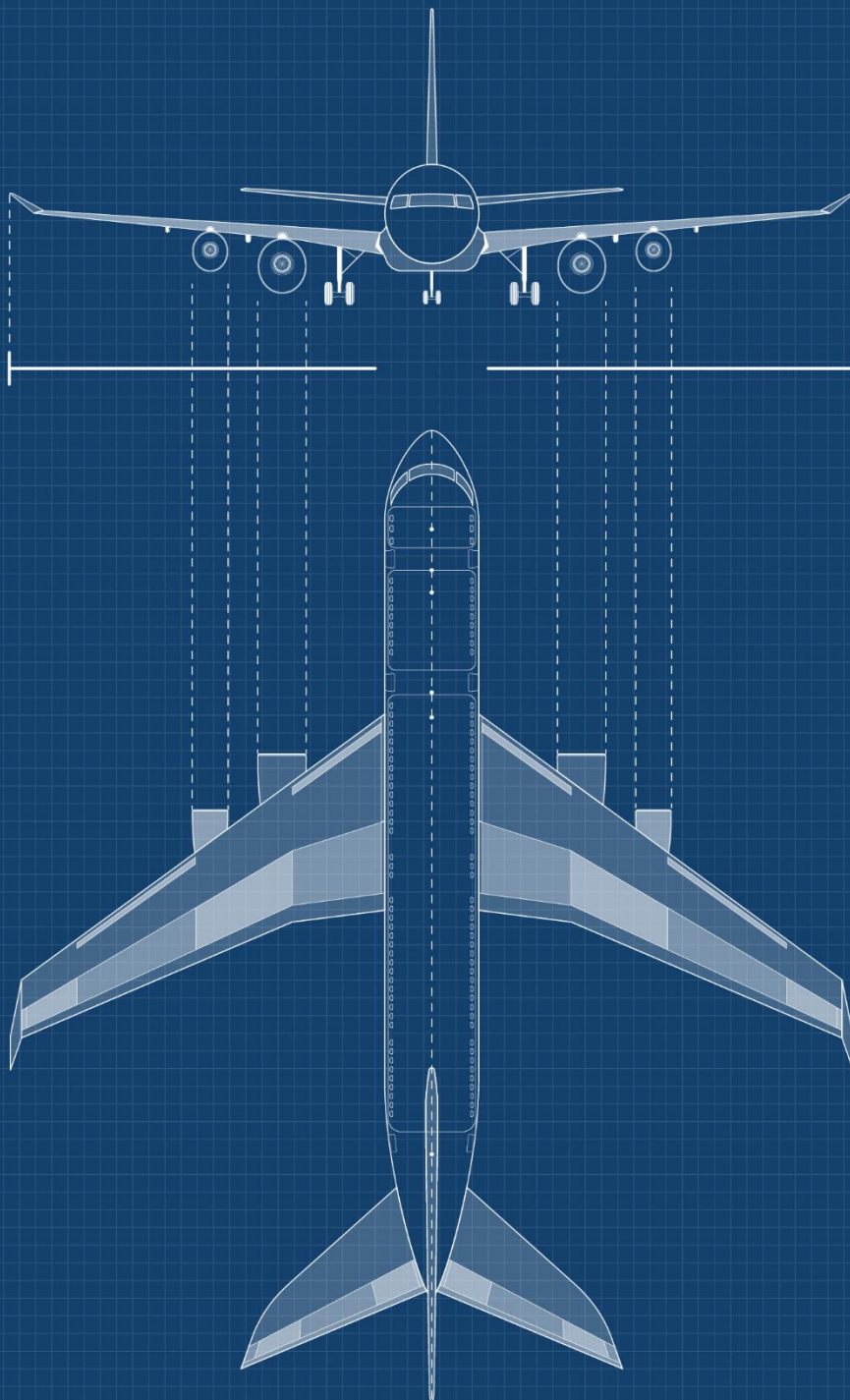


VOLUME: 3 ISSUE: 2

ASREL

Aerospace Research Letters



NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
AEROSPACE RESEARCH LETTERS (ASREL)

E- ISSN: 2980-0064

Cilt/Volume: 3, Sayı/Issue: 2 (Aralık / December 2024)
Uluslararası Hakemli Dergi / International Peer Reviewed Journal

Sahibi / Owner
Necmettin Erbakan Üniversitesi / Necmettin Erbakan University

Editör / Editor-in-Chief
Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Yardımcı Editör/ Associate Editor
Dr. Öğr. Üyesi Furkan KORKMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÇINAR

Yayın Türü / Publication Type
Sürelî Yayın / Periodical

Yayın Periyodu / Publication Period
Yılda 2 kez yayınlanır (Haziran ve Aralık) / Published twice-annual (June and December)

Baskı Tarihi / Print Date
Aralık / December 2024

Yazışma Adresi / Correspondence Address
Necmettin Erbakan Üniversitesi Köyceğiz Yerleşkesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi
Dekanlığı, Köyceğiz Mah. Demeç Sok. No:42/C PK: 42140 Meram/ KONYA

Tel / Phone: (0 332) 325 20 34

Web: <https://www.asreljournal.com>
E-posta / E-mail: info@asreljournal.com

ASREL yılda 2 kez yayınlanan uluslararası hakemli bir dergidir /
ASREL is an international peer reviewed twice-annual journal

Baş Editör / Editor-in-Chief

Doç. Dr. Mehmet Emin ÇETİN, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Editör Yardımcıları / Associate Editor

Dr. Öğr. Üyesi Furkan KORKMAZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÇINAR, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Dil Editörü / Language Editor

Arş. Gör. Dr. Enes GÜNALTILI, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

İstatistik Editörü / Statistics Editor

Arş. Gör. Dr. Ersin AKTAŞ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Yazım Editörü / Copy Editor

Arş. Gör. Saliha KÖPRÜCÜ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Mizanpaj Editörü / Layout Editor

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Tevfik HEBEBCİ, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Danışma Kurulu

Prof. Dr. Mesut UYANER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Ahmet Salih YİĞİT, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Ömer Faruk KESER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Ferhat KADIOĞLU Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Sabri KOÇER Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Bilim Kurulu

Doç. Dr. Hasan ULUS, Selçuk Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL, Amasya Üniversitesi, Türkiye

Dr. Öğr. Üyesi Metin UZUN, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Sezer ÇOBAN, İskenderun Teknik Üniversitesi, Türkiye

Dr. Yusuf DİKİCİ, Case Western Reserve Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletleri

Dr. Murillo Ferreira DOS SANTOS, CEFET-MG, Brezilya

Shekhar MAHMUD, Military Technological College, Umman

Dr. Yusuf Furkan UĞURLUOĞLU, Newcastle Üniversitesi, İngiltere

Dr. Muhammed Burak AĞIR, Manchester Üniversitesi, İngiltere

Dr. Ekrem EKİCİ, Cambridge Üniversitesi, İngiltere

Dr. Ali BEKAR, Birmingham Üniversitesi, İngiltere

Bilge Kağan AÇIKGÖZ, Birmingham Üniversitesi, İngiltere

Dr. Abdul HYE, Qdot Technology, İngiltere

Dr. Müge BEKAR, Abdullah Gül Üniversitesi, İngiltere

Abdullah KURTOĞLU, Case Western Reserve Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletleri

Dr. Nursaid POLATER, Bozok Üniversitesi, Türkiye

Dr. Ömer Faruk KOÇ, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye

Doç. Dr. Muhammet DEMİRTAŞ, Samsun Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Mesut UYANER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Muammer ÖZGÖREN, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Ömer Faruk KESER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Prof. Dr. Sabri KOÇER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Mahmut Sami BÜKER, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Beyzanur ÇAYUR ERVURAL Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

Doç. Dr. Güzide KARAKUŞ, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Türkiye

İçindekiler / Contents

Makale adı / Tittle of the article Yazar(lar) / Author(s)	Sayfa/Page
Adaptif Kontrolcü Tasarımı Kullanılarak Laboratuvar Helikopteri Üzerinde Adaptasyon Hız Değişkeni Etkisinin İncelenmesi Investigation of the Effect of Adaptation Rate Variable on a Laboratory Helicopter Using Adaptive Controller Design <i>Bedrettin Mahmut KOCAGIL, Engin Hasan ÇOPUR, Metin U. SALAMCI</i>	79-96
Uydular ve Türkiye'nin Uydu Çalışmalarının SWOT Analizi Satellites and SWOT Analysis of Türkiye's Satellite Studies <i>Ozan ÖZTÜRK</i>	97-112
Design of a Multi-Purpose Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle Çok Amaçlı Dikey Kalkış İniş Yapabilen Hava Aracının Tasarımı <i>Berat Taha ÇETİN, Cansu AYGÜN, Onur TOPRAK, Sueda ÇELİK</i>	113-126
Examination of Vision and Organizational Value Statements in Air-Cargo Companies Havayolu Kargo İşletmelerinde Vizyon ve Örgütsel Değer ifadelerinin İncelenmesi <i>Işık ÇİÇEK</i>	127-141
Uydu Verileri ile Bulut Tespiti için Makine Öğrenmesi Yaklaşımı Machine Learning Approach for Cloud Detection with Satellite Data <i>Sabri KOÇER, Yasin ER</i>	142-157
Numerical and Analytical Free Vibration Analysis of Composite Plate with Auxetic Core Layer and Functionally Graded Surface Layers Auxetik Çekirdek Katmanına ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Yüzey Katmanlarına Sahip Kompozit Plakanın Sayısal ve Analitik Serbest Titreşim Analizi <i>Kerim Gökhan AKTAŞ, Mehmet Ali GÜVENÇ</i>	158-174
CoCrFeNi Bazlı Yüksek Entropili Alaşımlarda Molibden Katkısının Mikroyapı ve Nanosertlik Üzerindeki Rolü The Role of Molybdenum Addition on the Microstructure and Nanohardness of CoCrFeNi-Based High Entropy Alloys <i>Veysel Murat BOSTANCI, Tuğba Selcen ATALAY KALSEN</i>	175-187

Adaptif Kontrolcü Tasarımı Kullanılarak Laboratuvar Helikopteri Üzerinde Adaptasyon Hız Değişkeni Etkisinin İncelenmesi

Bedrettin Mahmut KOCAGIL^{1*} Engin Hasan ÇOPUR² Metin U. SALAMCI³

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzak Mühendisliği, Konya, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 31.10.2024
Kabul Tarihi: 18.11.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:
Model referans adaptif kontrol,
Doğrusal olmayan kontrol,
Adaptasyon hızı.

ÖZET

Model Referans Adaptif Kontrolcüler (MRAK), modellenememiş dinamiklere ya da parametre belirsizliklerine sahip sistemler için uygun ve kullanımına sıkça başvurulmuş kontrolcü tasarımlarıdır. MRAK tasarımlarında en önemli husus, seçilen bir referans sistem ile kontrol edilmek istenen sistem arasındaki hata değerinin sıfırlanması ya da makul bir değere düşmesidir. Hata değeri kontrolcü tarafından zaman ilerledikçe azaltılsa da, referans sistemin her zaman aralığında olabildiğince düzgün takip edilmesi de istenir. Bu sebeple, adaptasyon kuralı oluşturulurken, referans model cevabına yakınsama hızı da uygulamalar açısından önem taşır. Yakınsama hızı da doğrudan adaptasyon hızı ile ilişkilidir. Konvansiyonel adaptasyon kuralı tasarımları, adaptasyon hızı çok büyük değerlere sahip olmadığı sürece takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olması durumlarıyla yeterli ölçüde başa çıkamayabilir. Bazı durumlarda kontrol edilmek istenen sistemin dinamiği ile ilgili apriori bilgiler gerekebilir, bu bilgilerin olmadığı durumlarda adaptasyon hızının çok büyük değerlerde olması dahi adaptasyonda başarı sağlamayabilir. Ayrıca, sistem dinamiğinin ilgili referans model dinamiği ile uyumu da adaptasyonda başarı ve daha iyi takip ihtimalini güçlendirebilir. Bu amaçla çalışma kapsamındaki referans model, klasik yöntemlerin aksine, kontrol edilmek istenen fiziksel sistemin doğasına çok daha uygun gelen doğrusal olmayan matematiğe sahip bir sistem olarak ele alınmıştır. Bu araştırmanın konusu, adaptasyon kuralında önemli rol oynayan adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye sahip fiziksel bir sistem üzerindeki etkinliğinin irdelenmesidir. Bu irdeme, önerilen MRAK tasarımının özelinde, üç serbestlik dereceli bir helikopter sisteminin benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır. Test edilen her bir MRAK, adaptasyon hızı haricindeki değişkenler farklılaştırılmadan ele alınmış ve değişen adaptasyon kurallarıyla, referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir.

Investigation of the Effect of Adaptation Rate Variable on a Laboratory Helicopter Using Adaptive Controller Design

Article Info

Received: 31.10.2024
Accepted: 18.11.2024
Published: 31.12.2024

Keywords:

Model Reference adaptive control,
Nonlinear control,
Adaptation rate.

ABSTRACT

Model Reference Adaptive Controllers (MRAC) are widely used control designs suitable for systems with unmodeled dynamics or parameter uncertainties. The primary goal in MRAC design is to minimize or eliminate the error between the selected reference model and the system to be controlled. While the controller reduces the error over time, smooth tracking of the reference model at all times is also desired. Therefore, the convergence rate to the reference model response, directly linked to the adaptation rate, is crucial when designing the adaptation rule. Conventional adaptation rule designs may struggle with large or rapid tracking error changes unless the adaptation rate is set to very high values. In some cases, a priori knowledge of the system's dynamics may be required, as even high adaptation rates may not guarantee success without such information. Additionally, compatibility between system dynamics and reference model dynamics can significantly enhance adaptation success and tracking performance. In this study, the reference model is designed as a nonlinear system, more suitable for the nature of the physical system being controlled compared to classical methods. The research investigates the impact of the adaptation rate variable, a key factor in the adaptation rule, on a physical system controlled with an MRAC designed using a nonlinear reference model. A three-degree-of-freedom helicopter system is simulated to evaluate the proposed MRAC design. Comparisons are made across two axes for helicopter position control. Each MRAC configuration is tested with identical variables, except for the adaptation rate, to assess how well the reference system is followed under different adaptation rules.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Kocagil, B. M., Çopur, E. H., & Salamcı, M. U. (2024). Adaptif kontrolcü tasarımı kullanılarak laboratuvar helikopteri üzerinde adaptasyon hız değişkeni etkisinin incelenmesi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 79-96. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.2>

*Sorumlu Yazar: Bedrettin Mahmut KOCAGIL, mahmutkocagil@gazi.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Model Referans Adaptif Kontrolcüler (MRAK), modellenememiş dinamiklere ya da parametre belirsizliklerine sahip sistemler için uygun ve kullanımına sıkça başvurulmuş kontrolcü tasarımlarıdır. Anlaşılacağı üzere bu kontrolcü tasarımlarının en önemli özelliği, deterministik model yaklaşımında kontrol edilmek istenen sistem modeli için bir kesinlik gerektirmemesidir. Belirsizlik içeren sistem cevabı, tasarımcı tarafından istenen sistem cevabını sergileyen referans bir sistem seçilerek/tasarlanarak belirlenmeye çalışılır. Ardından kontrolü hedeflenen değişkenlerin iki sistem arasındaki farkını minimize etmeye çalışan bir yapı oluşturulur ve bu yapı terminolojide adaptasyon kuralı olarak adlandırılır (Landau, 1979). Bu sayede adım adım güncellenen adaptasyon kuralı takip hatasını zamanla kapatır ve istenen referans sistem cevabının takibi gerçekleştirilir.

Başlangıç paragrafında bahsedildiği üzere MRAK, kontrol edilmek istenen sistemde meydana gelen değişikliklere karşı adaptasyon kurallarının oluşturulması sayesinde kontrol parametrelerinin anında güncellenmesine olanak sağlar. Parametre belirsizliklerine sahip bir sistemin MRAK'si için oluşturulan adaptasyon kuralı ise, genellikle Lyapunov Kararlılık Teoremi kullanılarak elde edilmektedir (Krstić ve ark., 1995). Bu teoreme göre inceleme sonucunda adaptasyon kuralı genellikle, sistem kararlılığını sağlayacak türevsel bir terime karşılık gelmektedir. Parametre belirsizliği özelinde oluşturulan bu kural sayesinde de sistem için MRAK kazanç katsayı matrisi tahmini yapılmaktadır. Kısaca özetlenen bu sürecin önemli aşamalarından biri, kuşkusuz türevsel bir terim olarak elde edilen adaptasyon kuralının değişim miktarıdır. Bu değişim miktarının istenen biçimde ayarlanabilmesine olanak sağlayan “adaptasyon hızı (öğrenme hızı)” teriminin, adaptasyon kuralının bir değişkeni olacak şekilde tanımlanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bunun doğal bir sonucu olarak adaptasyon hızı, kazanç katsayı matrisini direkt etkileyen önemli bir parametre konumundadır (Sastry & Bodson, 1989).

Adaptasyon hızı değişkeni, genellikle, kazanç katsayı matrisi tahmininin bir değere yakınsamasını hızlandırma amacıyla kullanılır. Yakınsama hızının artması için doğal olarak adaptasyon hızı da artırılmalıdır ancak bu artış hızını kısıtlayan faktörler bulunabilir. Örneğin, gereğinden büyük değerlerde seçilmiş adaptasyon hızı değişkeni, parametre belirsizliğine ya da modellenmemiş dinamiklere sahip bir kontrol sisteminin dış bozulmalara karşı hassasiyetini artırması sonucu sistem kararlılığının bozulmasına varan olumsuz etkilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle, istenen seviyede bir kontrol performansı yakalama ya da bu performansı iyileştirme adına yapılabilecek adaptasyon hızı değişikliklerinde dikkatli olunması gerekliliğine literatürde sıkça yer verilmektedir (Egardt, 1979; Landau ve ark., 2011). Bu değişkenin büyük değerleri kullanılarak MRAK performansının iyileştirilme hususu, kontrol terminolojisinde hızlı adaptasyon ismiyle anılmaktadır (Friedland, 1996). Hızlı adaptasyona başvurulmuş adaptif kontrolcülerde değişken değeri seçiminin, kapalı-döngü kararlılığına tesir etmesi bakımından önemi ortaya konulmaktadır. Bu durum, MRAK'ye sahip sistemlerde adaptasyon hızının artırılması sonucu, referans sistemle ilintili takip hatası düşürülerek istenen seviyede bir kontrol performansı elde edilmek istendiğinde, gürbüzlüğün -çokça bilindiği üzere- azalması sonucunu da destekler niteliktedir (Ioannou & Sun, 1996).

Farklı tasarım yapılarına sahip MRAK'lerle birlikte kullanılmış adaptasyon hızı değişkeni, doğrusal davranış sergileyen sistemlerde, sistem cevap ve kararlılıklarına olan etkileri bu alanda çalışan birçok bilim insanı tarafından incelenmiştir (Landau, 1979; Åström & Wittenmark, 1995; Krstić ve ark., 1995). Değişkenin sabit sayılarla sıkça kullanımının yanı sıra, zamanla değişen yapıya sahip kullanımı da görülmektedir. Bu kullanımda, en küçük kareler tekniğinin kullanıldığı parametre tanımlama yöntemindeki zamanla değişen kovaryans matrisine, tıpkı adaptasyon hızı değişkeni gibi davranış sergiletilmesi, en yaygın örneklerden biri olarak göze çarpmaktadır (Bitmead ve ark., 1990). Zamanla değişen MRAK yapılarında kullanımı öne çıkan bir diğer yöntem de normalizasyondur ve bahsi geçen her iki teknik de hızlı adaptasyon ile gürbüzlük arasında dengenin gözetilmesini hedeflemektedir

(Bitmead ve ark., 1990). Farklı ve son bir örnek olarak, zaman-gecikmeli sistemlerde kapalı-döngü kararlılığının sağlanabilmesi için adaptasyon hızı değişkeninin keyfi seçiminden ziyade, üstten sınırlandırılması gerektiği bilinmektedir (Landau ve ark., 2011).

Adaptasyon hız değişkeni için son yıllarda da öneriler getirilmeye ve farklı sistemlerde oluşturduğu etkilerin incelenmesine devam edilmektedir. Değişken adaptasyon (öğrenme) hızı kullanan bir sinir ağı modelini referans model kabul eden bir adaptif kontrolcü algoritması yeni önerilerden biridir (Slama ve ark., 2019). Adaptasyon hızının sinir ağı eğitim hızını doğrudan etkilediğini göstermişlerdir. Slama ve arkadaşları, öğrenme sürecini kayda değer şekilde hızlandırabilen ve aynı anda öğrenme sürecinin kararlılığını sağlayabilen bir eğitim algoritmasını, değişken bir adaptasyon hızı kullanan kontrolcü için sunmaktadırlar. Bir diğer farklı çalışmada, yapay zeka-insan etkileşimi ile yürütülen bir deneyde farklı adaptasyon hızlarının etkisi incelenmiştir (İsa ve ark., 2024). İsa ve arkadaşları, yapay zekanın adaptif algoritmasındaki adaptasyon hızı değişikliklerinin, iki oyunculu-sürekli oyunlarda davranış tahminlerini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sonuçlarında, yapay zeka adaptasyon hızının insan davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve sonucu değiştirme yeteneğine sahip olduğunu göstermişlerdir. Yavaş adaptasyon hızının sonucu Nash oyun teorisi dengesine doğru kaydırıldığını, hızlı adaptasyonun ise sonucu insan liderliğindeki Stackelberg dengesine doğru kaydırıldığını gözlemlemişlerdir. Havacılık uygulamalarına yönelik bir çalışma ise, dört pervaneli insansız hava aracı (quadrotor) için farklı adaptasyon hızlarının klasik MRAK'lerde incelenmesidir (Tosun & Işık, 2023). MRAK mimarisine göre farklı referans modelleri ve adaptasyon hızlarını benzetim yoluyla test etmişlerdir. Tosun ve Işık, istedikleri sonuçları veren referans model ve parametrelerle Quanser firmasının üretmiş olduğu Qball-X4 test düzeneğinin gerçek zamanlı adaptif kontrol uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.

