy, Fransız EDF ile birlikte Provence, Fransa bölgesinde benzer bir proje üzerinde testlere başlamıştır (Muscat, 2014).



Şekil 8: *Solaris Synergy tarafından tasarlanan F-CPV*

Son yıllarda güneş PV elektriğinin devrim niteliğindeki genişlemesinde yüzen güneş teknolojisinin yükselişi en son trendlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Teknoloji şu anda küresel elektrik üretiminin %3,6'sını oluşturuyor, bu oran 2006'da %0,03'ten yükselmiştir. Güneş enerjisinde daha fazla genişleme beklenmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre, net sıfır emisyonlu bir dünyaya ulaşmak için 2030 yılına kadar kapasitenin mevcut seviyesinin altı katına çıkması gerekmektedir.

SONUÇ

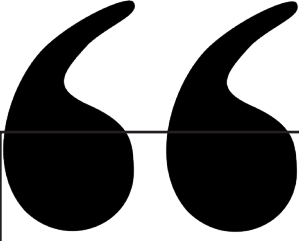
Bu bölüm, göletler, göller, barajlar ve rezervuarlar gibi durgun su alanlarına kurulan yüzen PV sistemlerini vurgulamaktadır. Ayrıca dünya çapında kurulu kapasitelerini sunmaktadır. PV kurulumlarının ortaya çıkmaya başladığı son yıllarda kısa sürede geliştirilen büyük sayıdaki projeler, böyle bir teknolojinin ilgi ve özel ihtiyacını açıkça göstermektedir.

Gelecekteki gelişmeler için konseptler, bu teknolojinin uygulanabileceği daha büyük su alanlarını hedeflemektedir. Bu, böyle bir kurulumun daha sert deniz dalgası ortamlarında daha büyük yüklerle karşılaşmasını gerektirecektir. Bu tür ortamlar için önerilen konseptler, dalgalara uyum sağlayabilen esnek ince film yapılar veya kaba su koşullarında batırılabilen geleneksel sert PV dizilerini öngörmektedir. Yüzen PV teknolojisinin daha büyük kurulumları için daha fazla araştırma ve kanıtlanmış gösterimler gerekmektedir; böylece bu teknoloji, daha geleneksel deniz üstü yenilenebilir teknolojilerle yan yana düşünülebilir hale gelebilir.

Projelerin zaman çizelgesi, yüzen PV teknolojisinin kurulması ve çok megavat ölçekli yüzen PV dizilerinin geliştirilmesi konusunda önemli araştırmaları işaret etmiştir. Yüzen PV dizileri, yenilenebilir enerji teknolojileri kurulumunda öncü bir konuma gelebilir.

REFERANSLAR

- Alam, M. Z. B., & Ohgaki, S. (2001). Evaluation of UV-radiation and its residual effect for algal growth control. In T. Matsuo, K. Hanaki, & H. Satoh (Eds.), *Advances in Water and Wastewater Treatment Technology* (ss. 109-117). Elsevier.
- Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M. (2012). Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems. In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE* (pp. 514-519).
- Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, 36, 444-450.
- Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, J. J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F. J., Torregrosa-Soler, J. B. (2013). A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*, 60, 63-70.
- Muscat, M. (2014). A Study of Floating PV Module Efficiency. Dissertation submitted to the Institute for Sustainable Energy, University of Malta, in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Sustainable Energy.
- Sliz-Szkliniarz, B. (2013). Assessment of the renewable energy-mix and land use trade-off at a regional level: a case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodship. *Land Use Policy*, 35, 257-270.
- Smyth, M., Russell, J., Milanowski, T. (2011). *Solar Energy in the Winemaking Industry*. Springer.
- Tina, G. M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P. (2011). Electrical behaviour and optimization of panels and reflector of a photovoltaic floating plant. In *Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC'11)* (pp. 4371-4375).
- Trapani, K., & Redón Santafé, M. (2014). A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. doi:10.1002/ppap.2014
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289-296.
- Turney, D., Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3261-3270.
- Ueda, Y., Sakurai, T., Tatebe, S., Itoh, A., Kurokawa, K. (2008). Performance analysis of PV system on the water. In *Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain* (pp. 2670-2673).
- WorldBank, ESMAP, SERIS. (2018). *Where sun meets water: Floating-solar market report executive summary*.



Bölüm 2

SPİRAL KAYNAKLI ÇELİK BORU ÜRETİMİ, KAREKTERİZASYONU, KALİTE KONTROL VE KAPLAMA İŞLEMLERİ

Levent Cenk KUMRUOĞLU¹

Nurullah AYDIN²

¹ Prof. Dr. , Metalurji ve Malz Müh., İskenderun Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ORCID: 1 0000-0001-6420-3761

² Tekin Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., ORCID: 20009-0008-1604-5939

Çelik Boru Hattının Projelendirilmesi ve Kullanım Alanları

Spiral kaynaklı çelik borular, belirtilen oda sıcaklık özellikleri olan basınç amaçları için teknik teslim şartlarını kapsayan TS EN 10217-1, yüksek sıcaklık özellikleri olan basınç amaçları için teknik teslim şartlarını kapsayan TS EN 10217-5, yapı ve konstrüksiyon amaçları için kullanılan TS EN 10219-1, su ve diğer sulu akışkanların taşınmasında kullanılan alaşımsız çelik borular ve bağlantı parçalarının teknik teslim şartlarını kapsayan TS EN 10224, petrol ve doğal gaz iletim hatları için kullanılan EN ISO 3183 ve API 5L standartlarına göre vasıflandırılan ve uygunluğu verilen işletmelerde üretilmektedir. Herhangi bir boru hattı projelendirilirken ilgili uzmanlar tarafından arazi, iklim koşulları ve iletimi yapılacak sıvının özelliğine göre üretim standardı belirlenir ve bu standarda göre olası işletme basıncı hesaplanarak malzeme tasarımı ve seçimi yapılır. Boru hattı tüm hesaplar yapıldıktan sonra arazi şartlarına göre projesi tamamlanır. Projesi tamamlanan hattın içerisinde bağlantı parçaları mevcut ise bunların tespiti de yapılır.

İlgili kurumlar (Belediyeler, Devlet Su İşleri, BOTAŞ, İller Bankası vb.) ve uzmanlar tarafından hazırlanan projelerin teknik ve genel şartnameleri yayınlanır. Bu boru hattının seri imalatını yapacak olan işletmenin çelik boru üretim standartlarının, proje bazlı genel ve özel teknik şartnamelerinin tüm gereklerini kapsaması gerekmektedir.

Spiral Kaynaklı Çelik Boru Üretimi Ve Kontrol Aşamaları

Çelik boru işletmelerinin EN ISO 9001:2015 kalite yönetim sisteminin tüm gerekliliklerine ve tüm politikalarına sahip olması gerekmektedir. Bu standarda göre tüm istasyonların ve işlemlerin talimatları, prosedürleri ve formları hazırlanmış olması gerekir ve genel bir kalite elkitabı oluşturulup bunların işletmenin her aşamasında faaliyette olması ve tüm kayıtların izlenebilirlik açısından arşivlenmesi gerekir. Bu işlemlerin hem planlama, hem imalat hem de kalite kontrol departmanlarınca uygulanması gerekir. Buradaki en önemli unsur kalite kontrol departmanına düşmektedir. Çünkü ürünün yanı sıra ürünlere ait tüm belgelerin gözetimini, doğruluğunun tespiti ve onayını yapmakla mükelleftir.