Konvansiyonel adaptasyon kuralı tasarımları, adaptasyon hızı çok büyük değerlere sahip olmadığı sürece takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olması durumlarıyla yeterli ölçüde başa çıkamayabilir. Anahtarlamalı kontrol şemaları takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olduğu durumlar için bir alternatif olabilmektedir (Zhang, 2010). Yine de bazı durumlarda kontrol edilmek istenen sistemin dinamiği ile ilgili apriori bilgiler gerekebilir, bu bilgilerin olmadığı durumlarda adaptasyon hızının çok büyük değerlerde olması dahi adaptasyonda başarı sağlamayabilir. Buna ilave olarak, sistem dinamiğinin ilgili referans model dinamiği ile uyumu da adaptasyonda başarı ve daha iyi takip ihtimalini güçlendirebilir. Bu motivasyonla referans model, klasik yöntemlerin aksine, kontrol edilmek istenen fiziksel sistemin doğasına çok daha uygun gelen doğrusal olmayan matematiğe sahip bir sistem olarak ele alınmıştır. Bahsedilen bilgilendirmeler ışığında bu araştırmanın konusu, adaptasyon kuralında önemli rol oynayan adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye (Kocagil ve ark., 2018) sahip fiziksel bir sistem üzerindeki etkinliğinin irdelenmesidir. Bu irdeme, giriş kısmında bahsi geçen -doğrusal davranış sergileyen-sistemlerdeki teorik yaklaşımlardan ziyade, önerilen MRAK tasarımının üç serbestlik dereceli bir helikopter sisteminde benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır. Test edilen her bir MRAK, adaptasyon hızı haricindeki değişkenler farklılaştırılmadan ele alınmış ve değişen adaptasyon kurallarıyla referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir.

YÖNTEM

MRAK yönteminde sistem girdisine arzu edilen cevabı üretebilen herhangi bir sistem referans model olarak tanımlanabilir. Yöntem, belirsizliğe sahip sistem ile referans sistem arasındaki takip hatasını en aza indirgeyecek kazanç katsayılarını bulmak üzerine kuruludur. MRAK kazanç katsayıları, tasarlanan adaptasyon kuralının gerektirdiği kurala bağlı bir şekilde, önceden belirlenmiş ya da değişken işlem adımlarında güncelleştirilerek tahmin edilmektedir. Adaptasyon kuralı, sistemlerin çıkış

değişkenleri ile birlikte, takip hatasını da bir değişken kabul eden yapı üzerine kuruludur ve bu değişkenlerin tümünün sınırlandırılması koşuluyla Lyapunov Kararlılık Teoremi esas alınarak tasarlanır. Bu tasarım sonucunda takip hata değeri kullanılarak referans model takibini sağlayacak MRAK kazanç katsayıları, her işlem adımında hesaplanarak bulunur.

Referans Model için Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı

Durum-Uzay modelinde tanımlı olacak şekilde doğrusal olmayan bir referans model için Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) kullanılarak optimum kontrolcü tasarlanacaktır. $x_r \in \mathbb{R}^n$ referans model için durum değişkenleri vektörü, $u_r \in \mathbb{R}^m$ ($1 \leq m \leq n$) kontrol girişi, $f_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ sürekli ve türevlenebilir fonksiyon ve $g_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ olarak tanımlansın. Böylece,

$$\dot{x}_r(t) = f_r(x_r) + g_r(x_r)u_r(t), \quad x_r(0) = x_{r0} \quad (1)$$

Bir referans modeli tanımlanır. Eşitliğin sağında yer alan $f_r(x_r)$ fonksiyonunu açıkça durum bağımlı yapacak bir $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliğini sağlaması istensin.

Varsayım-1:

Eş.(1) ile tanımlanabilen bir sistem ele alınsın. Bu sistemde kontrol girişi ve tüm durum değişkenleri sıfır alındığında, sistemin denge durumu orijinde bulunuyorsa, durum bağımlı katsayı (DBK) matrisi olan $A_r(x_r)$ vasıtasıyla $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliği tanımlıdır. Eğer $f_r(0) \neq 0$ ise, uygun bir dönüşümle denge noktası orijine döndürülebilir.

Varsayım-1'e göre yazılabilen bir $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliği yardımıyla Eş.(1), durum-uzay modeli yapısında aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{x}_r(t) = A_r(x_r)x_r(t) + B_r(x_r)u_r(t), \quad x_r(0) = x_{r0} \quad (2)$$

Böylece $A_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ve $B_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ tanımlı olacak şekilde doğrusal olmayan referans model, DBK matrislerine bağlı doğrusal modele benzer biçimde gösterilebilir.

Eşitlik (2) yapısındaki matematiksel modele kontrolcü tasarımının yapılabilmesi için aşağıdaki koşulu sağlamalıdır.

Koşul-1:

$\forall x_r$ için durum bağımlı $B_r(x_r)$ matrisi $B_r(x_r) \neq 0$ koşuluyla, $\{A_r(x_r), B_r(x_r)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilir ve, $\{A_r(x_r), Q_r^{0.5}(x_r)\}$ çifti gözlemlenebilirdir.

Koşul-1 'in sağlandığı (2) eşitliği için DBRD kullanılarak doğrusal olmayan kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Tüm durumların geri beslendiği optimum kontrolcü için kontrol girişi $u_r(t) = -K_r(x_r) x_r$ ifadesi ile tasarlansın. DBRD yöntemi, aşağıda tanımlanan maliyet fonksiyonunu minimum değerine ulaştırmayı hedefler:

$$J_r = 0.5 \int_0^\infty [x_r^T(t)Q_r(x_r)x_r(t) + u_r^T(x_r)R_r(x_r)u_r(x_r)] dt \quad (3)$$

Burada $Q_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ yarı-pozitif tanımlı durum bağımlı ağırlık matrisi ve $R_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}$ pozitif tanımlı durum bağımlı kontrol girişi ağırlık matrisidir. Eş.(3)'ü minimum değerine ulaştıracak optimum kontrol girişi

$$u(x_r) = -R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r)x_r \quad (4)$$

eşitliği ile tasarlanır. (4) eşitliğindeki $P_r(x_r)$ terimi,

$$P_r(x_r)A_r(x_r) + A_r^T(x_r)P_r(x_r) - P_r(x_r)B_r(x_r)R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r) + Q_r(x_r) = 0 \quad (5)$$

eşitliği ile tanımlanan DBRD'nin simetrik, pozitif tanımlı ve tek bir çözümü olan matristir. Ayrıca, kontrolcü kazanç katsayı matrisini ifade eden $K_r(x_r) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ terimine Eş.(4) üzerinden ulaşılır:

$$K_r(x_r) = R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r) \quad (6)$$

Kapalı-döngüye sahip kararlı haldeki referans model aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\dot{x}_r(t) = (A_r(x_r) - B_r(x_r)K_r(x_r))x_r = A_{rkd}(x_r)x_r(t) \quad (7)$$

Referans sistem için tasarlanan optimum-altı DBRD kontrol yöntemi, benzetim aşamasına geçildiğinde örnekleme zamanı ile birlikte kullanılacaktır. Her bir örnekleme zamanı için, geri beslenecek durum değişkenlerinin (DBRD için tüm durumların) değerleri hesaplanır. Bu an için ulaşılan durum değişkeni değerleri, tüm DBK matrislerinin hesaplamasında kullanılarak kapalı-döngü sistemin kontrolü sağlanır. Eş. (7) için hesaplanan $A_{rkd}(x_r)$ matrisi, noktasal olarak Hurwitz kararlı matristir.

DBRD Tabanlı MRAK Tasarımı

Kontrol edilmek istenen ve doğrusal olmayan bir sistemi, tıpkı referans modelde olduğu gibi DBK matrisleri ile tanımlayıp Eş. (2) gösterimi için Varsayım-1'i de sağlayan, doğrusal benzeri bir yapıda aşağıdaki gibi ele alabiliriz:

$$\dot{x}(t) = A(x)x(t) + B(x)u(t), \quad x(0) = x_0 \quad (8)$$

Burada $A(x)$ ve $B(x)$ bilinen DBK matrisleri olarak kabul edilmişlerdir. Kontrol edilmek istenen

ve Eş.(8) yapısında tanımlı sisteme, tüm durumların geri-beslendiği bir kontrolcü tasarımı $u(t) = -K^*(x)x(t)$, aşağıda tanımlanan koşulların sağlanması ile mümkündür.

Koşul-2:

$\forall x_r$ için $K^*(x)$ kazanç katsayı matrisinin varlığı ve durum bağımlı $B(x)$ matrisi $B(x) \neq 0$ koşullarıyla, $\{A(x), B(x)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilirdir.

Yukarıda verilen Koşul-2 altında tüm durumlar için geri-beslemeli kontrolcü tasarımı yapıldığı düşünülün. O halde Eş.(8)'de verilen sistem, kapalı-döngüye sahip bir kontrol sistemi $A_{kd}(x) = A(x) - B(x)K^*(x)$ eşitliği ile gösterilebilir.

Şimdi ise Eş.(8)'de tanımlı $A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri, bilinmesi pek muhtemel olmayan DBK matrisler olarak ele alınsın. Takip hatası $e(t) \triangleq x(t) - x_r(t)$ ifadesini sıfırlamak için tüm durumların geri-beslendiği bir MRAK tasarımıyla elde edilsin. Kontrolcü tasarımı, aşağıdaki varsayıma dayandırılmaktadır.

Varsayım-2:

- i. $\forall x$ için $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin var olduğu ve durum bağımlı $B(x)$ matrisi $B(x) \neq 0$ koşullarıyla, $\{A(x), B(x)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilirdir.
- ii. $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin türevleri sınırlıdır. ($\|\dot{K}^*(x, e)\| \leq \varepsilon \leq \infty$)

Böylece kontrol girişi $u(t) = -K^*(x, e)x(t)$ eşitliği ile ifade edilen ve kapalı-döngüye sahip kontrol sisteminin, takip hatasını sıfıra götürmesi amacıyla kapalı-döngü referans sistemine (Eş.(7)) eşitleneceği bir MRAK tasarımı mümkündür:

$$A_{rkd}(x_r) = A(x) - B(x)K^*(x, e) \quad (9)$$

Eş.(9), MRAK terminolojinde uyum (ya da mükemmel uyum) koşulu olarak bilinir. Burada $K^*(x, e) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ideal kazanç katsayı matrisi olarak tanımlanır.

$A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri tam olarak bilinemediği ve uyum koşulu Varsayım-2 üzerinden oluşturulduğundan, Eş.(9)'daki $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin $K(x, e)$ tahminine ihtiyaç duyulmaktadır. MRAK'nin $K(x, e)$ tahmini için, Lyapunov kararlılık teoremine dayanan ve her adımda güncellenecek bir adaptasyon kuralı türetilir. Adaptasyon kuralının türetilmesi için Varsayım-3'e ihtiyaç duyulmaktadır.

Varsayım-3:

$\forall x$ için $B(x)$ 'in tahmini olan $\hat{B}(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ve $\hat{B}(x) = B(x)G$ eşitliğini sağlayan bir $G \in \mathbb{R}^{m \times m}$ matrisi mevcuttur.

$K(x, e)$ tahminini her adımda gerçekleştiren adaptasyon kuralı durum bağımlı olacak şekilde aşağıdaki gibi ele alınsın:

$$\dot{K}(x, e) = \hat{B}^T(x)e(t)x^T(t)P_{ad}(x, x_r) \Gamma, \quad K(x_0, e_0) = K_0 \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (10)$$

Burada K_0 , $K^*(x, e)$ için tahmin edilen $K(x, e)$ matrisinin başlangıç koşuludur. $P_{ad}(x, x_r)$ terimi de aşağıda verilen cebirsel Lyapunov denkleminin pozitif tanımlı ve başka eşi olmayan çözümüdür:

$$A_{rkd}^T(x_r)P_{ad}(x, x_r) + P_{ad}(x, x_r)A_{rkd}(x_r) = -Q_{ad}(x) \quad (11)$$

Bu çözümü sağlayan $Q_{ad}(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrisi; keyfi seçilebilen simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir.

Bu bilgiler ışığında $K(x, e)$ tahmini için Eş.(10) ile ele alınan adaptasyon kuralı, Teorem-1 kullanılarak türetilir:

Teorem-1:

Tüm durum değişkenlerinin geri beslendiği adaptif kontrolcü tasarımı, $u(t) = -K(x, e)x(t)$, Eş.(10) ile verilmiş adaptasyon kuralı ile birlikte Eş.(8) yapısında bir sisteme uygulandığında, doğrusal olmayan ve kapalı-döngüye sahip kararlı bir kontrol sistemi elde edilir. Kapalı-döngü kontrol sisteminin $x(t)$, $e(t)$ ve $u(t)$ sinyalleri sınırlıdır ve zaman içerisinde kontrol sisteminin durum değişkenleri $x(t)$, referans sistemin durum değişkenleri $x_r(t)$ 'ye Barbalat yardımcı teoremine göre yakınsamak zorundadır. Bu durumda $t \rightarrow \infty$ iken takip hatası, $e(t) \rightarrow 0$ olmalıdır. (İspatı için bkz. Kocagil ve ark., 2018).

Kontrolü MRAK ile sağlanan sistem, referans model kontrolcü tasarımında kullanılan DBRD yöntemindeki gibi noktasal kararlılık açısından değerlendirilmektedir. Her bir örnekleme zamanı için, geri beslenecek tüm durum değişkenlerinin değerleri hesaplanır. Bu an için ulaşılan durum değişkeni değerleri, tüm DBK matrislerinin hesaplamasında kullanılarak kapalı-döngü sistemin kontrolü sağlanır.

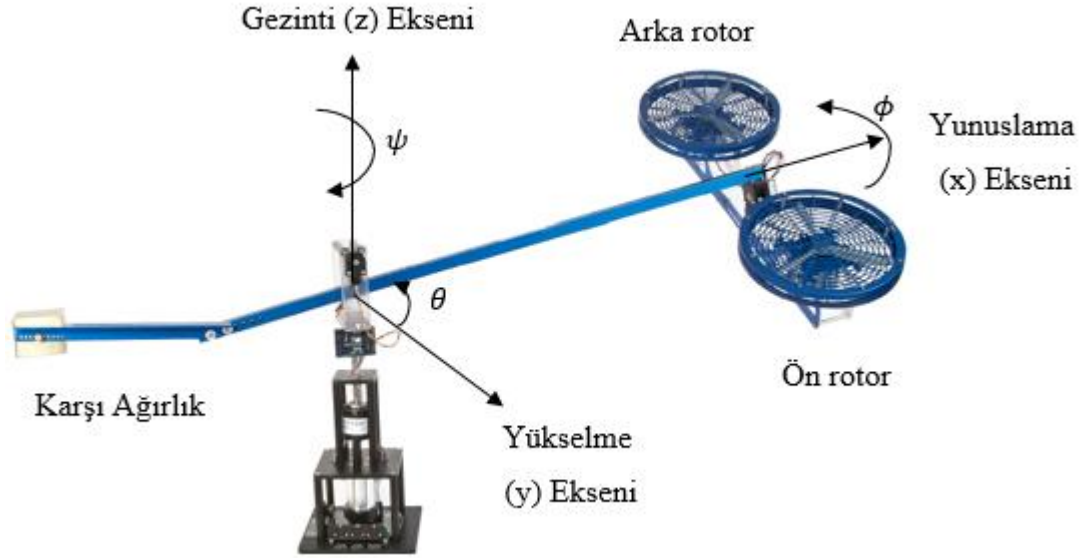
BENZETİM MODELİ

Benzetimi yapılmış olan fiziksel sistem, üç serbestlik derecesine sahip (SDS) olan ve Quanser firması lisansı ile piyasaya sürülmüş tandem rotorlu yapıda laboratuvar helikopteridir. Bahsedilen serbestlik dereceleri Şekil-1'e referans verilerek açıklanmıştır: Düşeyde hareket serbestliğine sahip ve y-ekseninde konum ölçümü de yapılan yükseliş açısı θ , yine düşeyde hareket serbestliğine sahip ve x-ekseninde konum ölçümü de yapılan yunuslama açısı ϕ ve yatayda hareket serbestliğine sahip ve z-ekseninde konum ölçümü de yapılan gezinti açısı ψ .

Yine Şekil-1'de görüldüğü gibi helikopter, tandem yapıda ve birbirinden bağımsız iki farklı doğru akım motoruyla çalışmaktadır. Rotorlar, ön ve arka rotor olarak tanımlanmıştır ve bu rotorlara uygulanan gerilimler sırasıyla, ön rotor (V_o) ve arka rotor (V_a) gerilimleridir. Rotorlara farklı gerilimler uygulandığında, düşey hareketi tanımlayan yükselti ve yunuslama açılarındaki değişimin ifade edilebilmesi için iki farklı rotor gerilimi tanımlanmıştır: Toplam ($V_t = 0.5(V_a + V_o)$) ve Fark ($V_f = 0.5(V_a - V_o)$) Gerilimleri. Toplam gerilim pozitif olduğunda yükselme eksenindeki θ açısı da pozitif yönlü hareket sağlarken, fark gerilimi pozitif olduğunda da benzer şekilde yunuslama eksenindeki ϕ açısı da pozitif yönlü hareket eder. Her bir açının pozitif yönü Şekil-1'de gösterildiği gibidir.

Şekil 1

3 SDS Helikopter Test Düzeneği Üzerinde Eleman ve Eksen Tanımlamaları



Rotorların matematiksel modelinin oluşturulabilmesi amacıyla iki farklı rotor itkisi tanımlanmıştır: Toplam ($\tau_t = \tau_a + \tau_o$) ve Fark ($\tau_f = \tau_a - \tau_o$) İtkileri. Toplam ve fark itkileri sayesinde helikopter, üç eksenle hareket ettirebilmektedir. Doğrusal olmayan helikopter modelinin, basitleştirilmiş matematiksel modeli (Ishutkina, 2004) aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} &= -d_1 \dot{\theta} - d_2 \sin(\theta) + d_3 \tau_{coll} \cos(\phi) \\
 \ddot{\phi} &= -b_1 \dot{\phi} - b_2 \sin(\phi) - b_3 \tau_{cyc} \\
 \ddot{\psi} &= -a_1 \dot{\psi} - a_2 (\alpha \tau_t + 1) \sin(\phi) \\
 \dot{\tau}_f &= -c_1 \tau_f + 0.5 c_2 (V_a - V_o) \\
 \dot{\tau}_t &= -e_1 \tau_t + 0.5 e_2 (V_a + V_o)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Eş.(12)'de kullanılan sabitler Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 1

3 SDS Helikopter Referans Modelinin Sabitleri (Ishutkina, 2004)

Sabitler	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	d_1	d_2
Değerler	0.2517	0.2105	0.3290	1.5664	16.2000	7.3200	1.0000	0.1011	0.5040

Sabitler	d_3	e_1	e_2	α
Değerler	1.3400	6.1600	1.0000	4.0000

Yukarıda Eş.(12) ve Tablo-1 ile birlikte sunulan basitleştirilmiş 3 SDS Helikopter matematik modeli, referans model olarak kullanılacaktır. MRAK tasarımı için uygun bir durum-uzay formuna aşağıdaki şekilde dönüştürülebilir: $[x_{r_1} x_{r_2} \dots x_{r_8}]^T = [\theta \phi \psi \dot{\theta} \dot{\phi} \dot{\psi} \tau_f \tau_t]^T$ ve $[u_{r_1} u_{r_2}]^T = [V_{\delta} V_a]^T$ olmak üzere,

$$\begin{aligned} \dot{x}_{r_1} &= x_{r_4} \\ \dot{x}_{r_2} &= x_{r_5} \\ \dot{x}_{r_3} &= x_{r_6} \\ \dot{x}_{r_4} &= -d_1 x_{r_4} - d_2 \sin(x_{r_1}) + d_3 x_{r_8} \cos(x_{r_2}) \\ \dot{x}_{r_5} &= -b_1(x_{r_5}) - b_2 \sin(x_{r_2}) - b_3 x_{r_7} \\ \dot{x}_{r_6} &= -a_1 x_{r_6} - a_2(\alpha x_{r_8} + 1) \sin(x_{r_2}) \\ \dot{x}_{r_7} &= -c_1 x_{r_7} - 0.5c_2 u_{r_1} + 0.5c_2 u_{r_2} \\ \dot{x}_{r_8} &= -e_1 x_{r_8} + 0.5e_2 u_{r_1} + 0.5e_2 u_{r_2} \end{aligned} \quad (13)$$

Eş.(13) ile verilen durum-uzay formu ile birlikte $\dot{x}_r = A_r(x_r)x_r + B_r(x_r)u_r$ yapısının kullanılabilmesi için, uygun $A_r(x_r)$ ve $B_r(x_r)$ DBK matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$A(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -d_2 H(x) & 0 & 0 & -d_1 & 0 & 0 & 0 & d_3 \cos(x_{r_2}) \\ 0 & -b_2 E(x) & 0 & 0 & -b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\ 0 & -a_2(\alpha x_{r_8} + 1)E(x) & 0 & 0 & 0 & -a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -0.5c_2 & 0.5c_2 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0.5e_2 & 0.5e_2 \end{bmatrix}^T$$

Burada $E(x) = \sin(x_{r_2})/x_{r_2}$ ve $H(x) = \sin(x_{r_1})/x_{r_1}$ terimlerini temsil etmektedir.

Benzetimde kontrolü sağlanacak sistem olarak durum-uzay formunda ele alınacaktır. $\dot{x} = A(x)x + B(x)u$ yapısında, referans model ile benzer $A(x)$ ve $B(x)$ DBK matrisleri kullanılmıştır. Matematik modelinde kullanılacak olan sabitler Tablo-2’de verilmiştir.

Tablo 2

Kontrol edilmek istenen 3 SDS Helikopter Modelinin Sabitleri

Sabitler	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	d_1	d_2
Değerler	0.4000	0.3500	0.2000	3.5000	12.8000	4.6000	1.0000	0.2000	0.3000

Sabitler	d_3	e_1	e_2	α
Değerler	2.4000	8.2800	1.0000	4.8000

Som olarak, referans modelin kontrolü sağlanacak iki eksen de istenen değerleri takip edebilmesi için, ele alınan tüm sistemlerin hem durum değişkenleri hem de DBK matrisleri aşağıdaki gibi genişletilmiştir: $\tilde{x}_r = x - x_r$, $\zeta_e = \int (x_r - y)$ ve $y = Cx$ olmak üzere,

$$e = \begin{bmatrix} \tilde{x}_r \\ - \\ \zeta_e \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_r(e) = \begin{bmatrix} A_r(\tilde{x}_r) & 0 \\ - & - \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_r(e) = \begin{bmatrix} B_r(\tilde{x}_r) \\ - \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

burada $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Böylece doğrusal olmayan, genişletilmiş referans model dinamiği, aşağıdaki durum-uzay formunda kullanılarak kontrol edilir:

$$\dot{e} = \tilde{A}_r(e)e + \tilde{B}_r(e)\tilde{u}_r \quad (16)$$

BULGULAR ve TARTIŞMA

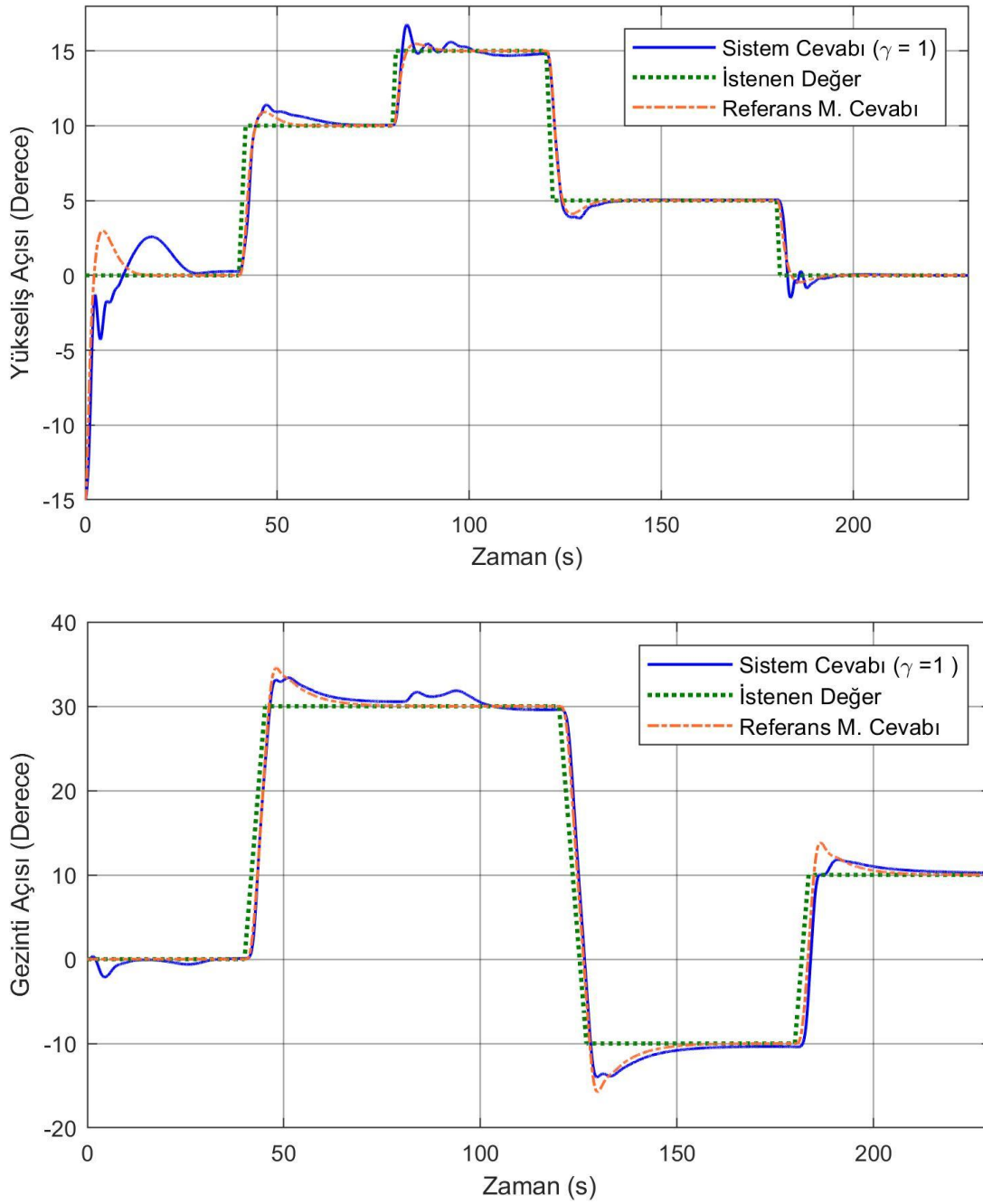
Benzetim modeli oluşturulan üç serbestlik dereceli tandem rotora sahip laboratuvar helikopteri, yöntem bölümünde önerilen MRAK ile kontrol edilmiştir. Araştırmanın ana konusu, doğrusal olmayan referans modele sahip MRAK tasarımında bulunan adaptasyon hızı değişkeninin, sistem cevabına etkisinin incelenmesidir. Üç serbestlik dereceli helikopterin kontrolü, yükselme ve gezinti eksenlerinde sağlandığından, sistem cevapları bu iki eksen üzerinden irdelenmiştir.

Adaptasyon hızı değişkeni, kolaylık olması açısından, her bir inceleme için tüm durum değişkenlerine eşit ağırlıklandırma yapılacak şekilde seçilmiştir: $\Gamma = \gamma * (\text{diag}(1 \cdots 1)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Gösterilen yapıda, γ değişkeninin seçilen beş farklı pozitif değeri için (1,3,5,10 ve 100) irdeleme yapılmıştır.

İlk olarak, adaptasyon hızı değişkeninin, adaptasyon kuralı içerisinde etkisiz eleman olarak yer aldığı $\gamma = 1$ değeri için hesaplanan kontrol sistemi ele alınmıştır. $\gamma = 1$ değeri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-2'de her iki eksen için de verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki 0-40 s aralığında referansı takip etmekte başarılı olduğu söylenemez. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin, yükselme ekseninde gerçekleşen başarısız takip sürecinin sonucunda yalpaladığı görülmektedir. Yükselme ekseninde 80-120 s ve 180-230 s aralıklarındaki geçici hal cevabı sırasında istenen takip performansı yine sergiletilememiştir, buna karşın; 40-80 s ve 120-180 s aralığında, geri kalan zaman dilimlerine nispeten daha iyi takibin sağlatılmış olduğu söylenebilir. Gezinti ekseninde ise, ilk 40 s ve yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80'inci s'de görülen bozulmalar haricinde takibin gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Adaptasyon hızı devreye alınarak, yükselme eksenindeki referans model takibinin iyileştirilmesi beklenmektedir.

Şekil 2

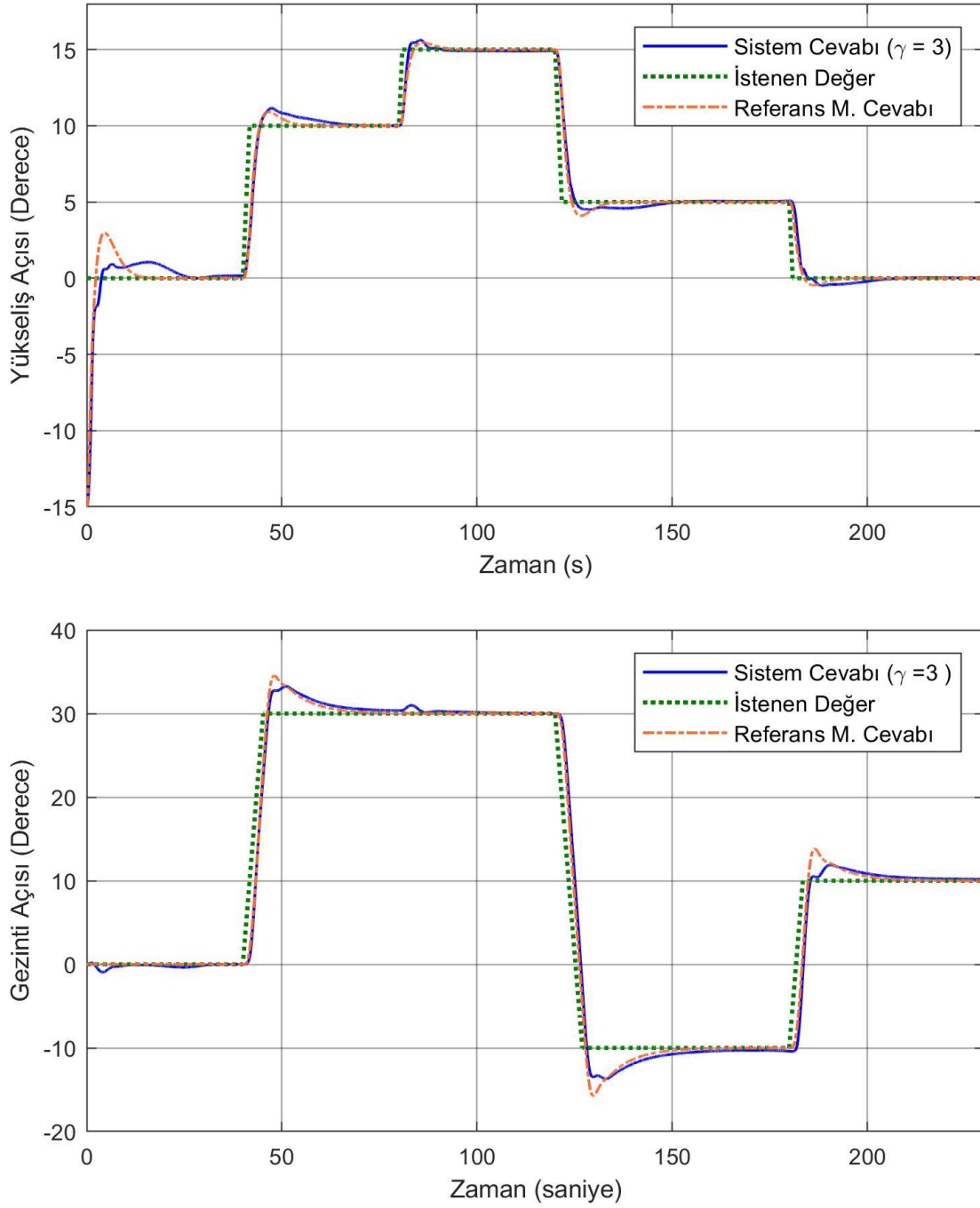
$\gamma = 1$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları



$\gamma = 3$ değeri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-3’de her iki eksen için de verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki 0-40 s aralığında referansı takip etmekte başarılı olduğu söylenemez ancak, Şekil-2’ye kıyasla daha düzgün bir yönelime sahip takibin yaptırıldığı söylenebilir. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin, yükselme ekseninde gerçekleşen istikrarsız takip sürecine göre yalpalama durumu Şekil-2’ye kıyasla çok daha azalmıştır. Yükselme ekseninde 80-120 s ve 180-230 s aralıklarındaki geçici hal cevabı sırasında takip performansı Şekil-2’ye kıyasla büyük oranda iyileşme göstermiş, buna karşın; 40-80 s ve 120-180 s aralığında, Şekil-2’ye kıyasla aşma değerlerinde iyileşme görülürken oturma zamanı değerlerinde kötüleşmeden bahsedilebilir

Şekil 3

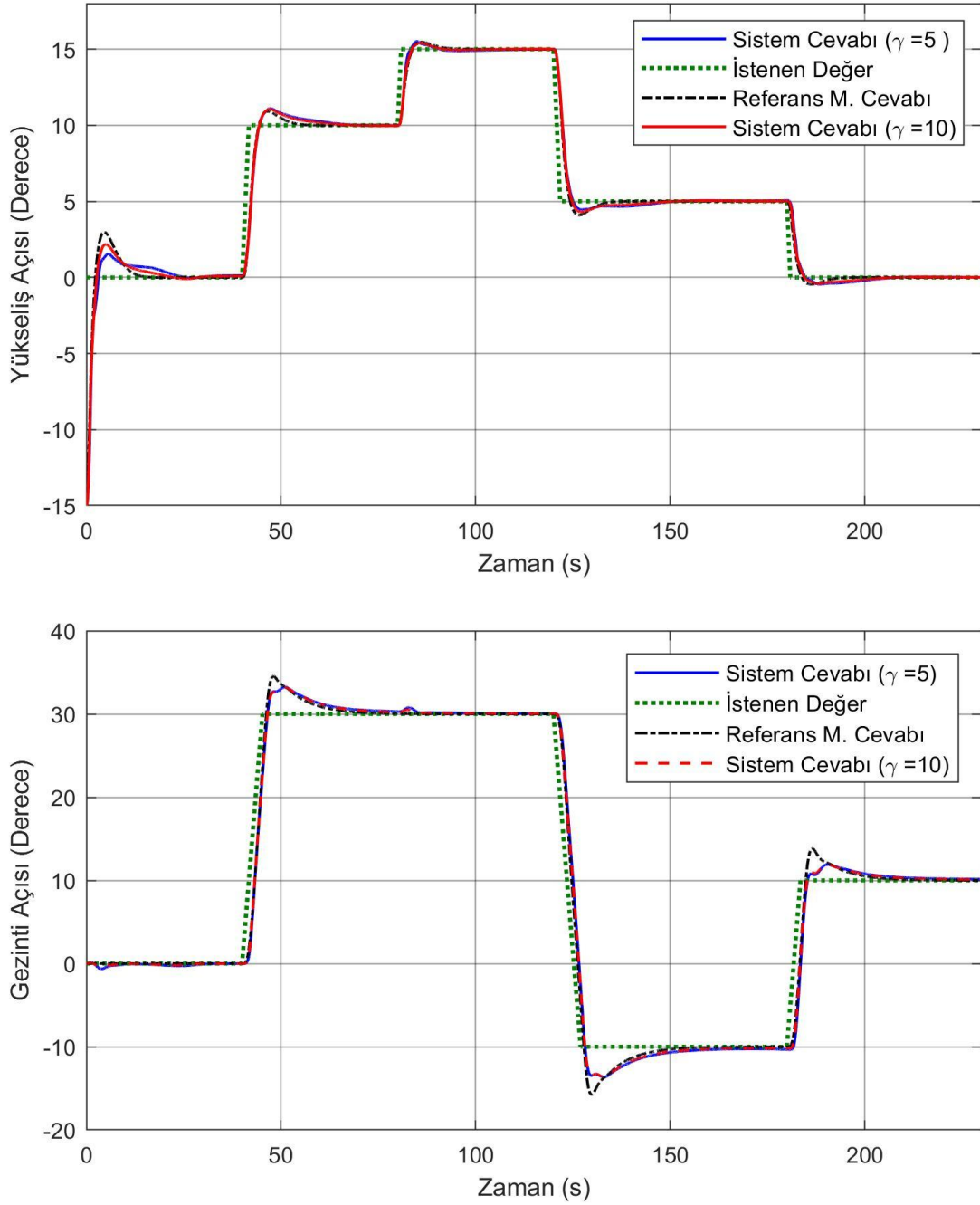
$\gamma = 3$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları



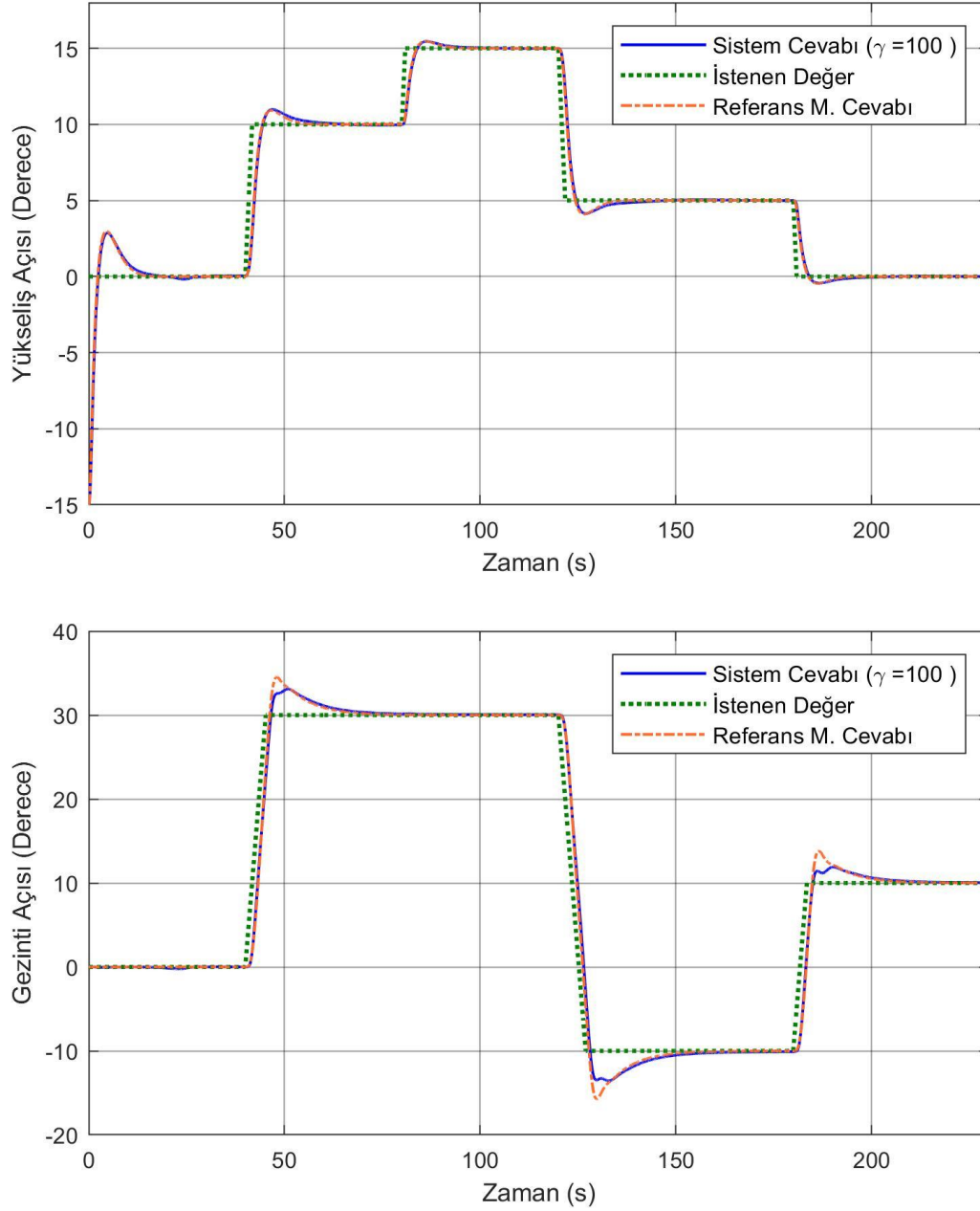
Gezinti ekseninde ise, ilk 40 s ve yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80'inci s'de görülen bozulmaların Şekil-2'ye kıyasla büyük oranda düzeltildiği görülmektedir. Adaptasyon hızı artırılarak, yükselme ekseninde daha iyi düzeltmeler beklenmektedir.

Şekil 4

$\gamma = 5$ ve $\gamma = 10$ Değerleri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Kıyaslamalı Cevapları



$\gamma = 5$ ve 10 değerleri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-4’de her iki eksen için de kıyaslamalı şekilde verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki $0-40$ s aralığında referansı takip etmekte $\gamma = 10$ değerinin 5 değerine göre daha da başarılı olduğu söylenebilir ve Şekil-3’e kıyasla kayda değer gelişim gösteren takiplerin yaptırıldığı söylenebilir. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin yalpalama durumu, her iki değer için de Şekil-3’e kıyasla çok daha azalmıştır. Yükselme ekseninde $80-120$ s aralığında referans takibi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı eksen, geriye kalan zaman aralıklarındaki referans takip performansı, Şekil-3’e kıyasla her iki değer için, az da olsa iyileşme göstermiştir. Gezinti ekseninde ise, yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80 ’inci s’de görülen bozulmaların her iki değer için de Şekil-3’e benzer olduğu ve referans takibin başarıyla yapıldığı söylenebilir.