Çelik Boru fabrikasının sahip olması gereken ünite ve sistemler,

- Spiral kaynaklı çelik boru makinesi
- Otomatik toz altı kaynak makinesi
- Online ultrasonik NDT kontrol makinesi
- Otomatik plazma kesim makinesi
- Mekanik ve kimyasal test laboratuvarı
- İlk göz ölçü ve boyut kontrol sistemi

- Kaynak ağzı açma ünitesi
- Sızdırmazlık testi (hidrostatik test) ünitesi
- Radyografik test ünitesi
- Son kontrol ölçü-boyut ve görsel kontrol ünitesi

Kaplama işlemleri için sahip olunması gereken ünite ve sistemler

- 3 kat sıcak polietilen kaplama için (statik toz epoksi-yapışkan polietilen-polietilen),

- Dış kumlama ünitesi
- Çelik boru yüzey ısıtma fırınları (160 °C – 220 °C)
- Polietilen kaplama makinesi
- Yüzey soğutma ünitesi

Epoksi kaplama ünitesi için,

- İç kumlama ünitesi
- Havalı epoksi kaplama makinesi

Beton kaplama ünitesi için

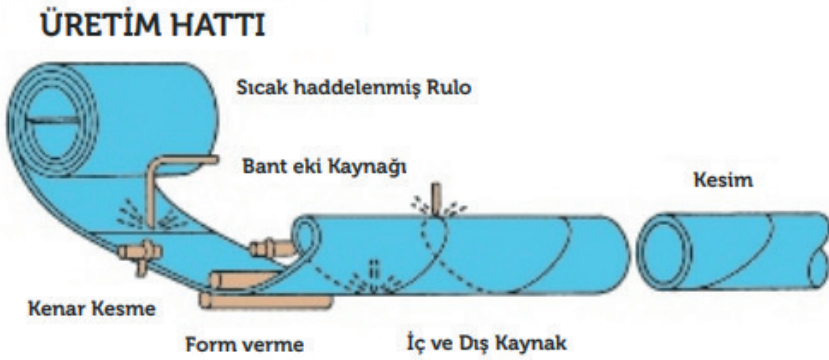
- İç kumlama ünitesi

Beton kaplama ünitesi ve sistemi(A. AGADANGİL, 2021)

Hammadde Giriş, Çelik Boru Form Verme İşlemi Ve Kontrol Aşamaları

Spiral kaynaklı çelik borular, sıcak haddelenmiş rulo bobinlerin spiral formunda soğuk şekillendirme işlemi ile üretilir. Bu sıcak haddelenmiş bobinler satınalma departmanı tarafından tedarik edilen hammaddeler işletmenin kalite kontrol ve dopo sorumlusu tarafından teslim alınır. Gerekli tüm boyut ve ölçüsel kontroller ve malzeme kalitesinin kontrolü için numune alma işlemi yapılır. Alınan numuneler işletmenin laboratuvar biriminde mekanik ve kimyasal testleri yapılır. Çıkan sonuçlar standartlar ile karşılaştırılıp uygunluğu teyit edilir.

Uygunluğu teyit edilen hammaddenin form verme işlemi başlar. Seri üretime başlamadan önce kalite kontrol birimi tarafından ve kaynak mühendisi tarafından siparişin kaynak prosedürü spesifikasyonları (WPS) (EN ISO 15614 'e göre)(*ISO-15614-1-2017.pdf*, t.y.) ve kalite test planı(ITP)(*Inspection and Test Plans*, t.y.) hazırlanır. Hazırlanan bu kalite planına göre çelik borunun form işlemi başlar. Form işlemi tamamlanan borunun kaynak prosedürü spesifikasyonlarına (WPS) göre akım şiddeti (amper) ve voltaj değerleri ayarlanır. WPS e göre uygun kaynak teli ve kaynak tozu seçimi yapılır ve seri üretime başlanır. Kaynak yöntemi tozaltı ark kaynağıdır. Tozaltı ark kaynağının en önemli avantajı seri imalatlarda kullanıma uygun olması ve yüksek ergime gücüne sahip olmasıdır(A. AGADANGİL, 2021).



Şekil 1. Form verme işleminin şematik gösterimi(Spiral Submerged ARC Welded Pipes Manufacturers and Suppliers China - Professional Factory - WANLEI, t.y.)



Şekil 2. Seri üretimin başlaması(Aydın, N., 2024)

Seri üretimi başlanan borunun online ultrasonik kontrol sistemi ile olası kaynak hataları tespiti ve kontrolü yapılır. EN ISO 10893-11 'e göre . kesilen ilk borudan mekanik ve kimyasal testleri yapılır. Test sonuçları raporlanıp değerleri standartlar ile karşılaştırılarak uygunluğuna kararı ve seri üretimin devam etme talimatı verilir.

Yapılması Gereken Mekanik Ve Kimyasal Testler Ve Standartları,

Ana malzeme çekme testi (TS EN ISO 6892-1)(2020_s4_n2_iso_6892-1_2019_standardındaki_degisiklikler, t.y.)

Kaynak dikişinin enine çekme testi (TS EN 4136)

Kaynak dikişinin enine bükme testleri (TS EN 5173)

Kimyasal kompozisyon testi (ASTM E415)

Charpy darbe testi (TS EN ISO 148-1)

Makrografik test

Seri üretimi devam eden borunun kalite planına(ITP) 'e göre boru boyları plazma ile kesim işlemi yapılır. Kesimi yapılan boru ilk göz kontrol işlemi için ilk göz kontrol standına gelir.İlk göz ünitesinde alanında uzman personeller ile boyut ve görsel işlemleri yapılır. Olası kaynak hatalarının tespiti yapıp tamir istasyonuna aktarılır.

Tespiti yapıp belirgin hale getirilen kaynak hataları manuel olarak vasıflı kaynakçı operatörleri tarafından onarım işlemi yapılır. Onarım işlemi elektrik ark kaynağı (111) yöntemi ile yapılır.

Onarım işlemi tamamlanan boruların uç kısımları kaynak ağzı açma işlemi için kaynak ağzı açma ünitesine aktarılır.



30°

Alın kaynak $1,6 \pm 0,8$ mm

Şekil 3. Boru ucu kaynak ağzı açma

Kaynak ağzı açılan borunun sızdırmazlık testini yapmak üzere hidrostatik test ünitesine aktarımı yapılır. Kalite planında hesaplanan basınç değeri ile test işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 4. Hidrostatik test işleminin gerçekleşmesi(Aydın, N., 2024)

Hidrostatik test basıncı üretim standartlarında formülize edilmiştir. Bu formüllere göre malzemenin min. akma dayanımı ve kalınlığına göre hesaplanıp kalite planlarına aktarılır.

Hidrostatik test işleminden geçen borular bir sonraki istasyon olan radyografik muayene istasyonuna aktarılır. Radyografik muayene istasyonunda otomatik online ultrasonik sistemde tespit edilen hataların manuel ile tamir işleminden sonra yapılan tamir ve bant eki kısımlarının kontrolü için kullanılır. Radyografik muayene X-ray cihazı ile TS EN ISO 10893-6 'ya göre yapılır. Hata kriterleri bu standarda göre belirlenir.



Şekil 5. Radyografik muayenin gerçekleştirilmesi(Aydın, N., 2024)

Radyografik muayesi yapılan borular son kontrol işlemi yapılmak üzere son kontrol istasyonuna aktarılır.

Songöz kontrol işleminde alanında ve kaynak alanında uzman personeller tarafından görsel kontrol, son ölçü kontrol ve boyutsal muayene işlemleri yapılır.

Son kontrol işleminden geçen borular kaplamasız şekilde teslim edilecek ise markalama işlemi yapılır ve sevkiyat işlemi gerçekleştirilir.

Markalama işleminde en az aşağıdaki bilgilerin boru yüzeyine silinmez boya ile işaretlemesi yapılır:

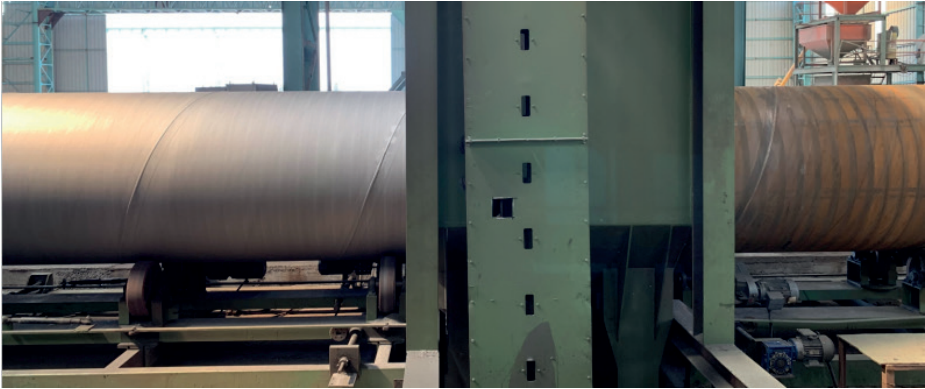
- Üretici firmanın ticari ünvanı
- Üretim standardı
- Çelik kalitesi
- Borunun dış çapı
- Borunun et kalınlığı
- Borunun boyu
- Çelik malzemenin döküm numarası
- Boru takip numarası

Son kontrol işleminden sonra kaplama yapılacak ise borular kaplama işlemine aktarılır.

Üç Kat Sıcak Polietilen Kaplama İşlemi,

Kaplama işlemi başlamadan önce yüzey temizliği yapılmalıdır. Yüzey temizliği kumlama işlemi ile yapılır. Kumlama işlemi ile boru yüzeyi kirden, yağdan ve korozyon etkenlerinden arındırılmış olur. Ayrıca yüzey pürüzlülük sağlanır ki buda kaplama malzemesinin boru yüzeyine daha iyi nüfus etmesi ve yapışma mukavemetinin artmasını sağlar.

Kumlama işlemi TS 8501 standardına göre yapılması gerekir. Bu standarda göre yüzey temizlik kalitesinin en az "Sa 2½" mertebesinde olması gerekir. Yüzey pürüzlülüğünün ise 40 – 90 Rz değerinde olması gerekir.



Şekil 6. *Spiral kaynaklı çelik borunun kumlama işlemi yapılması aşaması*(Aydın, N., 2024)

3 Kat Sıcak Polietilen Kaplama İşleminin Başlanması :

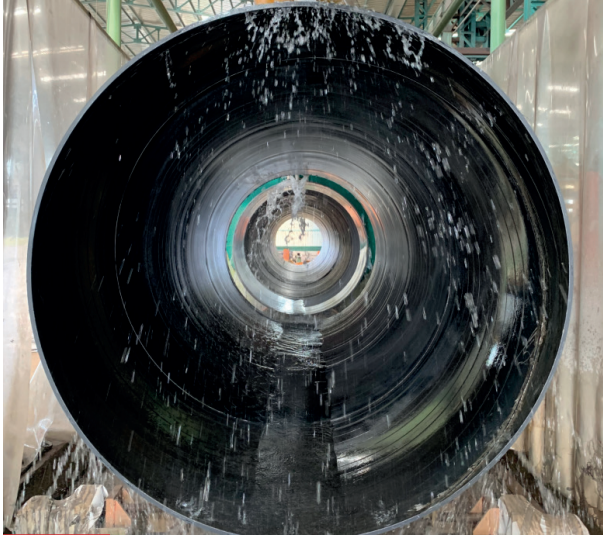
1. Katman : statik toz epoksi
2. Katman : yapıştırıcı polietilen
3. Yüksek yoğunluklu polietilen

Polietilen kaplama işlemleri ; DIN 30670 , TS 5139 , EN 21809-1 gibi standartların gerekliliklerine göre yapılması gerekir. teknik şartnamelerde hangi standartlarda kaplama işlemi yapılması gerektiği belirtilmesi gerekir. kaplama işlemlerinin tüm özellikleri ve uygulama yöntemleri bu standartlarda anlatılmaktadır.

Kaplamaya başlamadan önce standartların belirttiği gibi malzeme yüzey pürüzlüğü ölçümleri, yüzey nem ve çiğlenme noktası ölçümleri ve yüzey temizlik kaliteleri kontrol ve test işlemleri yapılır.

Kumlama işlemi tamamlanmış çelik borunun kaplanmaya alınmadan önce yüzey ısıtma işleminden geçirilir. Kaplanması gereken borunun yüzey sıcaklığı 160°C ile 200 °C arasında olması gerekir. Daha sonra statik toz epoksi malzeme yüzeyine püskürtülür.

Toz boyanın püskürtülmesinden sonra ilk 20 saniye içerisinde jell-time süresini aşmadan 2.katman olan yapıştırıcı polietilenin malzemenin ekstrüzyon yöntemi ile boru yüzeyine yapışması sağlanır. Yapıştırıcı işleminin tamamlanmasından son tekrar ekstrüzyon yöntemi ile yüksek yoğunluklu polietilenin boru yüzeyine sarılması sağlanır. Bütün işlemler tamamlandıktan sonra yüzey soğutma işlemi yapılır.

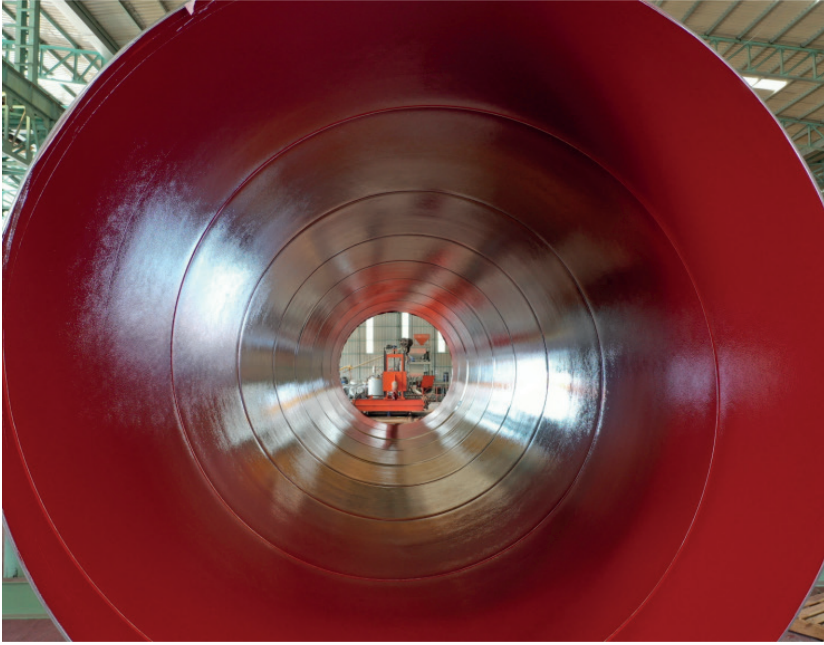


Şekil 7. Kaplama işleminden sonra soğutma işleminin yapılması(Aydın, N., 2024)

İç Yüzeyin Solventsiz Epoksi İle Kaplanması İşlemi;

Kumlama işlemi aynen boru iç yüzeyine da yapılması gerekir. İç kumlama işlemi tamamlanan borunun iç yüzeyine püskürtme yöntemi ile boru iç yüzeyine uygulanır.

Solventsiz epoksi uygulaması AWWA C210, TS EN ISO 10289, TS EN ISO 10339 standartlarından herhangi birine göre uygulanması gerekir.



Şekil 8. Spiral kaynaklı çelik borunun iç yüzeyinin solventsiz epoksi ile uygulanması(Aydın, N., 2024)

İç Yüzeyinin Beton İle Kaplanması İşlemi;

Boru iç yüzeyi solventsiz epoksi değilde beton kaplanması gerekiyorsa TS EN 10298 veya AWWA C205 gibi standartların tüm gerekliliklerinin sağlanması gerekir.

Beton kaplama işlemi yapılmadan önce yüzey kumlama işleminin TS 8501 'e göre yapılması gerekir. Kumlama işlemi yapılan borular %95 oranında silika kum ve portland 42,5 cem 1 çimentonun 1 – 2,5 oranları arasında harmanlanması gerekir. kireç içermeyen anti oksidan bileşen içermeyen içme suyuna uygun olan su ile S/C ve C/W oranlarına bakılarak hazırlanan harcın boru iç yüzeyine santrifüj yöntemi ile uygulanması işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 9. Dış polietilen içi beton kaplı çelik borular(Aydın, N., 2024)

Tüm kaplama işlemleri tamamlanan borunun kontrol, test ve markalama işlemleri yapıldıktan sonra tüm boruların onay ve kabul işlemlerini yapmak üzere üretici firmanın kalite kontrol sorumlusu, alıcı firmanın yetkilisi ve/veya 3.parti gözetim firması eşliğinde boruların tüm tahribatlı ve tahribatsız test işlemleri gerçekleştirilir. Yapılan tüm çalışmaların kontrol, test, muayene raporları ayrıca kullanılan tüm cihazların kalibrasyon ve hammadde sertifikaları, personel yeterlilik sertifikaları gibi bütün dokümanlar müşteri heyetine teslim edilir.

Yapılan tüm işlemler bittikten sonra sevkiyata başlanır(Aydın, N., 2024).