Şekil 5 $\gamma = 100$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları

Şekil-4'ten de açıkça görüldüğü üzere, adaptasyon kuralındaki γ 'nın değeri 5 ila 10 değerleri arasında seçildiğinde hem yükselti hem de gezinti eksenini için başarılı sonuçlar alınmaktadır. Yükselme eksenindeki ilk 40 s için daha başarılı bir referans takibinin olup olmayacağı sorusunun cevaplanabilmesi adına, adaptasyon hızı $\gamma = 10$ değerine göre on kat daha arttırılmıştır. Şekil-5'te, sistemin her iki eksen için de referans takip cevabı, özellikle yükseliş eksenindeki ilk 40 s için kayda değer bir düzelme göstererek, tatmin edici sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada adaptasyon değişkeninin, kapalı-döngü kontrol sisteminin kararlılığına etkisi teorik olarak incelenmemiştir. Ayrıca, önerilen MRAK tasarımı için henüz bu durum bilinmemektedir. Bu sebeple sistem, benzetim tabanlı operasyon zamanının on katı kadarlık süre boyunca çalıştırılarak gözlemlenmiştir. Bu sistem özelinde, $\gamma = 10^2$ değeriyle çalışan MRAK'ye sahip sistem, 2500 s süresince kararlı bir şekilde çalışmıştır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Doğrusal sistemler için MRAK tasarımlarında önemli yer tutan adaptasyon hızı değişkeni; teorik anlamda literatürde çokça çalışılmış, bu sayede değişkenin sistemler için sınırlandırılmaları ve sistem cevaplarına etkileri bilinmektedir. Doğrusal olmayan referans modele sahip olacak şekilde önerilen MRAK tasarımında ise -yazarların bildiği kadarıyla- adaptasyon hızının etkileri henüz incelenmemiştir. Buradan yola çıkarak, adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye sahip fiziksel bir sistemin üzerindeki etkinliği irdelenmiştir. Bu irdeleme, önerilen MRAK tasarımının özelinde, 3 SDS bir helikopter sisteminin benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır.

Adaptasyon hızı değişkeni, kolaylık olması açısından, her bir inceleme için tüm durum değişkenlerine eşit ağırlıklandırma yapılacak şekilde seçilmiştir: $\Gamma = \gamma * (\text{diag}(1 \dots 1)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Gösterilen yapıda, γ değişkeninin seçilen beş farklı pozitif değeri için (1,3,5,10 ve 100) irdeleme yapılmıştır. Adaptasyon hızı değişkeninin, adaptasyon kuralı içerisinde etkisiz eleman olarak yer aldığı $\gamma = 1$ değeri için sistem incelenmiş, referans takibinin özellikle yükselme ekseninde istenen şekilde yapılamadığı görülmüştür. Ardından bu değişken 3 değerine artırılmış, bu değer için yükselme eksenindeki referans takibinde iyileşmeler gözlemlendiği ve gezinti ekseninde takibinin büyük ölçüde gerçekleştirildiği görülmüştür. $\gamma = 3$ değerinden itibaren gezinti eksenini için herhangi bir değer artışına gerek duyulmayabilir. Değerler 5 ve özellikle 10 olarak seçildiğinde, yükselme eksenini için referans takip istenen düzeye gelmiştir. Yükselme eksenindeki ilk 40 s için daha başarılı bir referans takibinin olup olmayacağı sorusunun cevaplanabilmesi adına, adaptasyon hızı $\gamma = 10$ değerine göre on kat daha arttırılmıştır. Şekil-5'te, sistemin her iki eksen için de referans takip cevabı, özellikle yükseliş eksenindeki ilk 40 s için kayda değer bir düzelme göstererek, tatmin edici sonuçlar vermiştir. Ayrıca, $\gamma = 100$ değeri için benzetim, 2500 s süresince sorunsuz çalıştırılmıştır.

Test edilen her bir MRAK'nin değişen adaptasyon kurallarıyla, referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir. γ değeri 1 ila 100 arası değerleri için benzetimler gerçekleştirilmiş ve bu değerlerin arttırılması sonucunda –beklenildiği üzere- sistem cevaplarında kayda değer düzeltilmeler görülürken, kapalı-döngü kontrol sisteminde herhangi bir kararlılık sorunu yaşanmamıştır.

Gelecekte, doğrusal olmayan bu kontrolcü önerisinde yer alan adaptasyon hızı değişkeninin sistemler için kararlılık açısından sınırlamaları, teorik olarak çalışılabilir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Araştırma - Veri analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%20) – Yazar 2 (%40) – Yazar 3 (%40)

Finansman

Bu çalışmada finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERENCES

- Aström, K. J. & Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control (2nd Edition)*. New York: Addison-Wesley.
- Bitmead, R. R., Gevers, M. & Wertz, V. (1990). *Adaptive Optimal Control: The Thinking Man's GPC*. New York: Prentice Hall.
- Egardt, B. (1979). *Stability of Adaptive Controllers*. Berlin: Springer.
- Friedland, B. (1996). *Advanced Control System Design (1st Edition)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ioannou, P. A. & Sun, J. (1996). *Robust Adaptive Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Isa, J. T., Wu, B., Wang, Q., Zhang, Y., Burden, S. A., Ratliff, L. J., & Chasnov, B. J. (2024). Effect of Adaptation Rate and Cost Display in a Human-AI Interaction Game. *arXiv preprint arXiv:2408.14640*.
- Ishutkina, M. A. (2004). *Design and implementation of a supervisory safety controller for a 3DOF helicopter*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Kocagil, B. M., Ozcan, S., Arican, A. Ç., Guzey, U. M., Çopur, E. H. & Salamci, M. U. (2018). *MRAC of a 3-DoF Helicopter with Nonlinear Reference Model*. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) (pp.278-283).
- Krstić, M., Kokotovic, P. V. & Kanellakopoulos, I. (1995). *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York: Wiley.
- Landau, I. (1979). *Adaptive Control-The Model Reference Approach*. New York: Marcel Dekker.
- Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M. & Karimi, A. (2011). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. London: Springer-Verlag. pp.1-33.
- Sastry, S. & Bodson, M. (1989). *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. New Jersey: Prentice Hall.
- Slama, S., Errachdi A. & Benrejeb M. (2019). Online MRAC Method Using Neural Networks based on Variable Learning Rate for Non-linear Systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 60(3), 215-224.
- Tosun, D.C. & Işık, Y. (2023). Model Reference Adaptive Control of a Quadrotor: Simulation and Flight Tests. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 9(3), 220-239.
- Zhang, P. (2010). *Advanced Industrial Control Technology: Chapter 19 - Industrial control system simulation routines*. New York: William Andrew Publishing. pp.781-810.

EXTENDED ABSTRACT

Purpose: Model Reference Adaptive Controllers (MRAC) are commonly used for systems with unmodeled dynamics or parameter uncertainties. While the adaptation rate's impact has been extensively studied in linear MRAC designs, its role in nonlinear reference model-based MRAC remains unexplored. This study investigates the influence of adaptation rate on the performance of a 3-degree-of-freedom (3-DoF) helicopter system controlled by a nonlinear MRAC.

Methods: The nonlinear MRAC design utilizes an adaptation rate parameter, $\Gamma = \gamma \cdot \text{diag}(1, \dots, 1)$, tested with γ values of 1, 3, 5, 10, and 100. Simulations focused on the system's ability to track the reference model along elevation and travel axes. Each test retained identical conditions apart from the adaptation rate to isolate its effects.

Results: At $\gamma=1$, the system showed poor tracking, particularly along the elevation axis. Increasing γ improved tracking significantly, with optimal performance achieved at $\gamma=10$. A further increase to $\gamma=100$ enhanced early tracking without stability issues, and the system ran stably for extended periods (up to 2500 seconds).

Conclusion: The adaptation rate is critical for nonlinear MRAC performance, directly influencing tracking quality and convergence. Future research could explore theoretical stability constraints for adaptation rate in nonlinear systems.

Uydular ve Türkiye'nin Uydu Çalışmalarının SWOT Analizi

Ozan ÖZTÜRK ^{ID}

Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu / Muğla Meslek Yüksekokulu,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 17.10.2024
Kabul Tarihi: 13.11.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Uydu teknolojileri,
SWOT analizi,
Milli uzay programı.

ÖZET

Uydular, 20. yüzyılın ortalarından itibaren dünya üzerinde büyük bir etki yaratmaya başlamıştır. İlk yapay uydu olan Sputnik 1'in 1957'de Sovyetler Birliği tarafından fırlatılması, insanlık için uzay çağına başlangıcı simgelemiştir. Bu gelişme, uydu teknolojilerinin iletişimden askeri uygulamalara, çevre izlemeye ve bilimsel araştırmalara kadar geniş bir yelpazede kullanılmasının önünü açmıştır. Uydular, bugün ulusal güvenlikten ekonomik kalkınmaya kadar birçok stratejik alanda kritik rol oynamaktadır. Küresel rekabetin giderek arttığı bu dönemde, uydu teknolojilerinde liderlik, ülkelerin uluslararası arenadaki konumlarını güçlendirmeleri için önemli bir fırsat sunmaktadır. Türkiye de bu bağlamda uydu teknolojilerine yaptığı yatırımlarla dikkat çekmekte ve bölgesel bir güç olma yolunda ilerlemektedir. Bu makale, Türkiye'nin uydu çalışmalarını SWOT analizi perspektifinde kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Türkiye, uzay teknolojilerine yaptığı yatırımlar ve bu alandaki gelişmelerle ekonomik, bilimsel ve stratejik birçok avantaj elde etmiştir. Uydu teknolojileri, özellikle iletişim, çevresel izleme ve askeri uygulamalar gibi birçok alanda ülkenin küresel konumunu güçlendirmiştir. Türkiye'nin bu başarıları, özellikle yerli üretim ve milli uzay programı çerçevesinde geliştirdiği uydular sayesinde gerçekleşmiştir. Göktürk ve TÜRKSAT projeleri, Türkiye'nin bağımsız uydu geliştirme kapasitesini gösteren önemli adımlardan biri olmuştur. Bununla birlikte, Türkiye'nin uydu çalışmalarında karşılaştığı bazı zayıf yönler de bulunmaktadır. Ar-Ge faaliyetlerine yapılan yatırımların sınırlı olması, kritik teknolojilerde dışa bağımlılık ve nitelikli insan kaynağının bulunmaması, uydu projelerinin sürdürülebilirliğini zorlaştıran başlıca etkenlerdir. Bu durum, uydu teknolojilerinin hızla geliştiği bir ortamda Türkiye'nin rekabet gücünü sınırlayabilir. Öte yandan, uluslararası iş birlikleri ve yerli uydu projeleri Türkiye için büyük fırsatlar sunmaktadır. Özellikle global uydu pazarında daha fazla yer edinme potansiyeli, Türkiye'nin ekonomik ve stratejik açıdan kazanımlar elde etmesine yardımcı olabilir. Ancak, bu fırsatların değerlendirilmesi için küresel rekabetin ve ekonomik belirsizliklerin yarattığı tehditlerin dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, bu SWOT analizi, Türkiye'nin uydu çalışmalarındaki mevcut durumu değerlendirirken, gelecekte atılması gereken adımlar için stratejik bir rehber niteliği taşımaktadır.

Satellites and SWOT Analysis of Türkiye's Satellite Studies

Article Info

Received: 17.10.2024
Accepted: 13.11.2024
Published: 31.12.2024

Keywords:

Satellite technologies,
SWOT analysis,
National space program.

ABSTRACT

Satellites have had a major impact on the world since the mid-20th century. The launch of the first artificial satellite, Sputnik 1, by the Soviet Union in 1957 marked the beginning of the space age for humanity. This development paved the way for satellite technologies to be used in a wide range of applications, from communications and military applications to environmental monitoring and scientific research. Today, satellites play a critical role in many strategic areas, from national security to economic development. In this era of increasing global competition, leadership in satellite technologies offers an important opportunity for countries to strengthen their position in the international arena. In this context, Turkey is attracting attention with its investments in satellite technologies and is on its way to becoming a regional power. This article comprehensively examines Turkey's satellite efforts from the perspective of SWOT analysis. Turkey has gained many economic, scientific and strategic advantages with its investments in space technologies and developments in this field. Satellite technologies have strengthened the country's global position in many areas such as communication, environmental monitoring and military applications. Turkey's achievements have been especially thanks to the satellites developed within the framework of its indigenous production and national space program. The Göktürk and TÜRKSAT projects have been important steps in demonstrating Turkey's capacity to develop independent satellites. However, there are also some weaknesses that Turkey faces in its satellite efforts. Limited investments in R&D activities, foreign dependence on critical technologies and lack of qualified human resources are the main factors that make the sustainability of satellite projects difficult. This may limit Turkey's competitiveness in an environment where satellite technologies are rapidly developing. On the other hand, international cooperation and indigenous satellite projects offer great opportunities for Turkey. In particular, the potential to gain a greater foothold in the global satellite market could help Turkey realize economic and strategic gains. However, to capitalize on these opportunities, the threats posed by global competition and economic uncertainties need to be carefully managed. In conclusion, this SWOT analysis assesses the current state of Turkey's satellite activities and provides a strategic guide for future steps.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Öztürk, O. (2024). Uydular ve Türkiye'nin uydu çalışmalarının SWOT analizi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 97-112. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.1>

*Sorumlu Yazar: Ozan ÖZTÜRK, ozturkozan@mu.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Uzay teknolojileri, günümüzün hızla gelişen dünyasında ülkelerin ekonomik büyümelerine, bilimsel araştırmalarına ve ulusal güvenlik stratejilerine yön veren kritik bir alandır. Uydu sistemleri, iletişimden navigasyona, çevre izlemeye ve askeri operasyonlara kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmakta ve ülkelerin küresel rekabet gücünü artırmaktadır (Nedim, Sözbir, Bulut, Gülgönül, Kuzu, & Dur, 2023). Uzay programlarına yatırım yapan ülkeler, teknolojik üstünlük sağlamanın yanı sıra uluslararası arenada stratejik avantajlar elde etmektedir (Özyıldırım, 2023).

Bu bağlamda, Türkiye'nin uydu programı ve bu programın güçlü ve zayıf yönleri ile fırsat ve tehditlerini ortaya koyan SWOT analizi büyük bir önem taşımaktadır. Türkiye, son yıllarda uzay teknolojilerine yaptığı yatırımlarla bölgesel ve küresel konumunu güçlendirmeyi hedeflemektedir. Bu makale, Türkiye'nin uydu programının ekonomik, bilimsel ve güvenlik boyutlarını değerlendirerek, programın stratejik avantajlarını ve geliştirilmesi gereken alanları analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Makalenin temel amacı, Türkiye'nin uydu programının mevcut durumunu ve geleceğe yönelik potansiyelini SWOT analizi çerçevesinde incelemektir. Bu doğrultuda, uzay teknolojilerinin ekonomik, bilimsel ve güvenlik açısından önemini değerlendirmek, Türkiye'nin uydu programının ülkeye sağladığı stratejik avantajları belirlemek, programın güçlü ve zayıf yönleri ile mevcut fırsat ve tehditleri ortaya koymak ve Türkiye'nin uzay programının geliştirilmesi için atılması gereken adımları tespit etmek hedeflenmektedir. Araştırma, özellikle 2000'li yıllardan günümüze kadar olan dönemi kapsamakta ve Türkiye'nin iletişim, gözlem ve askeri amaçlı uydu projeleri üzerinde odaklanmaktadır.

Bu çalışma, SWOT analizi yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle, akademik yayınlar, resmi kurum raporları ve uluslararası kuruluşların verileri incelenerek Türkiye'nin uydu programına ilişkin mevcut bilgi birikimi değerlendirilmiştir. Ardından, SWOT analizi ile programın iç ve dış faktörleri sistematik bir şekilde analiz edilmiştir. Makale, uzay teknolojilerinin ekonomik, bilimsel ve güvenlik boyutlarının genel hatlarıyla ele alındığı bir giriş bölümüyle başlayacak; sonrasında Türkiye'nin uydu programının gelişimi ve tarihsel süreçteki önemli kilometre taşları incelenecektir. Üçüncü bölümde, programın güçlü ve zayıf yönleri ile karşı karşıya olduğu fırsatlar ve tehditler detaylı bir şekilde analiz edilecektir. Dördüncü bölümde, elde edilen bulgular ışığında programın geliştirilmesine yönelik stratejik öneriler sunulacak ve son bölümde araştırmanın genel bir değerlendirmesi yapılarak ana bulgular özetlenecektir. Bu yapıyla, okuyucuya Türkiye'nin uydu programının derinlemesine bir analizi sunulmakta ve programın geleceğine ilişkin kapsamlı bir perspektif sağlanmaktadır.

Kavramsal Temeller

Atmosfer ve uzay ortamını tanıyarak Türkiye'nin yürüttüğü bu uydu çalışmalarının önemi daha iyi anlaşılır. Uydular faaliyet gösterdikleri fiziksel ortam bakımından çok zorlu şartlarda çalışan cihazlardır.

Atmosfer, Dünya'yı çevreleyen ve mekanik olarak karışmış gazlardan oluşan bir küredir. Bu gaz karışımının ağırlığı, atmosferdeki nesnelere kuvvet uygulayan hava basıncını oluşturur. Gazların atmosferdeki dağılımı yerçekimi tarafından belirlenir; daha ağır gazlar Dünya yüzeyine yakinken, daha hafif gazlar daha uzakta bulunur (Reichardt & Timm, 2020). Atmosfer, güneşten gelen zararlı ışınları yansıtarak veya emerek canlıları korur ve Dünya'nın sıcaklığını düzenleyerek aşırı ısınmayı önler (Hemond & Fechner, 2023).

Dünya'nın atmosferi, her biri kendi özelliklerine sahip farklı katmanlardan oluşur. En alt katman olan troposfer, hava olaylarının meydana geldiği ve gazların yoğunlaştığı bölgedir (Kumar et al., 2023). Troposferin üstünde, su buharının olmadığı ve sıcaklık değişimlerinin az olduğu stratosfer bulunur

(Samundi, 2022). Stratosfer ile termosfer arasında yer alan mezosferde hava hareketleri görülmez. Termosfer, en sıcak tabakadır ve aurora gibi fenomenlerle bilinir (Van Wijngaarden & Happer, 2023). Atmosferin en dış katmanı olan ekzosfer, dış uzaya geçişi işaret eder (Samundi et al., 2022). Ozon tabakası ise stratosfer ve mezosfer arasında yer alarak Dünya'yı zararlı UV ışınlarından korur.

Meteoroloji, atmosferin ve hareketlerinin kısa süreli incelenmesini ifade eder ve "hava durumu" olarak bilinir. Atmosferi karakterize eden faktörler arasında sıcaklık, nem, yağış miktarı ve türü, rüzgârın yönü ve şiddeti, atmosferik basınç ve bulut örtüsü bulunur (Agarwal & Mittal, 2023). Uzayda gözlenen ve atmosferdeki meteorolojik aktivitelere benzer olayları inceleyen bilim dalına ise uzay meteorolojisi denir. Uzay meteorolojisi, Güneş etkinliklerinin yakın uzay ortamında yarattığı değişiklikleri inceler ve bu aktivitelerin iletişim, navigasyon ve havacılık gibi teknik sistemleri nasıl etkilediğini araştırır (Poh et al., 2023).

Uzay meteorolojisi, sosyal ve ekonomik etkileri nedeniyle önemlidir. Bu etkilerin neden olduğu zararları azaltmak için uyarı sistemleri, öngörücü modeller ve yer tabanlı teknolojik sistemlere ihtiyaç vardır (Moldwin, 2022). Uzay meteorolojisini etkileyen ana kaynak, Güneş'ten sürekli olarak uzaya yayılan ve "güneş rüzgârı" olarak bilinen iyon parçacıklarıdır. Güneş rüzgârı, 11 yıllık bir döngüyü izleyen güneş aktivitesindeki değişimlere bağlı olarak değişken bir karaktere sahiptir (Yermolaev et al., 2023). Ayrıca, mikro göktaşları, uzay enkazı, uzay radyasyonu, yakındaki yıldızlar ve diğer galaksilerden gelen iyonize parçacıklar da uzay meteorolojisinin çalışma alanına girer (Buzulukova & Tsurutani, 2022).

Uzay havası, teknolojik sistemler ve insan sağlığı üzerinde güçlü etkilere sahip olabilir. Manyetik fırtınalar ve radyasyon gibi güneş aktiviteleri, elektrik şebekelerinde kesintilere ve telekomünikasyon sistemlerinde aksamalara neden olabilir (Facsco et al., 2023). Ayrıca, uzay havası havacılık faaliyetlerini etkileyerek uçuş gecikmelerine yol açabilir. Wang et al. (2023), uzay hava durumu olayları sırasında uçuş gecikmelerinin arttığını belirlemiş ve yaklaşık 4 milyon uçuş verisini analiz ederek bu durumu nicel olarak incelemiştir. Uzay hava durumu olayları sırasında, ortalama varış gecikme süresinin ve 30 dakikalık gecikme oranının, sakin dönemlere kıyasla sırasıyla %81,34 ve %21,45 oranında arttığı bulunmuştur.

Alçak Dünya yörüngesindeki uzay araçlarının irtifası yaklaşık 350 km'dir ve bu yükseklikteki kütle çekimi, Dünya yüzeyindeki yerçekimi alanından sadece %8 daha azdır (Beysens & van Loon, 2022). Uzay çağı başladığından beri uzay şartları ve uzay meteorolojisi hakkında çok bilgi biriktirilmiştir. Bu bilgiler sayesinde uzay şartlarına dayanıklı uydular ve uzay araçları geliştirilmiştir. Ancak uzay ortamı hâlâ tehlikelerle doludur ve uzay görevlerinin başarısı uzay çevresine bağlıdır (Waldemar et al., 2023).

Uzay ortamında vakum, radyasyon ve ani sıcaklık değişimleri yoğun olarak görülmektedir. Uzay ürünlerinin, ileri teknoloji ve yüksek kararlılık içermesi gerekmektedir. Uydu ve uzay araçlarında dış sıcaklık -200 ile +150 derece arasında değişmektedir. Dünya çevresinde, atmosferimizin hemen üzerinde 40.000'den fazla aktif ve aktif olmayan uzay aracı ve kalıntıları bulunmaktadır. Bu uzay çöpleri bazen güvenliğimizi tehdit ettiği için kontrollü şekilde Dünya'ya düşürülmekte veya kendiliğinden Dünya'nın herhangi bir noktasına düşebilmektedir (Çal, 2021).

Uzay ortamında radyasyonun dört ana kaynağı vardır:

1. Van Allen kuşağına çarpan protonlar ve elektronlar,
2. Güneş sistemi dışından gelen kozmik ışınlar,
3. Güneş'ten gelen proton ve ağır iyonlar,
4. Manyetosfere çarpan ağır iyonlar (Zheng et al., 2019).

Uzaydaki radyasyon, uzun süreli uzay görevlerinin önemli bir engeli olarak kabul edilmektedir. Bu radyasyon, hapsolmuş radyasyon, güneş parçacık olayları (SPE'ler) ve galaktik kozmik radyasyon (GCR) olmak üzere üç bileşenden oluşur. Alçak Dünya yörüngesinde hapsolmuş radyasyon, maruz kalmanın ana kaynağıdır. SPE'ler, korumasız mürettebatlar için akut radyasyon sendromlarına neden olabilir ancak genellikle klasik kalkan malzemeleriyle korunabilir. GCR ise yüksek yüklü ve yüksek enerjili çekirdekler içerir ve uzun süreli uzay görevlerinde sağlık riskinin ana kaynağıdır. Uzay radyasyonu etkileri doğrudan incelenebilir, ancak bu deneylerin yorumlanması zor olabilir. Bilgi yoğunlukla yer tabanlı deneylerden elde edilir ve uzay radyasyonu kalkanları ile mikroelektronik etkilerinin değerlendirilmesi genellikle yüksek enerji hızlandırıcılarda yapılır (Raphael et al., 2022).

Güneş rüzgârlarının hızı 250 km/sn ile 1000 km/sn arasında değişebilir ve gezegenlerin manyetik alanlarını etkiler (Köksal, 2021). Güneş, 11 yıllık periyotlarla aktive olan bir yıldızdır. Güneş aktivitesi minimum olduğunda, elektron ve proton yoğunluğu düşük, kozmik ışın popülasyonu maksimum düzeydedir. Güneş aktivitesi maksimum iken durum tersine döner; elektron ve proton yoğunluğu maksimum, kozmik ışın popülasyonu minimum düzeye iner. Yörüngedeki bir uzay aracının radyasyon kalkanı kullanmaktan başka seçeneği yoktur. Kullanılması gereken kalkanın güneşin aktivitesine göre seçilmesi, ekonomi ve mühendislik açısından önemlidir. Kalkan yoğunluğu 1 gr/cm² ile 10 gr/cm² arasında olmalıdır (Zheng et al., 2019).

Dünya'nın manyetik alanını oluşturan Van Allen Kuşağı, Güneş'ten gelen zararlı elektromanyetik ışınlarla karşı koruyucu bir kalkan görevi görür. Manyetik alanın etkisi, Güneş rüzgârlarının şiddetine göre değişir. Güneş aktivitelerinin yüksek olduğu zamanlarda Dünya'nın manyetosferinin çapı %40 kadar küçülmektedir (Demirtaş, 2002). Van Allen Kuşağı, iç ve dış olmak üzere iki bölümden oluşur; dış kuşak daha yüksek enerjili parçacıkları içerirken, iç kuşak kozmik ışınların neden olduğu iyonize atomlardan oluşur (Zheng et al., 2019).

Dünya'nın manyetosferi, güneş rüzgârlarını saptırarak koruma sağlar. Manyetik alanın etkisi, Dünya'ya yaklaştıkça artar ve yüklü parçacıkların içeri girmesini engeller. Manyetosferin kuyruğu, güneş etkinliğine bağlı olarak milyonlarca kilometre uzunluğunda olabilir (Demirtaş, 2002).

Yüksek enerji seviyesine sahip kozmik yüklü parçacıklar, Dünya'nın manyetik alanını geçebilir. Atmosferdeki parçacıklarla çarpışarak nötronlar açığa çıkarırlar. Nötronlar, kararsız parçacıklar olduklarından kısa süre içinde protonlara ve elektronlara dönüşürler (Zheng et al., 2019). Bu nötronlar, Dünya'nın manyetik alanından etkilenmez ve bozunma süreçleri sonucu ortaya çıkan yüklü parçacıklar manyetik alan tarafından yakalanır. Bu durum, Van Allen Kuşağı içinde proton akışına neden olur.

Güneş'ten gelen manyetik parçacıklar, manyetik fırtınalara ve "aurora" adı verilen kutup ışıklarına sebep olabilir. Manyetosferin dinamik yapısı, Güneş'ten gelen manyetik parçacıkların tetiklediği süreçlerle belirlenir (Demirtaş, 2002).

Yapay Uydular ve Yörünge Çeşitleri

Yapay uydular, insanlar tarafından geliştirilen ve Dünya'nın veya diğer gezegenlerin yörüngesine yerleştirilen elektronik cihazlardır (Maini & Agrawal, 2011). İlk yapay uydu olan Sputnik 1, 1957'de fırlatılmıştır. O tarihten bu yana, Dünya'nın yörüngesine 11.000'den fazla uydu gönderilmiştir (Linjie et al., 2018). Aktif uyduların sayısı yıllar içinde önemli ölçüde artmış ve şu anda yaklaşık 1.900 uydu aktif olarak çalışmaktadır (Arthur et al., 2012). Bu uydular, uydu iletişim hizmetleri, Dünya gözlemi için uzaktan algılama ve küresel kara örtüsü izleme gibi çeşitli uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır (José et al., 2021). Uydu teknolojisindeki sürekli gelişmeler, daha gelişmiş yeteneklere, daha uzun operasyonel ömürlere ve veri toplamada daha yüksek uzamsal çözünürlüklere yol açarak, uydu sistemlerini modern iletişim, çevresel izleme ve bilimsel araştırmalar için vazgeçilmez hale getirmiştir.

Uyduların yörüngelerine göre dağılımı şu şekildedir:

1. %63'ü alçak Dünya yörüngesinde,
2. %6'sı orta Dünya yörüngesinde (yaklaşık 20.000 km),
3. %29'u jeostasyoner yörüngede (yaklaşık 36.000 km),
4. %2'si eliptik yörüngededir (Sandeep at al., 2015).

Yapay uyduların kullanım alanlarına göre dağılımı ise şöyledir: haberleşme %66, navigasyon %7, askeri gözetleme %6, yer bilimleri/meteoroloji %5, astrofizik/uzay fiziği %5, yer gözlem/uzaktan algılama %5 ve diğer %6 (Maini & Agrawal, 2011).

En çok uyduya sahip ülkeler sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri (1.897 uydu), Çin (412 uydu) ve Rusya'dır (176 uydu).

Uydular altı ana sınıfa ayrılır: Bilimsel Araştırma Uyduları, Meteoroloji Uyduları, Gözlem Uyduları, Navigasyon Uyduları, İletişim Uyduları ve Askeri Uydulardır.

Islak kütle, uyduyu fırlatma sırasında taşıdığı yakıt dahil kütle olarak tanımlanır. Küçük uyduların (500 kg'dan az) hizmet ömrü genellikle daha kısadır (Maini & Agrawal, 2011).

Uçuş Rejimleri: Fırlatma araçları dört farklı uçuş rejiminde hareket eder (NASA, 1995):

1. Yörünge Altı Uzay Uçuşu
2. Yörüngesel Uzay Uçuşu
3. Ay-ötesi Enjeksiyon
4. Gezegenler Arası Uzay Uçuşu

Uydular, belirli görevler için tasarlanır ve kullanılır (Serene & Sreeja, 2022). Örneğin, haberleşme uyduları televizyon ve radyo yayını için, meteoroloji uyduları hava olaylarını takip etmek için, askeri uydular ise gözetleme ve keşif amaçlı kullanılır (Maini & Agrawal, 2011).

Tablo 1

Kütlelerine Göre Uydular, Geliştirme Süreleri ve Maliyetleri

Uydu	Kütle (kg)	Maliyet (Milyon)	Süre (yıl)
Büyük	1000 kg+	\$300M+	10
Orta	1000 kg+	\$100M+	4-6
Küçük	<500 kg	\$50M	3-5
Mikro Sat	<100 kg	\$5-10M	2-4
Nano Sat	1-10 kg	\$0.3-2M	<2-3
Piko Sat	<1 kg	\$100k	1-2
Femto Sat	<0.1 kg	\$10k	<1

Uydu Mimarisi ve Alt Sistemleri (Servis Modülü)

Uydu mimarisi, "satellite bus" veya "spacecraft bus" olarak adlandırılan modülden oluşur. Ana elemanları şunlardır:

- Komuta ve Veri Sistemi (C&DH): İletişim alt sisteminden komutları alır, doğrular, kod çözer ve diğer alt sistemlere dağıtır. Verileri toplar, depolar ve Dünya'ya iletir. Uydu saatini korur ve izler.

- İletişim Sistemi ve Antenler: Uydu ile yer istasyonları arasında veri alışverişini sağlar. Bu sistem, komuta ve veri sistemi ile elektrik güç sistemi gibi alt sistemlerle birlikte çalışır.
- Elektrik Güç Sistemi (EPS): Güneş panelleri ve bataryalar aracılığıyla elektrik üretir ve uzay aracına güç sağlar.
- İtme Sistemi: Uzay aracını hızlandırmak için kullanılır. Kimyasal (roket motorları) ve kimyasal olmayan (elektrikli itme, güneş yelkeni, plazma itici, nükleer termal roket) itme sistemleri bulunur.
- Termal Kontrol Sistemi: Uzay aracını sıcaklık etkilerinden korur ve sıcaklık dalgalanmalarını dengede tutar. Aktif ve pasif ısı kontrol yöntemleri kullanılır.
- Yükseklik Kontrol Sistemi (ACS): Uydunun doğru yönlendirilmesini ve dış kuvvetlere yanıt vermesini sağlar. Sensörler ve aktüatörlerle çalışır.
- Yönlendirme, Navigasyon ve Kontrol Sistemi (GNC): Uydunun yönlendirilmesini, konumunun belirlenmesini ve yörüngesinin ayarlanmasını sağlar.
- Yapısal ve Muhafaza Sistemi: Uzay aracını fırlatma sırasında oluşan yük ve streslere dayanacak şekilde tasarlanır. Diğer tüm alt sistemler için bağlantı noktası görevi görür.
- Yaşam Destek Sistemi: İnsanlı uzay uçuşlarında mürettebatın yaşamını sürdürmesi için gerekli desteği sağlar.
- Yer İstasyonu (Yer Segmenti): Yer istasyonları, görev kontrol merkezleri, yer ağırları, uzak terminaller, uzay aracı entegrasyon ve test tesisleri ile fırlatma tesislerinden oluşur (Maini & Agrawal, 2011).

Uyduların Ortak Ana Parçaları

Bir uydunun bileşenleri işlevine göre değişse de çoğu uyduda ortak olarak bulunan bazı parçalar vardır:

- Antenler: Dünya'ya sinyal iletmek ve Dünya'dan sinyal almak için kullanılır.
- Komuta ve Veri İşleme Sistemi: Uydunun beyni olup, komuta ve kontrol sistemleriyle uydunun tüm parçalarını yönetir ve Dünya'dan alınan komutları uygular.
- Yönlendirme ve Sabitleme Sistemleri: Sensörler aracılığıyla uydunun konumunu izler ve gerektiğinde iticilerle konum ve yön ayarlamaları yapar.
- Güç Sistemi: Güneş panelleri ile güneş enerjisini elektriğe dönüştürerek uyduya güç sağlar (Geçgin, 2007).
- Yapısal Muhafaza: Uzay ortamının zorlu koşullarına dayanacak güçlü malzemelerden üretilmiştir.
- Termal Kontrol Sistemi: Uydu ekipmanlarını sıcaklık değişimlerine karşı korur.
- Transponderler: Sinyalleri alır, frekanslarını dönüştürür ve Dünya'ya geri iletir (Maini & Agrawal, 2011).

Uzay ortamında uyduları etkileyen birçok tehlike ve anormallik türü bulunmaktadır:

1. Yüzey Yüklenmesi
2. Derin Yalıtkan veya Kütle Yüklenmesi
3. Tek Olay Etkileri (SEU) (Galaksilerden yayılan kozmik ışınlar ve Güneş kaynaklı proton

olayları)

4. Uzay Aracına Etki Eden Sürüklenme Kuvveti (1000 km altındaki irtifalarda)
5. Toplam İyonlaşma Dozu Etkileri
6. Güneşten Yayılan Radyo Dalgaları, Girişim ve Telemetrik Sintilasyon
7. Uzay Çöpleri
8. Termal Yükler (Solar Radiation, Earth Albedo, Eclipse, Thermal Shock, Internal Thermal Forces)
9. Uzay Aracı Yönetimi ve Konumlandırması
10. Fotona Dayalı Parazitler
11. Malzeme Bozulması
12. Meteorit veya Mikro Meteorit Çarpmaları (Zheng et al., 2019)

Yapay Uydu Yörüngeleri

Yörünge, yapay veya doğal uyduların bir gök cismi etrafında periyodik olarak yaptığı yoldur. Bu yol, yörünge eğikliği, çıkış düğümünün konumu, yarı büyük eksen uzunluğu, dış merkezlik, enberi noktasının konumu ve başlangıç zamanı gibi özelliklerle tanımlanır (Curtis, 2005).

Yörünge Türleri aşağıda verilmiştir. Verilen yörüngelerden farklı özel yörünge türleri de vardır fakat en çok kullanılan yörünge türleri aşağıda tanımlanmıştır. Bunlar;

1. Alçak Dünya Yörüngesi (LEO): 160 km ile 2000 km arasında yer alan yörüngeler. Yükseklik arttıkça yörünge hızı azalır ve denge hızı yaklaşık 7.8 km/saniyedir.
2. Orta Dünya Yörüngesi (MEO): 2000 km ile 35786 km arasında bulunan yörüngeler. Bu yörüngeler GPS, Glonass ve Galileo uydularını içerir.
3. Yüksek Dünya Yörüngesi (HEO): 35786 km'den daha yüksek yörüngeler.
4. Jeostatik Yörünge (GEO): Uydular, Dünya'nın çevresinde 24 saatte tam bir tur atar ve Dünya ile aynı hızda hareket eder. Yükseklik limiti 35786 km'dir.

Dış Merkezliğe Bağlı Yörünge Çeşitleri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

1. Dairesel Yörünge: Dış merkezlik değeri sıfır.
2. Eliptik Yörünge: Dış merkezlik değeri 0 ile 1 arasında.
3. Parabolik Yörünge: Dış merkezlik değeri tam 1. Bu yörüngede cisimler gezegenin yerçekiminden kurtulabilir.
4. Hiperbolik Yörünge: Dış merkezlik değeri 1'in üzerinde. Bu yörüngede cisimler kaçış hızından daha büyük bir hıza sahiptir (Curtis, 2005).

Türkiye'nin Uzay ve Uydu Tarihçesi

Türkiye'nin uzaya gönderdiği uyduların kimler tarafından üretildiği ve nereden fırlatıldığı bilgileriyle birlikte detaylı tablo: 'da verilmiştir.

Tablo 2*Kütlelerine Göre Uydular, Geliştirme Süreleri ve Maliyetleri*

Uydu	Fırlatma Tarihi	Amaç	Detaylar	Üretici	Fırlatma Yeri
Türksat 1A	24 Ocak 1994	Türkiye'nin ilk haberleşme uydusu olarak planlanmıştı, ancak fırlatma sırasında başarısız oldu.	Türksat 1A, Ariane 4 roketiyle uzaya fırlatıldı, ancak roketin arızalanması nedeniyle başarısız oldu.	Aerospatiale (Fransa)	Kourou, Fransız Guyanası
Türksat 1B	11 Ağustos 1994	Türkiye'nin ilk başarılı haberleşme uydusu, 12 yıl boyunca televizyon, radyo yayıncılığı, telefon ve veri iletişimi sağladı.	Türksat 1B, Ariane 4 roketiyle uzaya fırlatıldı ve başarılı bir şekilde yörüngeye oturdu. 2006 yılında emekliye ayrıldı.	Aerospatiale (Fransa)	Kourou, Fransız Guyanası
Türksat 1C	10 Temmuz 1996	Türksat 1B'nin sağladığı hizmetleri genişletmek, yaklaşık 14 yıl boyunca hizmet verdi.	Ariane 4 roketiyle uzaya fırlatıldı ve başarılı bir şekilde yörüngeye oturdu. 2008 yılında Türksat 3A'ya devredildi.	Aerospatiale (Fransa)	Kourou, Fransız Guyanası
Türksat 2A	10 Ocak 2001	Haberleşme hizmetlerini sürdürmek ve genişletmek, 2016 yılına kadar aktif olarak görev yaptı.	Ariane 4 roketiyle uzaya fırlatıldı ve başarılı bir şekilde yörüngeye oturdu. 2016 yılına kadar görev yaptı.	Alcatel Space (Fransa)	Kourou, Fransız Guyanası
Türksat 3A	13 Haziran 2008	Haberleşme kapasitesini artırmak ve daha geniş bir coğrafyada hizmet sağlamak, hala aktif olarak görev yapmaktadır.	İngiliz Skynet 5C uydusu ile birlikte uzaya fırlatıldı. Thales Alenia Space tarafından üretildi. Hala aktif olarak görev yapmaktadır.	Thales Alenia Space (Fransa)	Kourou, Fransız Guyanası
RASAT	17 Ağustos 2011	Türkiye'nin ilk yerli gözlem uydusu, haritacılık, afet izleme, çevre izleme, şehircilik ve planlama gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlandı.	Rusya'nın Kazakistan sınırındaki Yasni fırlatma üssünden Dnepr roketi ile uzaya fırlatıldı. TÜBİTAK UZAY tarafından tasarlandı ve üretildi. Hala aktif görevde.	TÜBİTAK UZAY (Türkiye)	Yasni, Rusya
Göktürk-2	18 Aralık 2012	Yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve gözlem, haritacılık, arazi kullanımı, tarım, ormancılık, çevre izleme, şehircilik ve askeri amaçlar için kullanıldı.	TÜBİTAK UZAY ve TUSAŞ iş birliği ile geliştirildi. Çin'in Jiuquan Fırlatma Üssü'nden Chang Zheng 2D roketiyle uzaya gönderildi. Donanımının %80'i ve yazılımının %100'ü Türk mühendisler tarafından yapıldı.	TÜBİTAK UZAY ve TUSAŞ (Türkiye)	Jiuquan, Çin
Türksat 4A	14 Şubat 2014	Haberleşme hizmetlerini artırmak ve genişletmek, Türkiye, Avrupa, Orta Doğu, Afrika ve Asya'da televizyon yayıncılığı, radyo ve veri iletişimi sağlamak.	Japon Mitsubishi Electric firması ile ortaklaşa tasarlandı. Kazakistan'daki Baikonur Uzay Üssü'nden Proton roketiyle uzaya gönderildi. 42 derece doğu boylamında görev yapmaktadır.	Mitsubishi Electric (Japonya)	Baikonur, Kazakistan
Türksat 4B	16 Ekim 2015	Haberleşme hizmetlerini sürdürülebilir kılmak ve genişletmek, televizyon ve radyo yayıncılığı, veri iletişimi sağlamak.	Japon Mitsubishi Electric firması ile ortaklaşa tasarlandı ve Baikonur Uzay Üssü'nden Proton roketiyle uzaya gönderildi.	Mitsubishi Electric (Japonya)	Baikonur, Kazakistan
Göktürk-1	5 Aralık 2016	Yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve gözlem, haritacılık, arazi araştırması, ekosistem izleme, felaket	TUSAŞ ve İtalyan Telespazio firması tarafından tasarlandı. Kourou Uzay Üssü'nden Vega roketiyle uzaya fırlatıldı. 0.50	TUSAŞ ve Telespazio (Türkiye & İtalya)	Kourou, Fransız Guyanası

Uydu	Fırlatma Tarihi	Amaç	Detaylar	Üretici	Fırlatma Yeri
Türksat 5A	8 Ocak 2021	yönetimi, çevre kontrolü, kıyı bölgesi yönetimi ve su kaynakları yönetimi gibi çeşitli sivil ve askeri amaçlar için kullanıldı. Haberleşme hizmetlerini genişletmek, Türkiye, Avrupa, Orta Doğu, Kuzey Afrika, Orta Batı Afrika, Güney Afrika, Akdeniz, Ege Denizi ve Karadeniz'i kapsayan geniş bir coğrafyada televizyon yayıncılığı ve veri iletişimi hizmetleri sağlamak.	SpaceX firmasının Falcon 9 roketiyle ABD'deki Cape Canaveral Uzay Üssü'nden uzaya gönderildi. Görev süresi yaklaşık 30 yıl olarak belirlendi.	Airbus Defence and Space (Avrupa)	Cape Canaveral, ABD
Türksat 6A	8 Temmuz 2024	Türkiye'nin haberleşme kapasitesini artırmak, televizyon yayıncılığı ve veri iletişim hizmetlerini geniş bir coğrafyaya sunmak. Bu coğrafya Türkiye, Avrupa, Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Asya'nın bazı bölgelerini kapsayacak.	SpaceX firmasının Falcon 9 roketiyle fırlatıldı. Türkiye'nin ilk yerli ve milli haberleşme uydusu olan Türksat 6A, TUSAŞ, TÜBİTAK UZAY, ASELSAN ve CTech iş birliğiyle tamamen yerli imkanlarla geliştirilmektedir.	TUSAŞ, TÜBİTAK UZAY, ASELSAN, CTech (Türkiye)	Cape Canaveral, ABD

Bu tablo, Türkiye'nin uzaya gönderdiği uyduların amaçlarını, kimler tarafından üretildiklerini ve nereden fırlatıldıklarını detaylı bir şekilde göstermektedir.