Şekil 10. Deniz yolu ile sevkiyatı yapılan dış polietilen içi solventsiz epoksi kaplı spiral kaynaklı çelik borular(Aydın, N., 2024)

STANDART ve NORMLAR

TS EN 10217-1	Oda sıcaklık özellikleri olan basınç amaçları için kullanılan çelik boru üretim standardı
TS EN 10217-5	yüksek sıcaklık özellikleri olan basınç amaçları için kullanılan çelik boru üretim standardı
TS EN 10224	Su ve diğer sulu akışkanların taşınmasında kullanılan alaşımsız çelik boru ve bağlantı parçaları üretim standardı
TS EN 10219-1	Yapı ve konstrüksiyon amaçları için kullanılan çelik boru üretim standardı
TS EN ISO 6892-1	Metalik malzemelerin çekme test standardı
TS EN ISO 4136	Kaynaklı malzemelerin çekme test standardı
TS EN ISO 5173	3 nokta klavuzlu eğme test standardı
TS EN ISO 148-1	Charpy darbe test standardı
ASTM E415	Kimyasal kompozisyon test standardı
TS EN ISO 3183	Petrol ve doğal gaz iletimi için çelik boru üretim standardı
API 5L	Petrol ve doğal gaz iletimi için çelik boru üretim standardı
TS 8501-1	Kumlama işlemi standardı
DIN 30670	Polietilen kaplama işlemi standardı
TS 5139	Polietilen kaplama işlemi standardı
TS EN ISO 21809-1	Polietilen kaplama işlemi standardı
TS EN 10289	Solventsiz epoksi kaplama işlemi standardı
TS EN 10339	Solventsiz epoksi kaplama işlemi standardı
AWWA C210	Solventsiz epoksi kaplama işlemi standardı
TS EN 10298	Çelik yüzeylere beton kaplama işlemi standardı
AWWA C205	Çelik yüzeylere beton kaplama işlemi standardı
TS EN ISO 10893-11	Kaynak dikişi üzerinde online ultrasonik kontrol işlemi standardı
TS EN ISO 10893-6	Kaynak dikişi üzerinde radyografik muayene işlemi standardı
EN 15614	Çelik malzemelerin kaynak prosedürü ve özellikleri standardı
TS EN ISO 9001:2015	Kalite yönetim sistemi standardı

KAYNAKLAR

2020_s4_n2_iso_6892-1_2019_standardindaki_degisiklikler. (t.y.).

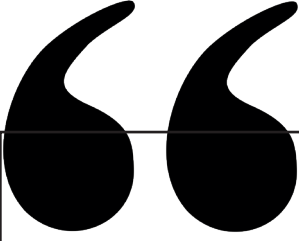
A. AGADANGİL, L. C. K. (2021). PRODUCTION OF DRILL RODS BY ERW WELDING METHOD AND THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE PROPERTIES. *6th INTERNATIONAL CONFERENCE on WELDING TECHNOLOGIES and EXHIBITION (ICWET'21) Sunum Türü : Sözlü*. <http://icwet20.iste.edu.tr/>

Aydın, N., K., L. C. (2024). *Spiral Boru Mühendisliği* (Teknik Rapor Nos. 2024-Spiral Pipe; Lecture Notes, s. 5). İSTE.

Inspection and Test Plans. (t.y.). Geliş tarihi 04 Ekim 2024, gönderen <https://www.qualitysystems.com/support/learning/inspection-and-test-plans/>

ISO-15614-1-2017.pdf. (t.y.). Geliş tarihi 04 Ekim 2024, gönderen <https://www.e-mep.com/wp-content/uploads/2017/07/ISO-15614-1-2017.pdf>

Spiral Submerged ARC Welded Pipes Manufacturers and Suppliers China—Professional Factory—WANLEI. (t.y.). Geliş tarihi 04 Ekim 2024, gönderen <https://www.seamlesscarbonsteelpipess.com/steel-pipe/welded-steel-pipe/spiral-submerged-arc-welded-pipes.html>



Bölüm 3

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK QUADCOPTER KOLUNUN TASARIM VE ANALİZİ

Funda KAHRAMAN¹

Mehmet KÜÇÜK

1 Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye, fkahraman@tarsus.edu.tr, (ORCID: 0000-0002-1661-3376)

2 Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD, 33400, Tarsus, Mersin, Türkiye, mehmetkucuk1985@gmail.com, (ORCID: 0000-0001-9196-0784)

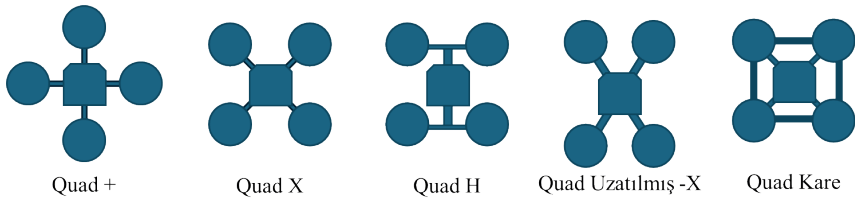
1. GİRİŞ

Günümüzde İnsansız Hava Araçları (İHA) konusuna ilgi sürekli artmaktadır. İHA platformlarının; tek rotorlu, çok rotorlu, sabit kanatlı ve hibrit sabit kanatlı tipleri bulunmaktadır (Bright vd., 2021). Çok rotorlu İHA'lar, multirotor veya multikopter olarak da tanımlanmaktadır. Multirotor rijit bir gövdeye bağlanan eşit sayıdaki rotorun tahrik kuvveti ile çalışmaktadır. Kanat sayısına göre tri-(3), quad-(4), hexa-(6), octo-(8) şeklinde isimlendirilmektedir. Aynı düzlemdeki çift sayıda rotor – pervane, en yaygın konfigürasyonları karakterize eder. Artan pervane sayısı, İHA'nın güvenilirliğini ve yük kapasitesini de artırır.

Çok rotolu İHA'lar dikey kalkış-iniş yapabilme (VTOL: vertical take-off and landing), havada asılı kalma (hovering) gibi hareket ve hız özellikleri nedeniyle askeri ve hobi amaçlı olarak kullanılmaktadır (Brischetto ve Torre, 2021). İHA'nın görev koşullarında maruz kalabileceği tüm yüklere karşı bileşenleri (elektronikler, tahrik sistemi ve bataryalar) gövde tarafından desteklenmektedir.

Quadcopter, döner kanatlı İHA grubunda yer alan dört rotorlu drone türüdür. Quadcopter ağırlık, boyut, menzil, yetenek vb. özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Quadcopter, genellikle yeni başlayanların için erişimi kolay ve çok yaygın İHA türlerinden biridir. Quadcopterler; arama-kurtarma, hobi, tarım, drone fotoğrafçılığı, 3D arazi haritalandırma, trafik-hava durumu izleme, telekom hizmetleri ve benzeri birçok askeri ya da sivil alanda kullanılmaktadır (Ahmad vd, 2021; Aktürk, 2016; Brischetto ve Torre, 2021; Urdea, 2021; Rizon vd., 2020).

Quadcopterlerin yaygın tasarımı, merkezde bir gövde etrafında dağılan kollar şeklindedir. Kolların yerleşimine göre quadcopter gövde tasarımları farklılık göstermekle birlikte yaygın örnekleri Şekil 1.'de gösterilmiştir.

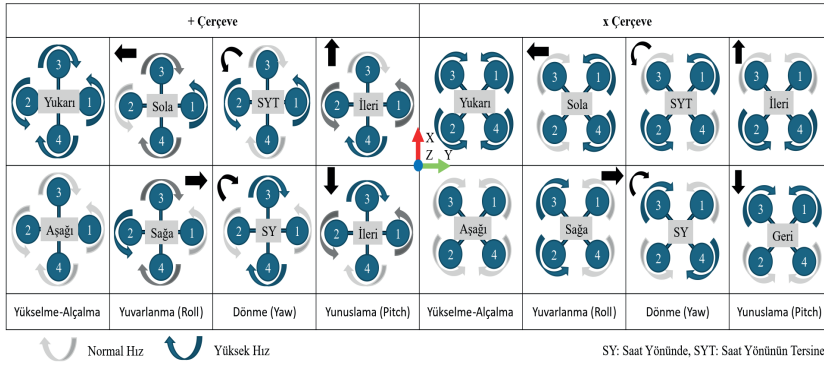


Şekil 1. Quadcopter gövde konfigürasyon örnekleri

Quadcopter, kaldırma ve itme gücü sağlamak için dört tane BLDC (brushless DC) rotora sahip bir dronedur (Ahmad vd., 2021; Basit vd., 2021). Quadcopter rotorları kütle merkezine göre eşit şekilde konumlandırılmaktadır. Her pervane, düzlemine dik bir itme kuvveti oluşturur ve bu merkezde bir momente dönüşür. Kuvvetlerin ve momentlerin dağılımı, tahrik sistem elemanlarının geometrik düzenine bağlıdır.

Araç üzerinde toplam tork sıfır olacak şekilde rotorlar saat yönünde (SY) ve saat yönünün tersinde (SYT) çiftli olarak dönmektedir. Quadcopter üç ekseninde (yukarı-aşağı, sağa-sola, ileri-geri) serbest hareket edebilir ve altı serbestlik derecesine sahiptir.

Quadcopterin kontrolü, kolların ucunda merkezi olarak konumlan rotorların dönüş hızının değiştirilmesiyle sağlanmaktadır (Basit vd., 2021). Dört rotor ile pervanelerin oluşturduğu itme kuvveti üç boyutlu uzayda hareketi sağlamaktadır (Köse ve Oktay, 2019; Rizon vd., 2020). Quadcopterlerde genellikle üretilen gücün %30 uçuş yön kontrolü için harcanmaktadır (Rizon vd., 2020). Quadcopterin hareket (manevra) türleri (+)gövde ve (x)gövde yapısı için Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Quadcopter manevraları

Quadcopter uçuşu, dikey, yanal ve dönme olmak üzere üç temel harekete bağlıdır. Her bir pervanenin itme çıkışlarının değişmesiyle; “yuvarlanma” (roll, Φ), “yalpalama-dönme” (yaw, ψ), “yunuslama” (pitch, θ) ve “havada asılı kalma” (hovering) yönünde hareket edebilmektedir. Tüm rotorlar hızı eşit olması ile oluşan itme sonucunda araç Z yönünde “yükselme-alçalma” (throttle) şeklinde hareket etmektedir. Havada asılı kalması için tüm rotarlarda net itme sıfır olmalıdır. Sağ ve sol pervane çiftlerin hızı birbirine ters şekilde artırılması ve azaltılması ile x-eksenine göre yuvarlanma hareketi sağlanmaktadır. Karşı pervanelerin hızının artırılması ve azaltılması ile z-eksenine göre yalpalamadönme hareketi sağlanmaktadır. Ön-arka pervanelerin hızının artırılması ve azaltılması ile y-eksenine göre yunuslama hareketi sağlanmaktadır.

Quadcopter (i) kontrol, (ii) tasarım ve (iii) modelleme konularında araştırma konusu olmuştur. Quadcopterin yapısal analizini ve tasarımı konularıyla ilgili mevcut literatürde yer alan örnek çalışmalar bu bölümde özetlen-

miştir. Ahmad vd. (2021) quadcopter gövdesini, titreşim frekansı ve yapısal analiz yönünde incelemiştir. Gövde tasarımını bakır, alüminyum ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) olarak üç farklı malzeme için analiz etmiştir. CFRP'nin yüksek frekanslarda diğer iki adaya göre daha iyi olduğunu belirlemiştir. Ahmed, Zafar ve Mohanta (2020) quadcopter gövdesinin modellenmesini ve yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçlarında gerilme (23.0 MPa) ve toplam deformasyon (4.135 mm) olarak gerekli sınırlar içinde elde etmiştir. Ali, Tawafik ve Jaber (2023) quadcopter kazasına dayalı yapısal analizler gerçekleştirmiştir. Topoloji optimizasyonu yardımıyla ağırlığı azaltmayı ve aerodinamik verimliliği geliştirmeyi hedeflemiştir. Topoloji optimizasyonu sonrasında quadcopter gövdesinde %50 hafifleme sağlanmıştır. Bala-yan vd. (2024) mevcut dronelerin performansını çok boyutlu iyileştirmek için üretken tasarım kullanmıştır. Topoloji optimizasyonuna göre optimize edilmiş şasi, ağırlığı %50 azaltarak maliyetlerin düşmesi ve güç-ağırlık (+6,08%) ile itme-ağırlık (+6,75%) oranlarının artması sağlamıştır. Tasarımı eklemeli üretim yöntemi ile daha kısa sürede üretmiştir. Üretken tasarım yaklaşım ile bütünsel bir geliştirme sunmakta ve drone endüstrisine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Basit vd. (2021) küçük paket dağıtımında stabil uçuş ve güvenli teslimatı için quadcopterin kontrol sistemini geliştirmiştir. Sistemi Matlab Simulink'te test etmiştir. Ürettiği prototipte kontrol sistemi, gerçek ortam testlerinde görevleri başarmıştır. Bright vd. (2021) quadcopterin çerçeve tasarımında üretken tasarım yöntemini kullanmıştır. Pazarda mevcut olan model ile üretken tasarım sonrası elde ettiği geometriler için analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. Brischetto ve Torre (2021) üretken tasarım araçlarını kullanarak drone gövde tasarımını araştırmıştır. Çalışmada faydalı yük, itme-ağırlık oranı, verimlilik, uçuş süresi ve maksimum hız performanslarının optimizasyonu için dört farklı durumu değerlendirmiştir. Çağan ve Buldum (2019) çalışmada drone tasarımları için malzemeleri değerlendirmiştir. Uçuş süresini artırma ve hafiflik istenen durumlarda kompozit malzemelerin daha uygun olduğunu, ancak kullanım alanına göre dayanıklı olması ve uçuş stabilitesi istendiğinde ise metal (Al, Mg alaşımları) malzemelerin daha uygun olduğunu vurgulamıştır. Çaşka vd. (2020) SEA kullanarak quadcopter tipi bir İHA tasarımını analiz etmiş ve üretmiştir. Quadcopter tasarımı için ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) ve PLA (Poliaktik Asit) malzemeleri kullanmıştır. Yapısal analiz sonucunda, ABS şaside 0,053 MPa ve PLA şaside 0,065 MPa gerilme olduğunu ortaya koymuştur. Şasi deformasyonu ABS için 0,014 mm ve PLA için 0,010 mm olmuştur. De Oliveira ve de Carvalho (2021) ABS malzeme ile Eriyik Yığma Modelleme/İmalat (FDM, Fused Deposition Modeling = FFF: Fused Filament Fabrication) yöntemini kullanarak bir quadcopterin mekanik özelliklerini geliştirmiş ve üretmiştir. İlk tasarımlara statik analiz, sonraki tasarımlara ise statik, dinamik ve modal analizler uygulamıştır. Elmas ve Alkan (2023) X tip quadcopter tasarımı ve performans özelliklerini geliştirmek amacıyla eQalc ve Matlab yardımıyla incelemiştir. Guliaev

(2017) otonom uçuş ve görüntü aktarma sistemine sahip bir quadcopter tasarım çalışması yürütmüştür. Günay ve Korkut (2023) drone için hareketli kol tasarımı TRIZ yaklaşımını uygulamıştır. İbrahim vd. (2021) tarımda zararlı (kuş) kontrolü için bir drone tasarımı ve yapısal analizlerini yürütmüştür. Çalışmada maksimum gerilmeler, çerçeve ve kol için sırasıyla 18.51 ve 39.13 MPa'dır. Kocamer vd. (2023) döner kanatlı bir İHA gövdesini dikey ve yatay olmak üzere iki farklı kol düzenlemesi için sonlu elemanlar analizi (SEA) ile sayısal olarak incelemiştir. Gövde üzerindeki yüklerin kırılma olmadan taşınabileceğini belirlemiştir. Rizon vd. (2020) kol uzunluğu değişime bağlı olarak quadcopterin gövdesinde eğilme moment etkilerini araştırmıştır. Song, Li ve Mao (2023) topoloji optimizasyonu ile ideal drone tasarımını elde etmiştir. Doğrulama çalışması için 3D baskı ile prototip üretmiştir. Orijinal tasarıma kıyasla %53,29 kütle azalması sağlamıştır. Urdea (2021) çeşitli alanlarda kullanılan dronelerin hızlı gelişimi değerlendirmiştir. CAD programı ile bir model tasarlamış ve performansını değerlendirmek amacıyla farklı durumlar için SEA analizlerini gerçekleştirmiştir. Yıldız (2023) topoloji ve şekil optimizasyonu yardımıyla drone kolu tasarımında optimal ağırlığa ulaşmayı amaçlamış ve %24,8 azalma sağlamıştır. Koç (2017) tarımsal ilaçlamada kullanılması için 5 lt tank kapasiteli drone tasarımı ve üretimi gerçekleştirmiştir. Köse ve Oktay (2019) quadcopter kontrol sistemi tasarlamış ve performansını boylamasına, yanıl ve havada asılı uçuşu için değerlendirmiştir. Yıldırım ve İşçi (2023) 4, 6, 8, 10 ve 12 rotorlu drone yapıları için yeni bir tasarım prosedürü uygulamış ve uçuş sırasında oluşan titreşim ve kuvvet etkileri analiz etmiştir. Bay ve Eryıldız (2024) topoloji optimizasyonu ve sonlu elemanlar analizi yardımıyla ideal quadcopter gövde tasarımına ulaşmayı amaçlamıştır. Üç farklı gövde tasarımını için analizler gerçekleştirmiştir.