Türkiye'nin Milli Uzay Programı Hedefleri

Türkiye'nin milli uzay programı hedefleri aşağıda verilmiştir.

1. Milli Roket ile Ay'a Gitmek: (2023: Milli ve yerli roketle Ay'a ulaşmak. 2028: Ay'a yumuşak iniş yaparak bilimsel araştırmalar gerçekleştirmek.)
2. Yeni Nesil Uydu Geliştirme: Dünya ile rekabet edebilecek yeni bir uydu markası oluşturmak.
3. Bölgesel Konumlama Sistemi Geliştirme: Türkiye'ye ait, GPS'e alternatif bir bölgesel konumlama sistemi oluşturmak.
4. Uzay Limanı İnşa Etmek: Türkiye'de uzay araçlarının fırlatılabileceği bir uzay limanı kurmak.
5. Uzay Havası ve Meteoroloji Yatırımı: İyonosfer araştırmalarını desteklemek ve uzay havası gözlemi yapacak bir birim oluşturmak.
6. Teleskop Geliştirme: Uzaydaki nesneleri izleyebilecek teleskoplar geliştirmek.
7. Uzay Sanayi Ekosistemini Geliştirmek: Uzay alanında faaliyet gösteren şirketlerin sayısını artırmak ve yatırımları teşvik etmek.
8. Uzay Teknoloji Geliştirme Bölgesi Kurmak: Ankara'da uzay teknolojileri için bir geliştirme bölgesi oluşturmak.
9. İnsan Kaynağı Geliştirme: Uzay alanında nitelikli insan kaynağı yetiştirmek ve eğitim programları oluşturmak.
10. Bir Türk Vatandaşını Uzaya Göndermek: İlk Türk astronotu uzaya göndererek uluslararası görünürlüğü artırmak.

Bu hedefler, Türkiye'nin uzay teknolojileri kapasitesini artırmayı ve uzayda bağımsızlığını sağlamayı amaçlamaktadır (TUA, 2024).

YÖNTEM

Bu makalede, Türkiye'nin uzay programının değerlendirilmesi amacıyla SWOT analizi yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda, resmi raporlar, akademik makaleler ve güvenilir medya kaynakları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu sayede, Türkiye'nin uzay ve uydu alanındaki faaliyetlerine ilişkin güncel ve kapsamlı bilgilere ulaşılmıştır. SWOT analizi ile, Türkiye'nin uzay sektöründeki güçlü ve zayıf yönlerini, fırsatları ve tehditleri sistematik bir biçimde ortaya koymak amaçlanmıştır.

SWOT Analizi

Örgütler, günümüzde hayatta kalabilmek için çevrelerinde meydana gelen faaliyetlere ve değişimlere dikkat etmek zorundadırlar. Bunu yapmayan örgütlerin varlıklarını sürdürmeleri mümkün değildir (Smircich & Stubbart, 1985). Stratejik yönetim, örgütlerin uzun vadede hayatta kalabilmek, sürdürülebilir rekabet avantajı elde etmek ve ortalamanın üzerinde kâr sağlamak için üretim faktörlerini etkili ve verimli bir şekilde kullanmalarınıdır (Ülgen & Mirze, 2013).

Örgütler, üretim faktörlerini etkili ve verimli kullanabilmek amacıyla çevresel değişiklikleri stratejik analizler aracılığıyla değerlendirirler. Bu süreç, örgütün amaçlarını, iç ve dış çevresini ve çevreyle olan etkileşimlerini inceler. Stratejik yönetim sürecinin ilk aşamasında, örgütler tarihsel gelişim, yasal yükümlülükler, mevzuat, sektör ve faaliyet alanları, ürün ve hizmetler, paydaşlar, iç ve dış çevre, SWOT, PIMS ve değer zinciri analizleri gibi çalışmaları gerçekleştirirler (Dinçer, 2004).

Bu çalışmada örgütlerin kullandığı iç ve dış çevre analiz yöntemleri incelenmektedir. İç çevre analizi, örgütün güçlü ve zayıf yönlerini belirlemeyi amaçlar, dış çevre analizi ise örgütün faaliyet gösterdiği sektördeki fırsat ve tehditleri saptamayı hedefler (Kanbur & Karakavuz, 2017). Stratejik planlama ve karar verme süreçlerinde örgütler, bu analizler için genellikle SWOT analizini kullanırlar (Kurttila vd., 2000; Kangas vd., 2003; Ajmera, 2017). SWOT analizi, örgütlerin iç çevrelerindeki güçlü ve zayıf yönleri ile dış çevrelerindeki potansiyel fırsat ve tehditleri değerlendirmelerine olanak tanır (Yüksel & Dağdeviren, 2007).

Ancak, SWOT analizinin karar verme ve stratejik planlama sürecinde tek başına yeterli bir araç olarak düşünülmesi doğru değildir. SWOT analizi, bu süreçlere katkı sağlayan bir araç olarak değerlendirilmelidir (Hill & Westbrook, 1997; Dyson, 2004).

BULGULAR

Türkiye'nin uydu çalışmalarının SWOT analizi, alanla ilgili akademik yayınlar, sektör raporları ve Türkiye Cumhuriyeti Milli Uzay Programı'ndan elde edilen veriler ışığında gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sürecinde, uydu programlarının güçlü ve zayıf yönlerinin yanı sıra, sektördeki fırsatlar ve tehditler, ilgili literatür ve güncel raporlar aracılığıyla kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle, akademik çalışmalar programların bilimsel ve teknik temellerine ilişkin ayrıntılı bilgiler sunarken, sektör raporları uydu endüstrisinin mevcut durumunu ve gelecek projeksiyonlarını ortaya koymuştur. Milli Uzay Programı ise Türkiye'nin ulusal düzeydeki hedefleri ve stratejik öncelikleri hakkında yol gösterici bilgiler sağlamıştır. Bu çok boyutlu yaklaşım, Türkiye'nin uydu programlarına dair kapsamlı ve dengeli bir SWOT analizi yapılmasına olanak tanımıştır.

Türkiye'nin Uzay Çalışmaları SWOT Analizi

Türkiye'nin uydu çalışmalarına yönelik SWOT analizi raporlar ve akademik çalışmalardan elde

edilen verilerle oluşturulmuş olup aşağıda sunulmuştur:

Güçlü Yönler

Türkiye'nin Uzak Çalışmaları, son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. Bu çalışmalar, Milli Uzak Programı çerçevesinde yerli uydu teknolojilerinin geliştirilmesini hedeflemektedir. Program, Türkiye'nin uzun vadeli hedefleri arasında Ay'a iniş ve bölgesel konumlama sistemleri gibi projeleri barındırarak, ülkenin uzak alanında daha geniş bir varlık göstermesini sağlamaktadır. Türkiye, TÜRSAT 6A gibi bağımsız uydu geliştirme projeleri ile dışa bağımlılığı azaltmış ve teknolojik bağımsızlığını pekiştirmiştir. Ayrıca, Göktürk serisi uydular ile hem askeri hem de sivil amaçlı yüksek çözünürlüklü görüntüleme yetenekleri sunarak, stratejik ve güvenlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Türkiye, TÜBİTAK ve TUSAŞ iş birliği ile geliştirilen uydular sayesinde teknolojik etkinliğini ve üretim kapasitesini artırmaktadır.

Zayıf Yönler

Türkiye'nin uzak çalışmalarında karşılaştığı en büyük zorluklardan biri Ar-Ge eksiklikleridir. Bu eksiklikler, ilk uydu fırlatma girişimlerinde dış teknolojiye olan bağımlılık ve başarısızlıklarla sonuçlanmıştır. Uydu teknolojileri, yüksek düzeyde Ar-Ge yatırımı gerektirirken, Türkiye'nin bu alandaki Ar-Ge bütçesi, küresel rakiplerine kıyasla sınırlıdır. Kritik parçalar ve ekipmanlar konusunda hâlâ dış kaynaklara bağımlılık, projelerde gecikmelere ve maliyet artışlarına yol açabilmektedir. Uzak teknolojileri ve sanayi alanında nitelikli insan kaynağı eksikliği, gelişimin hızını yavaşlatabilir. Ayrıca, Türkiye'nin halen kendi topraklarından uydu fırlatacak bir uzak limanına sahip olmaması, uluslararası bağımlılığı artırmaktadır.

Fırsatlar

Uluslararası iş birlikleri, Türkiye'nin uzak teknolojileri alanında daha fazla bilgi ve teknoloji paylaşımını sağlayabilir. Özellikle iletişim uyduları ve askeri gözlem uyduları için yapılan anlaşmalar, Türkiye'yi bölgesel bir teknoloji sağlayıcısı konumuna yükseltebilir. Türksat 6A ve diğer iletişim uydularıyla Türkiye, uluslararası uydu pazarında daha rekabetçi bir konuma gelme potansiyeline sahiptir. Bu, Türkiye'nin ekonomik büyümesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, yerli uydu fırlatma kapasitesinin geliştirilmesi, bağımsızlık kazanma ve maliyetleri azaltma konusunda önemli bir fırsattır.

Tehditler

Uzak teknolojileri alanında küresel çapta artan rekabet, Türkiye'nin gelişimini yavaşlatabilir. Ayrıca, Türksat gibi haberleşme uydularının yörüngede yer bulma zorlukları, uydu çarpışma riskleri ve yörünge tahsisleri, önemli tehditler arasındadır. Ekonomik dalgalanmalar, bütçelerin kısıtlanmasına ve projelerin yavaşlamasına neden olabilir. Uluslararası ambargolar, teknoloji ithalatına getirilen kısıtlamalar ile projelerde aksamalara yol açabilir.

Özetle Türkiye'nin uzak çalışmaları SWOT analizi aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3*Türkiye'nin Uzay Çalışmaları SWOT Analizi Özeti (Tablo Yazar Tarafından Oluşturulmuştur)*

Kategori	Detaylar
Güçlü Yönler	- Milli Uzay Programı ile yerli üretim kapasitesinin artırılması - Uzun vadeli stratejik hedefler (Ay'a iniş, bölgesel konumlama sistemleri) - Bağımsız uydu geliştirme (Türksat 6A) - Askeri ve sivil kullanım için yüksek çözünürlüklü Göktürk serisi uydular
Zayıf Yönler	- Ar-Ge eksiklikleri ve dış teknoloji bağımlılığı - Kritik parça ve ekipmanlarda dışa bağımlılık - Sınırlı sayıda uzay mühendisi ve inovasyon alanı - Uydu fırlatma kapasitesinin gelişmemesi ve uluslararası bağımlılık
Fırsatlar	- Uluslararası iş birlikleri ve teknoloji paylaşımı - Yeni nesil bölgesel konumlama sistemleri ve ticari uydu pazarına giriş - Yerli uydu fırlatma kapasitesinin geliştirilmesi
Tehditler	- Küresel çapta artan rekabet ve yörünge kapasitesi sınırlamaları - Dışa bağımlılık riski ve yüksek maliyetler - Uluslararası ambargolar ve ekonomik dalgalanmaların projeleri etkilemesi

Bu tablo, Türkiye'nin uzay çalışmalarının mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyel yönlerini özetlemektedir. Bu analiz, Türkiye'nin uzay çalışmalarında karşılaştığı fırsatları ve tehditleri göz önünde bulundurarak, gelecekteki stratejilerini şekillendirmesi için bir rehber olacaktır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye'nin uydu ve uzay çalışmaları, uluslararası alanda teknolojik bağımsızlık ve güçlü bir konum elde etme amacı gütmektedir. Bu hedef doğrultusunda yapılan SWOT analizi, Türkiye'nin mevcut güçlü yönlerini korumasını, Ar-Ge yatırımlarını önemli ölçüde artırmasını ve insan kaynaklarına daha fazla yatırım yapmasını önermektedir. Uzay teknolojileri alanında rekabetin giderek arttığı bir dönemde, Türkiye'nin uluslararası iş birliklerinden maksimum düzeyde yararlanarak teknolojik inovasyonunu hızlandırması ve küresel rekabetteki pozisyonunu güçlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, ekonomik dalgalanmalara karşı daha dirençli bir yapı oluşturabilmek ve dışa bağımlılığı minimize etmek için yerli uydu fırlatma kapasitesinin geliştirilmesi stratejik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu adımlar, Türkiye'nin uzay ve uydu sektöründe daha bağımsız ve etkin bir rol üstlenmesini sağlayacak, uluslararası arenada söz sahibi olmasına katkıda bulunacaktır. Bu stratejik yatırımlar, sadece teknolojik gelişimi teşvik etmekle kalmayacak, aynı zamanda ekonomik ve stratejik avantajlar yaratma potansiyeline sahip olacaktır.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayına gerek yoktur.

Yazar Katkıları

Research Design (CRediT 1) Author 1 (%100)

Data Collection (CRediT 2) Author 1 (%100)

Research - Data analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Author 1 (%100)

Writing the Article (CRediT 12-13) Author 1 (%100)

Revision and Improvement of the Text (CRediT 14) Author 1 (%100)

Finans

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri: Desteklemiyor

REFERANSLAR

- Agarwal, R., & Mittal, S. K. (2023). *Atmospheric Sciences: An Introductory Survey*. Springer.
- Ajmera, P. (2017). Integration of SWOT Analysis with Analytic Hierarchy Process for Strategic Decision Making. *Decision Science Letters*, 6(4), 351-362.
- Arthur, M., et al. (2012). Active Satellites in Orbit. *International Journal of Satellite Communications*, 30(4), 123-130.
- Beysens, D., & van Loon, J. J. W. A. (2022). *Generation and Applications of Extra-Terrestrial Environments on Earth*. CRC Press.
- Buzulukova, N., & Tsurutani, B. (2022). Extreme Events in Geospace. *Elsevier*.
- Çal, Ş. (2021). Uzak Çöpleri ve Alınması Gereken Önlemler. *Uzak Bilimleri Dergisi*, 15(2), 45-53.
- Demirtaş, İ. (2002). *Uzak Fiziği*. Ankara Üniversitesi Yayınları.
- Dinçer, Ö. (2004). *Stratejik Yönetim ve İşletme Politikası*. Beta Yayınları.
- Dyson, R. G. (2004). Strategic Development and SWOT Analysis at the University of Warwick. *European Journal of Operational Research*, 152(3), 631-640.
- Facsko, G., et al. (2023). Space Weather Effects on Modern Technology. *Journal of Space Weather*, 11(1), 99-112.
- Geçgin, T. (2007). Uzak Radyasyonunun Etkileri ve Korunma Yöntemleri. *Ankara Üniversitesi Yayınları*.
- Hemond, H. F., & Fechner, E. J. (2023). *Chemical Fate and Transport in the Environment*. Academic Press.
- Hill, T., & Westbrook, R. (1997). SWOT Analysis: It's Time for a Product Recall. *Long Range Planning*, 30(1), 46-52.
- José, R., et al. (2021). Advancements in Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100479.
- Kanbur, E., & Karakavuz, A. (2017). Stratejik Yönetim Sürecinde İç ve Dış Çevre Analizi. *Journal of Social and Humanities Sciences Research*, 4(10), 1405-1418.
- Kangas, J., Pesonen, M., Kurttila, M., & Kajanus, M. (2003). A'WOT: Integrating the AHP with SWOT Analysis. *Proceedings of ISAHF*, 189-198.
- Köksal, S. (2021). Güneş Fırtınalarının Etkileri. *Astronomi ve Uzak Bilimleri Dergisi*, 29(1), 23-30.
- Kumar, P., et al. (2023). *Dynamics of the Earth's Atmosphere*. Springer.
- Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the Analytical Hierarchy Process (AHP) in SWOT Analysis—a Hybrid Method and Its Application to a Forest-Certification Case. *Forest Policy and Economics*, 1(1), 41-52.
- Linjie, S., et al. (2018). Global Trends in Satellite Launches. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(3), 1-10.
- Maini, A. K., & Agrawal, V. (2011). *Satellite Technology: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Moldwin, M. (2022). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.

- National Aeronautics and Space Administration. (1995). *NASA Safety Standard: Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris* (NSS 1740.14). Office of Safety and Mission Assurance.
- Nedim, S., Sözbir, M., Bulut, M., Gülgönül, Ş., Kuzu, L., & Dur, O. (2023). Space activities and the simultaneous development of the economy in Türkiye. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. <https://doi.org/10.29130/dubited.1226156>
- Özyıldırım, A. (2023). Space from perspective of national security. *Savunma Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.17134/khosbd.1210635>
- Poh, G. K., et al. (2023). Space Weather Monitoring and Forecasting. *Advances in Space Research*, 71(2), 456-468.
- Raphael, M., et al. (2022). Radiation Shielding in Space Missions. *Acta Astronautica*, 190, 362-375.
- Reichardt, J., & Timm, S. (2020). Atmospheric Composition and Dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(5), 2679-2694.
- Samundi, M. A. (2022). *Layers of the Earth's Atmosphere*. Oxford University Press.
- Samundi, M. A., et al. (2022). Exosphere Characteristics and Satellite Dynamics. *Space Science Reviews*, 218(3), 1-15.
- Sandeep, V., Chauhan, A., & Aasma, S. (2015). A comparative study of satellite orbits: Low Earth Orbit (LEO) and Geostationary Earth Orbit (GEO). *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 6(2). <https://doi.org/10.18090/SAMRIDDHI.V6I2.1559>
- Serene, S., & Sreeja, S. (2022). Satellite Missions and Applications. *Space Science Reviews*, 218(2), 1-17.
- Smircich, L., & Stubbart, C. (1985). Strategic Management in an Enacted World. *Academy of Management Review*, 10(4), 724-736.
- Ülgen, H., & Mirze, S. K. (2013). *İşletmelerde Stratejik Yönetim*. Beta Yayınları.
- van Wijngaarden, W. A., & Happer, W. (2023). Thermospheric Physics and Aurora Phenomena. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 238, 105974.
- Waldemar, R., et al. (2023). Space Environment Challenges for Satellite Operations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 59(3), 2100-2112.
- Wang, J., et al. (2023). Impact of Space Weather on Flight Delays. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103377.
- Yermolaev, Y. I., et al. (2023). Solar Activity and Solar Wind Parameters During the Last Four Solar Cycles. *Solar Physics*, 298(4), 1-17.
- Yüksel, İ., & Dağdeviren, M. (2007). Using the Analytic Network Process (ANP) in a SWOT Analysis—A Case Study for a Textile Firm. *Information Sciences*, 177(16), 3364-3382.
- Zheng, Y., et al. (2019). Space Radiation and Astronaut Protection. *NASA Technical Reports*.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The article "Türkiye's Satellite Activities and SWOT Analysis" provides an insightful overview of Türkiye's advancements in space technologies, specifically focusing on satellite development. The research begins by contextualizing Türkiye's satellite endeavors within the broader scope of global space activities, emphasizing the importance of satellite systems in communication, navigation, environmental monitoring, and military operations. Türkiye's space program, particularly its satellite activities, has strengthened the country's economic, scientific, and strategic capabilities, while also identifying critical gaps and challenges such as R&D deficiencies and foreign dependency. This SWOT analysis aims to evaluate Türkiye's satellite programs to provide a comprehensive understanding of its strengths, weaknesses, opportunities, and threats in the sector.

Method: The SWOT analysis employed in the article is based on a detailed literature review of official reports, academic papers, and reliable media sources concerning Türkiye's space and satellite efforts. The methodology systematically addresses internal and external factors impacting satellite projects, evaluating them through the lens of SWOT analysis. The data collection includes reviewing Türkiye's historical satellite developments, examining strategic documents, and analyzing the key milestones in its space journey. By applying SWOT analysis, the study highlights Türkiye's capabilities and limitations in satellite technology while proposing future strategies to mitigate challenges.

Findings: The article presents Türkiye's satellite activities through the framework of a SWOT analysis. The findings indicate that Türkiye has made significant progress in satellite development, particularly with domestic projects such as the Türksat and Göktürk series. Key strengths include technological independence through locally produced satellites, strategic military applications, and long-term goals like lunar missions. However, weaknesses are noted, including limited R&D funding and dependency on foreign technology. Opportunities arise from international cooperation and the development of a regional positioning system. Nonetheless, global competition and economic instability pose threats to sustained progress in this field.

Discussion: The discussion section critically analyzes the implications of Türkiye's satellite activities, comparing them to international trends. Türkiye's efforts in establishing a self-reliant satellite industry are praised, particularly for the strategic advantages gained through the Göktürk and Türksat satellites. However, the article reflects on the persistent challenges, such as external dependencies for critical components and the absence of a domestic launch site. The comparison to other space-faring nations reveals that while Türkiye is progressing, it must address internal inefficiencies and external economic risks. The article concludes by advocating for increased investments in R&D and human capital to further enhance Türkiye's position in global space activities.

Conclusion: Türkiye's investments in satellite technologies have positioned the country as a rising player in the global space sector. The article concludes that while Türkiye has achieved notable successes with its satellite projects, there are significant areas that require further attention. Increased focus on R&D and reducing foreign dependencies are crucial for ensuring the long-term sustainability of Türkiye's space ambitions. The SWOT analysis serves as a valuable tool for identifying strategic opportunities and potential threats, offering insights into the necessary steps for future development in Türkiye's satellite and space programs.