Drone tasarımında kol, kritik role sahip eleman olarak işlevsel problemler oluşturmaktadır. Her kol, pervanesiyle birlikte bir rotoru taşımaktadır (Brischetto ve Torre, 2021; Yıldız, 2023). Quadcopterde yapısal hasarların çoğunluğu aracın düşmesi sonucunda meydana gelmektedir (Ali, Tawafik ve Jaber, 2023).

Sunulan bu çalışmada bir quadcopter kolunun tasarımı üç farklı malzeme (ABS, PLA PETG) için incelenmiştir. Sayısal analizler Ansys programında gerçekleştirilmiştir. Kolun tasarımını iyileştirmek amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır.

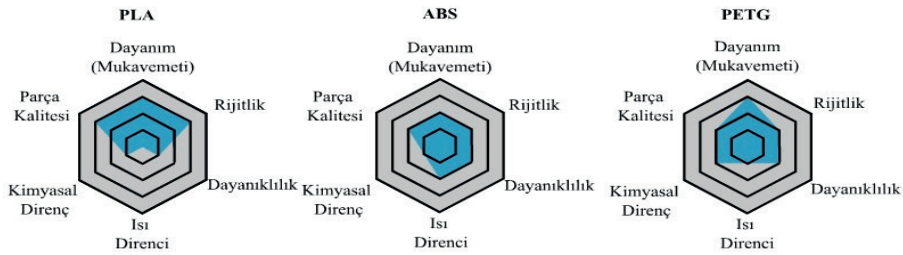
2. MATERYAL ve METOD

Drone tasarımının temel ve yenilikçi özelliği, özelleştirme fikrine dayanmaktadır. Drone tasarım ve mimarisi önceden belirlenmiş ve sabit değildir. Farklı senaryolara ve operasyonlara göre son kullanıcının seçimlerine bırakılmıştır. Quadcopterin, rotor, batarya ve gövde gibi elemanları için malzeme ağırlığı önemli konular arasındadır. Ağırlığı azaltmak, uçuş süresini ve

manevra kabiliyetini artırmak için drone tasarımlarında genellikle kompozit malzemeler kullanılır. Ayrıca, alüminyum, karbon fiber, plastik, PLA, ABS, gibi çeşitli malzemeler de kullanılmaktadır. Kol ve gövde üretiminde ise lazer kesim, frezeleme, 3D baskı vb. yöntemler kullanılmaktadır (Çağan ve Buldum, 2019; Urdea, 2021).

Katmanlı imalat teknolojisi havacılıktan otomotiv sektörüne kadar pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Plastik, metal vb. birçok malzemeden karmaşık yapılar sahip parçalar üretmek mümkündür. Filamentler, 3D yazıcılarda kullanıma uygun hale getirilmiş malzemelerdir. Günümüzde Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polietilen Tereftalat Glikol (PETG) kullanılan filamentler arasındadır.

3D imalat için PLA, ABS, PETG malzemeler mekanik özelliklerin değerlendirildiği çalışmalar Acar Yavuz vd. (2021); Erdaş, Yıldız B. ve Yıldız A. (2024); Eryıldız (2022); Kopar ve Yıldız, (2023); Kuruoğlu, Akgün ve Demir (2022); Kumar vd. (2022); Güdür, Türkoğlu ve Eren (2023) mevcuttur. PLA, ABS, PETG malzemelerin özellikleri karşılaştırılması Şekil 3'te gösterilmiştir. Quadcopter kolu için kullanılan malzemelerin mekanik özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 3. PLA, ABS, PETG malzemelerin özelliklerine genel bakış (Markforged, t.y.)

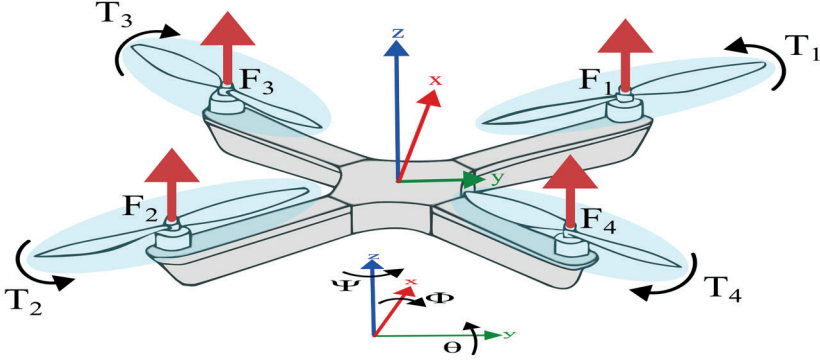
Tablo 1. Mekanik özellikler

Özellikler	Birim	PLA	ABS	PETG
Yoğunluk	g/cm ³	1,00 - 3,41	1,01 - 1,20	1,18 - 1,37
Young Modülü	GPa	3,450	2,390	2,100
Bulk Modülü	GPa	4,107	3,944	4,118
Kayma Modülü	GPa	1,268	0,854	0,742
Poisson Oranı	-	0,399	0,360	0,415
Akma Gerilmesi	MPa	17 - 64	13 - 74	28,3 - 101
Kopma Gerilmesi	MPa	13 - 64	22,1 - 110	20 - 100

Kaynak: MatWeb.com; Vieira, Machado ve Neto (2020)

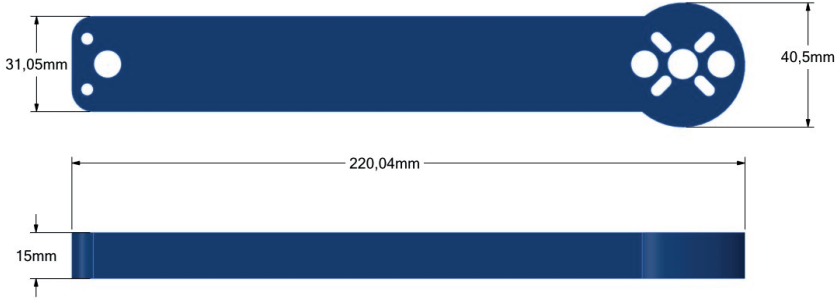
Drone etki eden kuvvetlerin tanımlanması SEA çalışmaları için önem-

lidir. Bir quadcopter için serbest cisim diyagramına göre kuvvetler ve açıları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Quadcopter serbest cisim diyagramına göre kuvvetler ve açıları yuvarlanma (roll, Φ), yalpalama-dönme (yaw, ψ), yunuslama (pitch, θ)

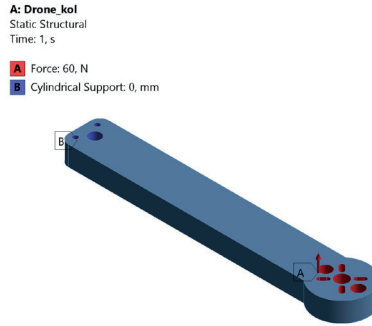
Çalışmada incelenen quadcopter kolunun SpaceClaim programında oluşturulan üç boyutlu CAD model ölçüler Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Quadcopter kolunun başlangıç CAD modeli

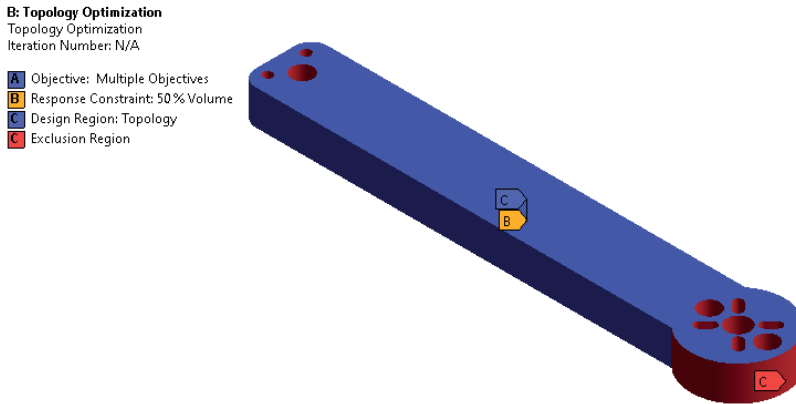
Mesh işleminde eleman boyutu 1,57 mm seçilmiştir. Mesh işlemi sonunda oluşan düğüm sayısı 126807 ve eleman sayısı 27800'dir.

Statik yapısal analiz çalışmasında kol ile gövde bağlantı noktasında silindirik destekler tanımlanmıştır. Rotor bağlantı noktasında 60 N kuvvet uygulanmıştır. Kuvvet ve destek noktaları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Statik analiz için kuvvet ve destek uygulama noktaları

Topoloji optimizasyon çalışmasında (Şekil 7’de), quadcopter kolunun gövde ve rotor bağlantı noktaları tasarım dışı bölge olarak seçilmiştir. Kolun gövdesi tasarım bölgesi olarak seçilmiştir. Şekilde topoloji optimizasyonu uygulanacak tasarım bölgesi (design region:topology) mavi renkte görülmektedir. Tasarım dışı bölge (exclusion region) kırmızı renkte görülmektedir. Optimizasyon çalışmasında yanıt kısıtı olarak %50-hacim değeri seçilmiştir.

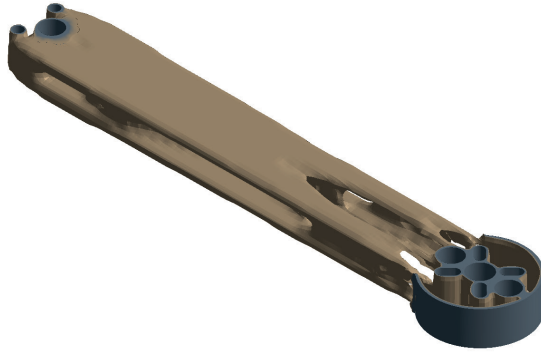


Şekil 7. Topoloji optimizasyonu kısıtları

Topoloji optimizasyonu işlemi sonrasında ulaşılan geometriye göre ilk CAD model üzerinde revizyon yapılmıştır. Nihai model üzerinde doğrulama amacıyla statik yapısal analiz uygulanmıştır. Bu analizde başlangıçtaki yük destek ve malzeme koşullar aynı tutulmuştur. Doğrulama ve başlangıçta gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

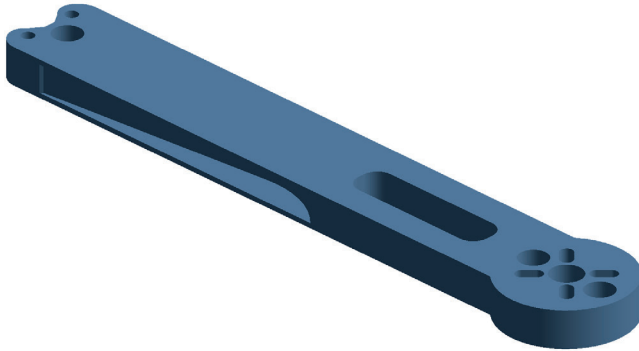
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde quadcopter kolu için Ansys programı kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları sunulmuştur. Çalışma üç adımdan oluşmaktadır. İlk olarak statik analizler PLA, ABS, PETG malzemeler için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda statik analiz verilerine göre topoloji optimizasyonu çalışması yürütülmüştür. Quadcopter kolunun optimizasyon çalışmasında gövde ve rotor bağlantı noktaları tasarım dışı bölge olarak seçilmiştir. Malzeme boşaltımı, tasarım bölgesi olarak seçilen kolun gövde kısmında yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu sonrası oluşan geometri Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. *Topoloji optimizasyonu sonuçları*

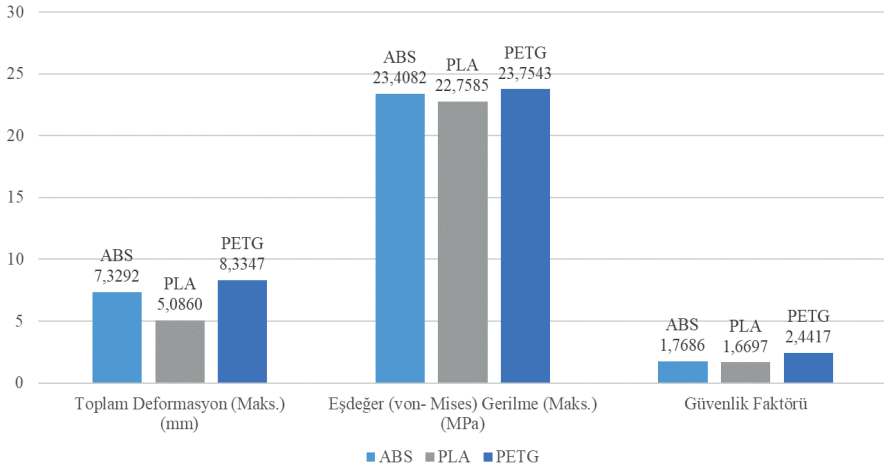
Topoloji optimizasyonu işlemi sonrasında ulaşılan geometri dikkate edilerek başlangıçtaki model üzerinde boşaltım yapılmıştır. Quadcopter kolu nihai CAD modeli Şekil 9’da gösterilmiştir.



Şekil 9. *Nihai geometri*

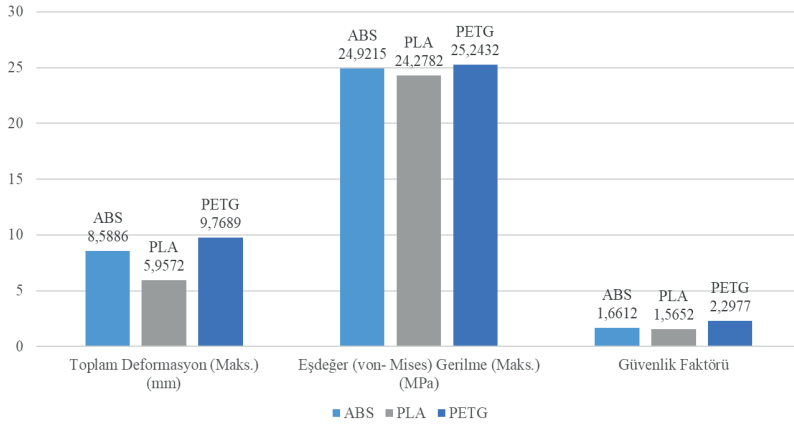
Son adımda başlangıçta uygulanan statik analiz yük ve destek noktaları değiştirilmeden doğrulama amacıyla nihai geometri üzerinde statik analizler tekrarlanmıştır.

ABS, PLA ve PETG malzemeler için başlangıç statik yapısal analizlerde elde edilen toplam deformasyon, eşdeğer (von Mises) gerilme ve güvenlik faktörü değerleri Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Toplam deformasyon değerleri PETG'de 8,3347 mm, ABS'de 7,3292 mm ve PLA'da 5,0860 mm'dir. Eşdeğer (von- Mises) gerilme değerleri PETG'de 23,7543 MPa, ABS'de 23,4082 MPa ve PLA'da 22,7585 MPa'dır. Güvenlik faktörü için en yüksek değer 2,4417 ile PETG'de görülmüştür. Güvenlik faktörü ABS'de 1,7686 ve PLA'da 1,6697 değerindedir. Güvenlik faktörü değerleri ABS, PLA ve PETG malzemeleri için 1,5'ten büyük olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Başlangıç statik analiz sonuçları

Topoloji optimizasyonu sonrasında statik analizler başlangıç şartlarında (yük ve destek koşulları sabit tutularak) tekrarlanmıştır. ABS, PLA ve PETG malzemeler için doğrulama statik yapısal analizlerde elde edilen toplam deformasyon, eşdeğer (von Mises) gerilme ve güvenlik faktörü değerleri Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Toplam deformasyon değerleri PETG'de 9,7689 mm, ABS'de 8,5886 mm ve PLA'da 5,9572 mm'dir. Eşdeğer (von- Mises) gerilme değerleri PETG'de 25,2432 MPa, ABS'de 24,9215 MPa ve PLA'da 24,2782 MPa'dır. Güvenlik faktörü için en yüksek değer 2,2977 ile PETG'de görülmüş ve ABS için 1,6612 iken PLA için 1,5652 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Doğrulama statik analiz sonuçları

Başlangıç ve nihai model için kütle değişim tüm malzemeler için %21,12 azalma olarak tespit edilmiştir. Tablo 2’de kütle değişimleri değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Kütle değişimi

Malzeme	Başlangıçtaki Kütle (kg)	Nihai Kütle (kg)	Yüzde (%) azalma
ABS	0,101431	0,080006	%21,12
PLA	0,121912	0,096161	%21,12
PETG	0,125813	0,099239	%21,12

4. SONUÇ

Bu çalışmada, bir quadcopter kolu için Ansys programı kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 3D yazıcılarda yaygın kullanılan filament malzemesi olan PLA, ABS ve PETG kullanılmıştır. Kolun tasarımını iyileştirmek amacıyla topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Elde edilen geometriye göre ilk model üzerinde değişiklik yapılmıştır. Başlangıç ve nihai model için gerçekleştirilen statik yapısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ulaşılan sonuçların değerlendirmesi aşağıda listelenmiştir.