Recommendation: Based on the findings of the SWOT analysis, the article recommends several strategic actions for enhancing Türkiye's satellite programs. Key recommendations include increasing investments in R&D to reduce foreign dependencies, expanding international collaborations to acquire advanced technologies, and developing a domestic satellite launch capability to secure strategic autonomy. Additionally, the article advises a focus on developing a highly skilled workforce in space technologies to support long-term growth and competitiveness in the international space arena. These recommendations are intended to guide policymakers and industry stakeholders in shaping Türkiye's future in satellite and space technologies.

Design of a Multi-Purpose Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle

Berat Taha ÇETİN^{1*} Cansu AYGÜN¹ Onur TOPRAK¹ Sueda ÇELİK²

¹ İskenderun Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Engineering, Hatay, Türkiye

² İskenderun Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Engineering, Hatay, Türkiye

Article Info

Received: 12.11.2024

Accepted: 09.12.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

Detailed design,
Unmanned aerial vehicle,
Vertical take-off and landing.

ABSTRACT

This study focuses on the conceptual and detailed design of a multi-purpose Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Unmanned Aerial Vehicle (UAV) capable of operating in rugged terrains. Recent advancements in VTOL technology have significantly increased the demand for aircraft with reduced space requirements and versatile capabilities across sectors such as agriculture, logistics, and defense. VTOL aircraft, with their ability to efficiently alter operational payloads, are now used in various applications, including ammunition delivery, agricultural spraying, search and rescue, and firefighting. Thanks to their hybrid configurations, VTOL UAVs provide critical operational advantages, such as the ability to take off and land in confined spaces, hover during operations, and transition into horizontal flight mode. The UAV designed in this study has been optimized for challenging missions with a cruise speed of 20 m/s, a maximum altitude range of 100-500 meters, and a payload capacity of 0.5 kg. Configurable with various mission equipment, the UAV supports operations like data collection, cargo transport, and surveillance. The aerodynamic and structural features, including the NACA 4412 airfoil, inverted V-tail configuration, and modular components, were carefully selected to enhance performance. Analytical tools like XFLR5 and OpenVSP validated the aerodynamic parameters, while SolidWorks was used for modeling. The analyses confirmed that the UAV meets flight stability and performance requirements. This UAV provides a cost-effective, high-performance, and reliable solution for both defense and commercial applications. Its modular design allows easy adaptation to diverse mission scenarios. Ultimately, this study presents innovative approaches to enhance the operational potential of VTOL aircraft and offers practical solutions for various scenarios.

Çok Amaçlı Dikey Kalkış İniş Yapabilen Hava Aracının Tasarımı

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 12.11.2024

Kabul Tarihi: 09.12.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Detaylı tasarım,
Dikey kalkış-iniş,
İnsansız hava aracı.

ÖZET

Bu çalışma, engebeli arazilerde çalışabilen çok amaçlı bir Dikey Kalkış ve İniş (VTOL) İnsansız Hava Aracının (İHA) kavramsal ve detaylı tasarımına odaklanmaktadır. Son yıllarda VTOL teknolojisindeki hızlı gelişmeler, tarım, lojistik ve savunma gibi sektörlerde geleneksel sistemlere kıyasla daha az alan gerektiren ve çok yönlü yeteneklere sahip hava araçlarına olan talebi artırmıştır. Operasyonel yükü rahat şekilde değiştirilen VTOL hava araçları günümüzde mühimmat bırakma, tarımsal ilaçlama, arama kurtarma, yangın söndürme gibi birçok sektörde kullanılabilir. VTOL İHA'lar hibrit konseptleri sayesinde dar alanlarda kalkış ve iniş yapabilme, havada sabit kalabilme ve yatay uçuş moduna geçiş sağlayarak önemli operasyonel avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan İHA, 20 m/s seyir hızı, 100-500 metre arasında değişen maksimum irtifa aralığı ve 0,5 kg faydalı yük kapasitesiyle zorlu görevler için optimize edilmiştir. Hava aracı çeşitli görev aygıtları ile konfigüre edilerek veri toplama, yük taşıma ve gözlem gibi görev profillerini desteklemektedir. NACA 4412 kanat profili, ters V kuyruk konfigürasyonu ve modüler bileşenler gibi aerodinamik ve yapısal özellikler göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir. Tasarım sürecinde XFLR5 ve OpenVSP gibi analiz araçları modelleme içinse Solidworks kullanılarak aerodinamik parametreler doğrulanmış, tasarımın uçuş stabilitesi ve performans gerekliliklerini karşıladığı onaylanmıştır. Bu İHA, hem savunma hem de ticari uygulamalar için maliyet etkin, yüksek performanslı ve güvenilir bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca modüler yapısı sayesinde farklı görev senaryolarına kolayca uyum sağlayabilmektedir. Önerilen tasarım, günümüzün karmaşık operasyonel ihtiyaçlarını karşılamak ve İHA teknolojilerinde yenilikçi çözümler geliştirmek için önemli bir katkı sunmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, VTOL hava araçlarının kullanım potansiyelini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlar sunmakta ve çeşitli operasyonel senaryolar için çözümler önermektedir.

To cite this article:

Çetin, B. T., Aygün, C., Toprak, O., & Çelik, S. (2024). Design of a multi-purpose vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 113-126. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.3>

*Corresponding Author: Berat Taha ÇETİN, beratcetin.hubf21@iste.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INTRODUCTION

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become an important part of modern technology by being used in a wide variety of missions in different sectors. UAVs were first used for critical functions such as information gathering and target identification in military operations, but with the advancement of technological developments and autonomous systems, they have a wide range of applications in many fields such as logistics, agriculture, disaster management, infrastructure inspection and search and rescue (Çoban et al., 2022; Kurt & Ün, 2015). The main reason why UAVs have such a wide range of missions is their ability to offer customized solutions for mission profiles with different design concepts. Diversified design concepts such as fixed wing, vertical take-off and landing vehicles (VTOL), rotary wing and flapping wing have increased the operational flexibility and mission capability of UAVs, making them indispensable in both defence industry and commercial applications (Oktay & Özen, 2021; Uzun & Oktay, 2023).

One of the most important advantages of UAVs is their capacity to successfully accomplish many challenging missions without the need for human intervention. UAVs, especially in hard-to-access or hazardous areas, increase mission duration and efficiency by eliminating limitations such as G-force, fatigue and physical difficulties that humans may face. With the continuous development of autonomous systems, UAVs are becoming increasingly successful in performing high-precision missions by minimizing human errors and risks. For example, in the agricultural sector, UAVs have significantly reduced the need for manpower in functions such as monitoring the productivity of fields, analysing crop health, and planning fertilization and irrigation. These opportunities offered by UAVs contribute to sustainability and production efficiency in the agricultural sector, while at the same time reducing costs (Akkamış & Çalışkan, 2020).

In addition, in the infrastructure and energy sector, UAVs enable regular inspections of bridges, power lines and other infrastructure elements, thus facilitating maintenance and repair work. Offering a faster and more cost-effective solution compared to traditional methods, UAVs also increase occupational safety and reduce human-related risks. In the defence industry, UAVs, which are used in missions such as information gathering, reconnaissance and target identification, increase the security of operations and minimize the dangers for personnel in the field. UAV models designed for various operational needs are used in a wider range of missions every day, and in this direction, mission-specific designs of UAVs are of great importance (Mieloszyk et al., 2024; Wang et al., 2023).

In this study, the design of a multi-purpose VTOL class unmanned aerial vehicle (UAV) capable of operating in rugged terrain is discussed. Designed in accordance with the mission profile, this UAV will have the ability to take off vertically from the starting point, transition to cruise flight and land vertically again after the operation is completed. Thanks to its modular structure, this vehicle, which can easily adapt to various mission scenarios, has been optimized to perform different missions such as observation, data collection, and load carrying. During the design process, the UAV's wing profile, sizing, and dimensions were considered in detail, taking into account cost, time and production factors. These features aim to provide a user-friendly operation while increasing the mission effectiveness of the vehicle.

METHOD

The basic requirements for the designed aircraft to perform the task assigned by the operator are given with different mission scenarios. The designed aircraft is designed to drop 0.5 kg load in emergency situations or to carry equipment to observe anywhere. The aircraft has been designed to complete its mission in difficult terrain conditions. The design requirements of the aircraft designed in accordance with this mission profile are shown in Table 1.

Table 1

Aircraft design requirements

Requirement	Value
Cruise Speed	20 m/s
Stall Speed	15 m/s
Maximum Altitude	100-500 m
Climb Rate	2 m/s
Payload Capacity	0.500 kg

When the aircraft concept was selected, design requirements were taken into consideration, and when possible, mission scenarios were examined, it would be advantageous for the aircraft to have the ability to land and take off in all kinds of areas and to hover in the air. In this direction, the concept of the aircraft was determined as VTOL by evaluating parameters such as stability, maneuverability and take-off distance. This evaluation is given in Table 2.

Table 2

Aircraft concept decision matrix

Parameter	Importance [%]	Fixed Wing	Rotary Wing	VTOL
Stability	40	2	3	3
Manoeuvrability	20	3	1	2
Take-off Distance	40	1	3	3
Total	100	1.8	2.6	2.8

When selecting the wing concept of the aircraft, it is necessary to be very meticulous because the wing concept must be suitable for the mission profile and the aircraft concept. Considering the concept and mission profile of our aircraft, Delta Wing, Conventional Single Wing and Elliptical Wing were analysed in terms of manufacturability, drag force, stability and control parameters, and the Conventional Single Wing concept was decided (Uzun et al., 2022). The position of the selected wing concept is important in terms of avionics system layout, aerodynamic stability and vibration. For the wing position, a decision matrix was created by evaluating the stability, control and manufacturability parameters in Table 3, and as a result, a mid-wing structure was selected. Although this choice reduces the avionics system layout area, it will provide a more stable flight by reducing wing vibrations as it will be center supported.

Table 3

Wing Position Decision Matrix

Parameter	Importance [%]	Low wing	High wing	Mid wing
Stability	40	1	2	3
Control	30	2	2	2
Manufacturability	30	1	1	3
Total	100	1.3	1.7	2.7

The airfoil is the most important design parameter of an aircraft, it must meet the needs of the aircraft and be suitable for the mission profile and concept. If the important parameter for an aircraft is speed and maneuverability, thin airfoils with low camber ratio should be selected, while load-carrying aircraft need thick airfoils with high camber ratio. In this context, the aircraft designed in this study has speed and maneuverability due to its concept, so a thick airfoil is needed for load carrying (Erol et al., 2023).

Three different airfoils found in the literature were examined in the XFLR5 program. The speed, ceiling cruise altitude and Reynolds number given in equation 1 were used in this analysis.

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (1)$$

ρ : Density of air (kg/m³)

V : Cruising Speed (m/s)

C : chord length of the wing (m)

μ : Dynamic viscosity of air (kg/m. s)

As a result of the calculation, the Reynolds number was found to be 281,551.

The graph in Figure 1 illustrates the variation in lift coefficient with respect to the angle of attack for three different two-dimensional wing profiles. It is observed that, at an angle of attack of zero degrees, the NACA 4412 profile provides the highest lift coefficient.

Figure 1

Cl-Alpha graph

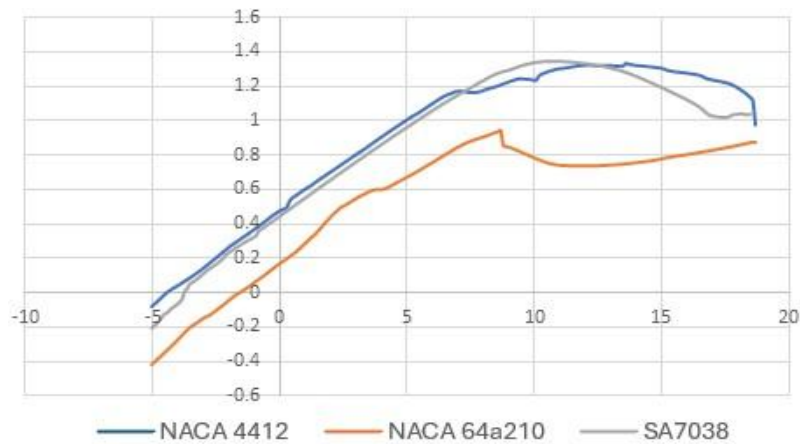


Figure 2 shows the drag coefficient of the three airfoils evaluated. Although there is not much difference between the airfoils at low angles of attack, as the angle of attack increases, the drag coefficient of the NACA 4412 profile is lower than the others.

Figure 2

Cd-Alpha graph

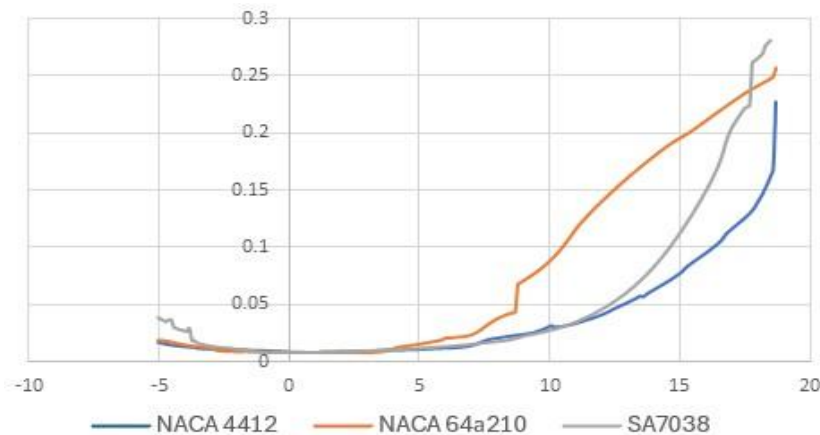


Figure 3 shows the variation of the moment coefficient according to the angle of attack. The most important parameter that ensures the longitudinal stability of the aircraft is the moment coefficient. During level flight, the aircraft will break its longitudinal stability and will tend to nose up, the aircraft must have a negative moment value in order to return to its stable position (Dağ et al., 2022). Thus, it will return to the equilibrium state without the use of control surfaces. When the results of the analysis in this context are analysed, it is seen that the most suitable airfoil is NACA 4412.

Figure 3
C_m-Alpha graph

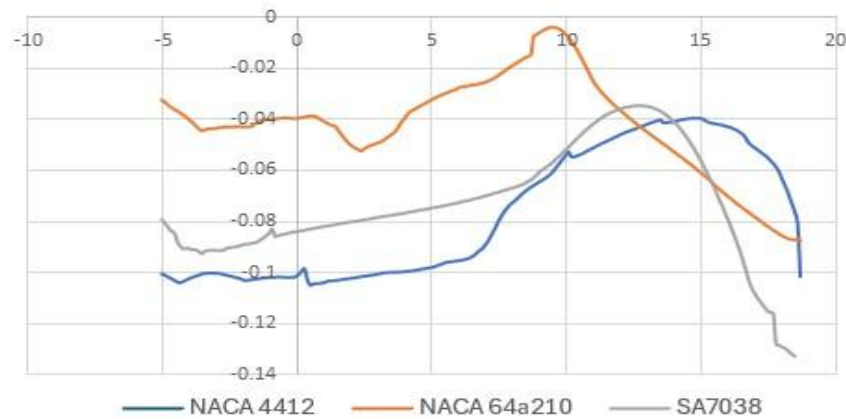


Table 4 shows the aerodynamic properties obtained as a result of the analysis performed on three different airfoils.

Table 4
Airfoils Aerodynamic Properties

Airfoils	C_{Lmax}	C_D	$(LD)_{max}$	C_{m0}
NACA 4412	1.332	0.091	89.34	-0.102
NACA 64a210	1.346	0.073	87.44	-0.04
SA7038	0.947	0.083	69.82	-0.081

Considering the obtained numerical properties and analysis graphs, the airfoil decision matrix is given in Table 5

Table 5
Airfoil Decision Matrix

Parameter	Importance [%]	NACA 4412	NACA 64a210	SA708
$(C_L)_{max}$	20	2	3	1
$(C_D)_{min}$	25	1	3	2
$(CM)_0$	15	3	1	2
$(C_L / C_D)_{max}$	25	3	2	2
Stall type	15	3	3	1
Total	100	2.55	2.45	1.65

As a result of the evaluation, it was decided that the NACA 4412 airfoil was suitable for the aircraft.

The tail configuration is a critical aspect to ensure optimal stability and control of the aircraft (Sertkaya, 2020). The tail assembly is the primary structure responsible for maintaining moment

equilibrium during flight, thereby stabilizing the aircraft along its longitudinal axis. For effective stability, the tail configuration should have a low drag coefficient and minimal interference from the propulsion system's vortices. Within this context, T-tail, H-tail, Inverted V-tail, and Conventional tail configurations have been considered. Based on evaluations, which focused on stability, weight, and drag parameters, the Inverted V-tail configuration was selected for the aircraft. Table 6 presents a decision matrix of these parameters (Ünler, et al., 2022).

Advantages of the Inverted V-tail:

- By combining the functions of both vertical and horizontal stabilizers, the configuration minimizes wing surface area, thereby reducing parasitic drag.
- With fewer structural components compared to other configurations, the design is lighter.
- The reduced number of control surfaces simplifies manufacturing.

Disadvantages of the Inverted V-tail:

- Assembly is challenging.
- Control is more difficult due to the smaller wing surface area.

Table 6

Tail Assembly Concept Decision Matrix

Parameter	Importance [%]	H-tail	T-tail	Inverted V-tail	Conventional Tail
Stability	30	1	1	3	2
Drag	30	1	1	2	3
Structural Weight	30	1	1	3	2
Manufacturability	10	3	2	1	2
Total	100	1.60	1.30	2.30	2.10

It is critical for our aircraft to land at the end of the mission without breaking down. Our aircraft with VTOL configuration must be ready to land in case of any emergency. Considering these situations, it was decided that the landing gear configuration should be tricycle, considering the possibility of failure of the vertical engines.

The weight of the aircraft was determined as 4.300 kg by measuring the electronic and structural elements we will use. The maximum payload weight was determined as 0.500 kg. The total weight of the aircraft is determined as 4.300 kg by weighing each component separately. A sufficient lift force must be generated to support this weight during flight. In order to maintain a safe flight in cruise flight, it is essential that the carrying force to be generated by the geometric properties of the wing structure exceeds the weight of the vehicle. The cruise speed of the vehicle is determined as 20 m/s and the stall speed as 15 m/s. The required wing area is calculated according to the stall speed of the aircraft. Equation 2 expresses the balancing of the forces acting on the aircraft in the vertical axis during cruise flight.

$$W = L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (2)$$

Equation 3 can be used to calculate the wing surface area when considering stall conditions. This equation has been rearranged for this calculation, providing an expression for stall speed in terms of the vehicle's characteristic parameters.

$$V_{\text{stall}} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L_{\text{max}}}}} \quad (3)$$

Using the expression in Equation 3, the minimum wing area requirement for the aircraft was calculated to be 0.24 m². However, as this value lies at the lower threshold, the risk of stalling increases under these conditions. Therefore, to enhance safety, a 25% safety factor was applied to the wing area. Following this adjustment, the wing area for the aircraft was determined to be 0.30 m².

The aspect ratio (AR), another characteristic feature of the wing element, has been set to 7.5. AR is a geometric parameter that directly influences the lift-to-drag ratio of the wing. The mathematical model is presented in Equation 4. Based on this model, typical aspect ratio ranges for various aircraft types have been established: 20–40 for gliders, 4–8 for mini-UAVs, 5–9 for passenger aircraft, 6–9 for low subsonic commercial aircraft, and 8–12 for high subsonic commercial aircraft (Raymer, 2012).

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (4)$$

$$S = b * c \quad (5)$$

Using the equations in Equations 4 and 5, the wing span was determined as 1.5 meters and the chord length as 0.20 meters.

Following the completion of wing sizing, the sizing of the tail components was undertaken to effectively maintain the moment balance of the designed aircraft. To ensure complete aerodynamic stability, horizontal and vertical tail designs were carried out, leading to the selection of an Inverted V-tail configuration as the tail concept for the aircraft. This sizing approach is based on the principles of the conventional T-tail configuration. Accordingly, vertical and horizontal tail volume coefficients were determined, and the tail surface areas were calculated.

$$C_{HT} = \frac{S_{HT} L_{HT}}{S_W C_{MAC}} \quad (6)$$

$$C_{VT} = \frac{S_{VT} L_{VT}}{S_W b_w} \quad (7)$$

In Raymer's study, the vertical and horizontal tail volume ratios for composite mini-UAVs were determined as 0.50 and 0.04, respectively. The length of the moment arm was also decided to be 0.90 meters, assuming the vertical and horizontal moment arms to be equal. The design values obtained as a result of the detailed design of the aircraft are given in Table 7.

Table 7
Aircraft Properties

Parameter	Value
Wing span	1.5 m
Cord Length	0.20 m
Aspect ratio	7,5
Taper ratio	1
Wing Area	0.30 m ²
Tail Cord Length	0.15 m
Moment arm length	0.90 m
Inverted V-tail angle	-30°

Based on the numerical data obtained from these calculations, the designs were created. SolidWorks and OpenVSP software were utilized during the design process. The resulting aircraft design is presented in Figures 4, 5, and 6.