– Eşdeğer (von- Mises) gerilme değerleri başlangıca göre; PETG %6,268, ABS %6,465 ve PLA %6,678 artmıştır.

– Toplam deformasyon değerleri başlangıca göre; PETG %17,208, ABS %17,183 ve PLA %17,129 artmıştır.

– Güvenlik faktörü değerleri başlangıç değerine göre; PETG %5,898, ABS %6,073 ve PLA %6,259 artış görülmüştür.

– Tasarım kütlelerinde ilk modele göre PLA, ABS ve PETG malzemeler için %21,12 azalma sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Acar Yavuz, G., Gören Kiral, B., Katre, S., Atilla, D. (2021). Effects of topology and material on mechanical properties of structures produced by the additive manufacturing method. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(69), 755-765. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236905>
- Ahmad, F., Kumar, P., Patil, P. P., & Kumar, V. (2021). FEA based frequency analysis of unmanned aerial vehicle (UAV). *Materials Today: Proceedings*, 46, 10396–10403. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.740>
- Ahmed, M.F., Zafar, M.N., & Mohanta, J.C. (2020). Modeling and analysis of quadcopter F450 frame. *International Conference on Contemporary Computing and Applications (IC3A)*, 196-201. <https://doi.org/10.1109/ic3a48958.2020.233296>
- Aktürk, U. (2016). Quadcopter tasarımı ve kuvvet analizi. [Yayımlanmamış Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük.
- Ali, K. M., Tawafik, M. A., & Jaber, A. A. (2023). Quadcopter topology optimization based on impact analysis. *AIP Conf. Proc. 22 December 2023*; 2977 (1): 030022. <https://doi.org/10.1063/5.0182388>
- Balayan, A., Mallick, R., Dwivedi, S., Saxena, S., Haorongbam, B., & Sharma, A. (2024). Optimal design of quadcopter chassis using generative design and lightweight materials to advance precision agriculture. *Machines*, 12(3), 187. <https://doi.org/10.3390/machines12030187>
- Basit, A., Awais, M., Ullah, M., Shah, S. U. A. & Khalil, M. K. (2021). *Design and fabrication of a quadcopter delivery drone* [Unpublished Thesis]. University of Engineering and Technology, Department of Mechanical Engineering, Peshawar, Pakistan.
- Bay, B. & Eryıldız, M. (2024). Design and analysis of a topology-optimized quadcopter drone frame. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(2), 427-437. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1316791>
- Bright, J., Suryaprakash, R., Akash, S., & Giridharan, A. (2021). Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1012(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1012/1/012019>
- Brischetto, S., & Torre, R. (2021). Preliminary finite element analysis and flight simulations of a modular drone built through fused filament fabrication. *Journal of Composites Science*, 5(11), 293. <https://doi.org/10.3390/jcs5110293>
- Çağan, S. Ç., & Buldum, B. B. (2019). İnsansız hava araçlarında kullanılan malzemeler. *Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi*, 2019(1), 35-52.
- Çaşka, S., Gök, K., Aydın, M. ve Özdemir, İ. (2020). Finite element method based structural analysis of quadcopter UAV chassis produced with 3D printer. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University (044)*, 24-32.
- de Oliveira, T. L., & de Carvalho, J. (2021). Design and numerical evaluation of quad-

- rotor drone frame suitable for fabrication using fused filament fabrication with consumer-grade ABS. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(9). <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03160-9>
- Elmas, E. E., & Alkan, M. (2023). Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 929-940. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1037319>
- Erdaş, M. U., Yıldız, B. S. & Yıldız, A. R. (2024). Experimental analysis of the effects of different production directions on the mechanical characteristics of ABS, PLA, and PETG materials produced by FDM. *Materials Testing*, 66(2), 198–206. <https://doi.org/10.1515/mt-2023-0206>
- Eryıldız, M. (2022). Estimation of three-point bending behavior using finite element method for 3D-printed polymeric sandwich structures with honeycomb and reentrant core. *European Mechanical Science*, 6(3), 196-200. <https://doi.org/10.26701/ems.1101832>
- Guliaev, N. (2017). *The design, construction and implementation of an autonomous outdoor quadcopter using an RPi microcomputer and a multiwii flight controller* [Unpublished Thesis]. Saimaa University of Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering and Production Technology, Lappeenranta, Finland.
- Güdü, C., Türkoğlu, T., & Eren, İ. (2023). Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(2), 561-570. <https://doi.org/10.55546/jmm.1357217>
- Günay, M. B., & Korkut, İ. (2023). Dron için hareketli kol tasarımında sistematik inovasyon geliştirme. *Politeknik Dergisi*, 1-1. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1202113>
- Ibrahim, S., Alkali, B., Oyewole, A., Alhaji, S. B., Abdullahi, A. A. & Aku G, İ., (2021). Structural integrity study for a quadcopter frame to be deployed for pest control. *Evergreen*, 8(3), 667–672. <https://doi.org/10.5109/4491843>
- Kocamer, A., Çınar, H., Uzun, M., Çoban, S. (2023). Structural comparison of vertical and horizontal layout of carrying arms of rotary-wing UAV with finite element analysis. *European Mechanical Science*, 7(2), 122-127. <https://doi.org/10.26701/ems.1242693>
- Koç, C. (2017). Design and development of a low-cost uav for pesticide applications. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University (JAFAG)*, 34(1), 94-103. <https://doi.org/10.13002/jafag4274>
- Kopar, M. & Yildiz, A. R. (2023). Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique. *Materials Testing*, 65(12), 1795–1804. <https://doi.org/10.1515/mt-2023-0202>
- Köse, O. & Oktay, T. (2019). Dynamic modeling and simulation of quadrotor for different flight conditions. *European Journal of Science and Technology*, (15), 132-142. <https://doi.org/10.31590/ejosat.507222>

- Kumar, R., Sharma, H., Saran, C., Tripathy, T. S., Sangwan, K. S., & Herrmann, C. (2022). A Comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*, 107, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>
- Kuruoğlu, Y., Akgün, M. & Demir, H. (2022). FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 358-369. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923>
- Markforged (t.y). *3D Printing Materials*. (21.07.2024) tarihinde <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/how-do-3d-printers-work/3dprinting-materials> adresinden erişilmiştir.
- Rizon, M., Ang, C. K., Solihin, M. I., M. R., Z., Desa, H., A. B., S., Khairunizam, W., & Zunaidi, I. (2020). Effects of variable arm length on UAV control systems. *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*, 25, 317–322. <https://doi.org/10.5954/icarob.2020.os10-1>
- Song, X., Li, X., & Mao, Q. (2023). Application of topology optimization technology based on inspire and 3d printing in lightweight design of quadrotor UAV. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 28(1): 45-58. DOI:10.13434/j.cnki.1007-4546.2023.0104
- Urdea, M. (2021). Stress and vibration analysis of a drone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1009(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1009/1/012059>
- Vieira, S. A., Machado, M. V., & Neto, R. M. F. (2020). *Temperature influence in modal analysis for vibration measurement systems with polymer structure*. 1st Brazilian Conference on Additive Manufacturing.
- Yıldırım, Ş. & İşci, M. (2023). Performance analysis of multi rotor drone systems with changeable rotors. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 14(1), 45-57. <https://doi.org/10.1556/1848.2021.00413>
- Yıldız B. (2023). Yeni bir hibrid metasezgisel algoritma ile drone kolunun yapısal optimizasyonu. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 21(2), 74-80. <https://doi.org/10.56193/matim.1302774>