Figure 4

The isometric view of the vehicle's SolidWorks design

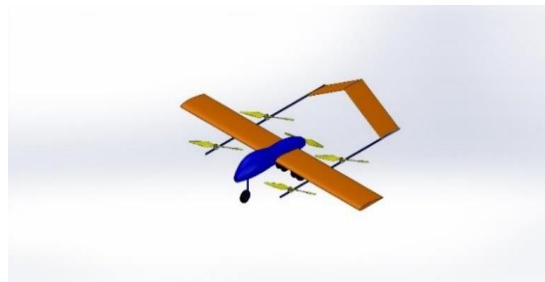


Figure 5

The side view of the vehicle's SolidWorks design

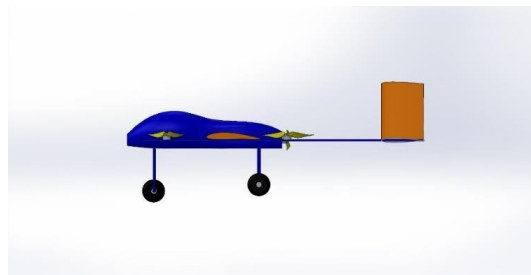
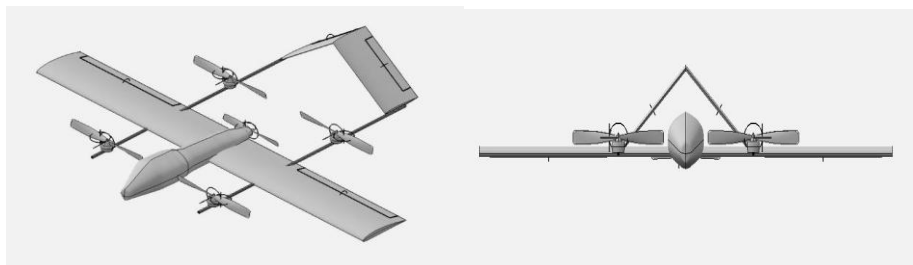


Figure 6

The view of the vehicle's OpenVsp design



RESULTS

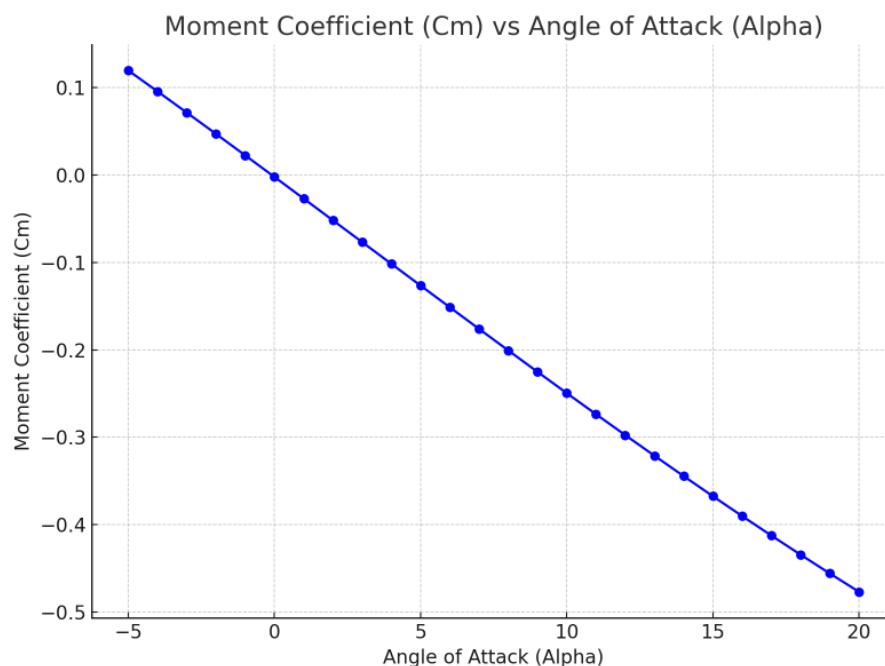
Based on the design requirements and mission profile, the engineering model of the aircraft was created and modelled using various software tools. Subsequently, to validate the design, analyses were conducted using XFLR5 and OpenVSP software. The conditions and methods used in the analyses are presented in Table 8.

Table 8
Analysis Conditions

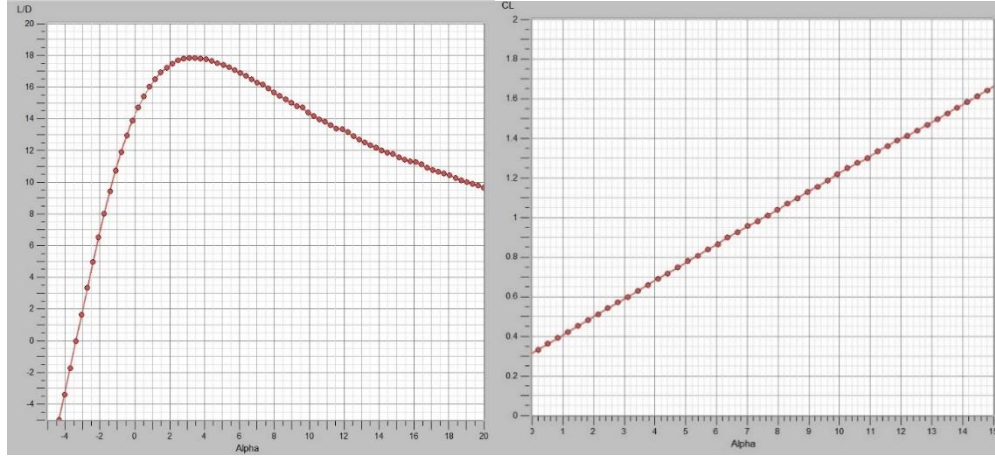
Metot	Vortex Lattice
Reynolds Number	300,000
Mach	0.059
ρ	1.225 kg / m ³
V_{∞}	20 m/s

Under these conditions, an analysis was performed using XFLR5 software, and by examining the C_m graph Figure 7, it was observed that as the angle of attack increases, a negative moment is generated, while a positive moment is produced as the angle of attack decreases. This indicates that in the event of a disturbance that disrupts the aircraft's longitudinal stability, it will return to its equilibrium position, meaning it will remain stable in the longitudinal plane.

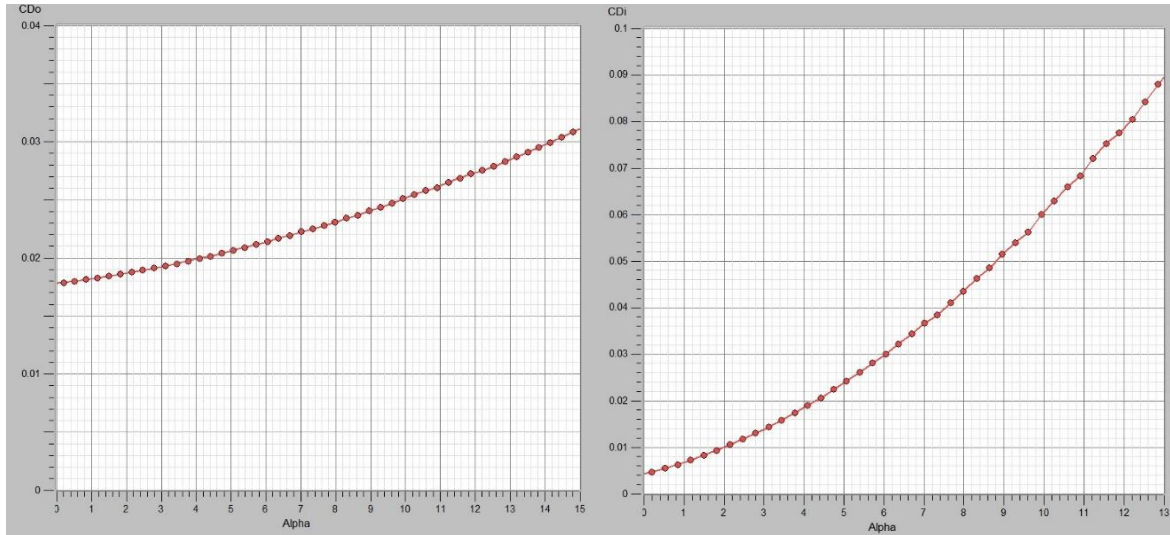
Figure 7
 C_m -alpha graph



The aerodynamic analysis of the aircraft was conducted using OpenVSP software, and it has been demonstrated that the required aerodynamic performance parameters for the mission profile are met.

Figure 8*Cl-alpha and L/D Alpha graphs from OpenVSP*

The aerodynamic analysis of the aircraft was conducted using OpenVSP software, and it has been proven that the necessary aerodynamic performance parameters for the mission profile are achieved. A critical factor for the aircraft's transition from multicopter mode to cruise mode is the selection of motors and propellers. To ensure these selections are suitable for the aircraft, the total drag must be calculated, and the minimum thrust value should be determined. In this context, the drag analysis of the aircraft was performed using OpenVSP software, categorized into induced drag and parasitic drag. The results of these analyses are presented in Figures 9.

Figure 9*CD-alpha and CDi alpha graphs from OpenVSP*

As a result of aerodynamic analysis with only wing and tail elements, the total drag coefficient of the aircraft was found to be 0.022. Then, the parasitic drag coefficient with the whole geometry of the aircraft was found to be 0.044. This obtained data is proved by equation 8.

$$C_D = c_d + \frac{C_L^2}{\pi e A R} \quad (8)$$

Equation 9 was used to calculate the minimum thrust required by the aircraft for cruise flight. Taking a safety factor of 2, the required thrust is calculated as 2.115 N.

$$T = D = \frac{1}{2} \times q \times V^2 \times S \times C_D \quad (9)$$

EMAX MT3515 brushless motor will be used as the horizontal propulsion motor of the vehicle. Considering the minimum thrust value obtained, APC 13x4 propeller was selected with the values given in Table 9.

Table 9
Cruise Motor Propeller Values

Voltage (v)	Propeller Size (inch)	Amper A	Thrust G	Power W	Efficiency G/W
22.2	12x3.8 CFRP Propeller	2	390	44.4	8.8
		4	650	88.8	7.3
		6	880	133.2	6.6
		8	1120	177.6	6.3
		10	1300	222	5.9
		12	1450	266.4	5.4
		14	1640	310.8	5.3
	APC 13x4	2	410	44.4	9.2
		4	700	88.8	7.9
		6	940	133.2	7.1
		8	1210	177.6	6.8
		10	1430	222	6.4
		12	1610	266.4	6
		14	1720	310.8	5.5

To meet the vertical take-off requirements, four Sunnysky X4108S KV480 brushless motors were chosen. After reviewing the motor's technical specifications, three propeller models with different sizes were examined for the best match. During the evaluation, key parameters such as the current drawn by the propellers from the power source, the maximum thrust provided, and the required power were considered. Table 10 contains the analysed parameters for these propellers. As a result, with a safety factor of approximately 2, the required minimum thrust was determined to be 8600 g. The APC 13x4 propeller, capable of achieving nearly twice the total weight's thrust capacity (7360 g), was selected as the most suitable option for the drive system. It was anticipated that the difference between the safety factor and the maximum values in the motor's technical data would be compensated for by the propeller material.

Table 10*Cruise Motor Propeller Values*

<i>Prop size (inch)</i>	<i>Voltage(V)</i>	<i>Throttle</i>	<i>Current (A)</i>	<i>Thrust (g)</i>	<i>RPM (RPM/Min)</i>	<i>Güç (W)</i>
APC11x4.7	14.8	100%	7.8	950	5840	115.44
14x4.7		100%	13.6	1410	4825	201.28
APC11x4.7	18.5	100%	11.2	1350	6905	207.2
14x4.7		100%	18.3	1820	5450	338.55
APC13x4	22.2	100%	12.1	1840	8230	268.62
APC12x3.8		100%	18.6	1840	8230	412.92

DISCUSSION

The engineering model of the designed aircraft has been validated through analysis, meeting the required aerodynamic coefficients and forces. While the aircraft is capable of take-off and landing in various terrain conditions, its structural strength limits its mission profile. Surveillance, reconnaissance, and payload transport missions of up to 0.5 kg can be carried out with the current design; however, for different mission modules, the aircraft structure should be reinforced, and the propulsion system should be upgraded accordingly. To prevent the aircraft from experiencing structural failure during blind flight in challenging terrain conditions under the operator's control, a sensor-based control system is necessary.

During take-off, the four vertical motors will consume a high amount of power; however, during cruise flight, only one cruise motor will be used along with the aircraft's aerodynamic features, resulting in lower battery consumption. Therefore, to extend mission duration, a modular battery compartment could be designed, or a separate optimization study for the power system would be necessary.

CONCLUSION

As a result of the conducted studies, the concept and detailed design of a VTOL unmanned aerial vehicle (UAV) were developed, and an engineering model was created. The designed aircraft features four vertical motors, one cruise motor, a 1.5-meter wingspan, and an inverted V-tail configuration. Based on the analyses and calculations, the aircraft meets the necessary aerodynamic parameters for flight. The body design reduces the flow stall point, preventing drag caused by pressure. Additionally, inspired by the shape of a dolphin, the body design stores the avionics at the front, balancing the tail moment. The choice of tail configuration aims to reduce drag resulting from the geometry.

RECOMMENDATIONS

To further develop the aircraft and enable it to perform new mission profiles, different materials could be used in the structure to make the aircraft lighter. By designing alternative power systems (e.g., solar panels), the efficiency of the battery could be improved, or power distribution optimization could be implemented. To increase the range of mission profiles and applications, modular ports could be added for integrating various devices.

Ethical Committee Approval

No human or animal subjects requiring ethical committee approval were used in this study. The research was conducted using publicly available data sets, literature reviews, or theoretical analyses. In accordance with ethical rules, full compliance with academic honesty and scientific ethical principles was maintained at every stage of the research process. Therefore, ethical committee approval was not required.

Yazar Katkıları

Research Design (CRediT 1) Yazar 1 (100%)

Data Collection (CRediT 2) Yazar 3 (50%) – Yazar 4 (50%)

Research - Data Analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Yazar 2 (60%) – Yazar 4 (40%)

Writing of the Article (CRediT 12-13) Yazar 2 (60%) – Yazar 1 (40%)

Text Revision and Improvement (CRediT 14) Yazar 2 (30%) – Yazar 1 (40%) – Yazar 2 (30%)

Funding

There is no funding.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Sustainable Development Goals (SDG)

Sustainable Development Goals: 9 Industry, Innovation and Infrastructure

REFERENCES

- Akkamiş, M., & Çalışkan, S. (2020). Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi Derleme Makalesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mihad>
- Çoban, S., Kiracı, K., Akan, E., & Uzun, M. (2022). MALE UAV selection in interval Type-2 fuzzy sets environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 43(5), 5567–5594. <https://doi.org/10.3233/JIFS-212574>
- Dağ, T., Ünler, T., Çopur, E. H., & Çakın, U. (2022). Kentsel hava taşımacılığında kullanılacak dikey iniş-kalkış kabiliyetine sahip bir hava aracının kavramsal tasarımı ve menzil hesabı. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(3), 649–664. <https://doi.org/10.36306/konjes.1090492>
- Erol, V., Şumnu, A., & Eraslan, Y. (2023). *Optimization of NACA 4412 Airfoil Using Taguchi Method*. www.yazyayinlari.com
- Kurt, Ş., & Ün, O. (2015). İnsansız hava araçları (İHA) üzerine hava hukuku açısından bir değerlendirme. *Unpublished work*.
- Mieloszyk, J., Tarnowski, A., & Goetzendorf-Grabowski, T. (2024). Designing aerodynamic devices for UAV – lessons learned. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 96(1), 73–83. <https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2023-0060>
- Oktay, T., & Özen, E. (2021). Döner kanatlı insansız hava aracının sistem tasarımı ve kontrolü. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.957056>
- Raymer, D. (2012). *Aircraft design: a conceptual approach*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- Sertkaya, A. (2020). *Mini Siha Konsept Tasarımı ve Analizi*. <https://www.researchgate.net/publication/340038695>
- Ünler, T., Dağ, T., & Öztürk, M. (2021). Sabit kanat bir insansız hava arac konsept tasarımı. *3rd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*.
- Uzun, M., & Oktay, T. (2023). Simultaneous UAV having actively sweep angle morphing wing and flight control system design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(7), 1062–1068. <https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2022-0259>
- Uzun, M., Özdemir, M., Yıldırım, Ç. V., & Çoban, S. (2022). A novel biomimetic wing design and optimizing aerodynamic performance. *Journal of Aviation*, 6(1), 12–25. <https://doi.org/10.30518/jav.1031989>
- Wang, Y., Li, X., Wu, T., & Yin, H. (2023). Multidisciplinary Design and Optimization of Variable Camber Wing with Non-Equal Chord. *Aerospace*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/aerospace10040336>

Examination of Vision and Organizational Value Statements in Air-Cargo Companies

Işık ÇİÇEK*^{ID}

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, Konya, Türkiye

Article Info

Received: 11.11.2024

Accepted: 15.12.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

Air-cargo,
Vision,
Organizational values,
Directorate General of Civil
Aviation (DGCA) of Turkey

ABSTRACT

Air cargo companies discovered new business dynamics in response to the increased demands during the pandemic. The demand that continued in the post-pandemic period has also enabled them to redefine their goals for the newly developed business processes. The business visions related to these goals could also be decisive for the organizational values of the cargo companies. In the literature of strategic management, organizational values are needed for employees to share the vision, which is defined as the desired future position or dream. Organizational values are the most important component of corporate culture. In this regard, organizational values will play an important role in creating a conducive environment for achieving the vision. In this study, the vision statements and organizational value statements of four businesses licensed in the air cargo operation class by the General Directorate of Civil Aviation, which only engage in cargo transportation, were examined. The vision and organizational value statements obtained from the official websites of the businesses were subjected to content analysis. In the content analysis, the statements were coded and summarized into categories, and then themes representing these categories were created. After the vision and organizational value themes for the sector as a whole were identified, the commonalities for each business were determined, and a chi-square test was conducted. According to the chi-square test result, businesses in the air cargo sector are not statistically significantly different from the overall sector in terms of the content of their vision and organizational value statements. The themes of vision statements are mostly also present in organizational value statements. Vision themes include globalization, customer, partner, sustainability, quality, leader, special flexible solutions, innovation, growth, competition, and professionalism. Some of the organizational value themes are honesty, fairness, customer focus, respect for people, innovation, teamwork, leadership, performance, and globalization. The research is the first study in the literature to examine the relationship between vision statements and organizational values in Turkish air cargo companies, and it revealed that the companies examined were not significantly different at the sector level. Corporate managers must closely monitor the process of dynamically creating organizational values in order to realize the vision

Havayolu Kargo İşletmelerinde Vizyon ve Örgütsel Değer ifadelerinin İncelenmesi

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 11.11.2024

Kabul Tarihi: 15.12.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Havayolu kargo,
Vizyon,
Örgütsel değerler
SHGM.

ÖZET

Havayolu kargo işletmeleri, pandemi döneminde artan taleplere karşı yeni iş dinamikleri keşfettiler. Pandemi sonrası dönemde de devam eden talep yeni geliştirdikleri iş süreçleri için hedeflerini yeniden oluşturmalarını da sağlamıştır. Söz konusu hedefler ile ilgili işletme vizyonları, kargo şirketlerinin örgütsel değerleri için de belirleyici olabilecektir. Stratejik yönetim literatüründe gelecekte arzu edilen konum ya da hayal olarak tanımlanan vizyonun çalışanlarca da paylaşılması için örgütsel değerlere ihtiyaç vardır. Örgütsel değerler, kurum kültürünün en önemli bileşenidir. Bu açıdan örgütsel değerler, vizyona ulaşma sürecinde önemli bir elverişli ortam rolü üstlenecektir. Bu çalışmada Sivil Havacılık Genel Müdürlüğünde hava kargo işletmesi sınıfında ruhsatı bulunan, sadece kargo taşımacılığı yapan 4 adet işletmenin vizyon ifadeleri ve örgütsel değer ifadeleri incelenmiştir. İşletmelerin resmi web sitelerinden elde edilen vizyon ve örgütsel değer ifadeleri içerik analizine tabi tutulmuştur. İçerik analizinde ifadeler kodlanarak kategoriler olarak özetlenmiş, daha sonra bu kategorileri ifade eden temalar oluşturulmuştur. Sektörün geneli için vizyon ve örgütsel değer temaları ortaya çıkarıldıktan sonra söz konusu her bir işletme için ortak olanlar belirlenerek ki-kare testi gerçekleştirilmiştir. Ki-kare testi sonucuna göre havayolu kargo sektörünün geneline göre işletmeler vizyon ve örgütsel değer ifadelerinin içeriği açısından istatistiksel olarak anlamlı derecede farklı değillerdir. Vizyon ifadelerinin temaları çoğunlukla örgütsel değer ifadelerinde de geçmektedir. Vizyon temaları; küreselleşme, müşteri, ortak, sürdürülebilirlik, kalite, lider, özel esnek çözümler, inovasyon, büyüme, rekabet ve profesyonelliktir. Örgütsel değer temalarından bazıları ise dürüstlük, adalet, müşteri odaklılık, insana saygı, yenilikçilik, takım çalışması, liderlik, performans ve küreselleşmedir. Araştırma, Türk hava kargo işletmelerinde vizyon ifadeleri ile örgütsel değerleri arasındaki ilişkiyi inceleyen alan yazındaki ilk çalışma olup, incelenen işletmelerin sektör düzeyinde anlamlı derecede farklı olmadığını ortaya çıkarmıştır. Kurum yöneticilerinin vizyonu gerçekleştirmek için kurumsal değerlerin dinamik olarak yaratılması sürecini yakından takip etmesi gerekmektedir.

To cite this article:

Çiçek, I. (2024) Examination of vision and organizational value statements in air-cargo companies. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 127-141. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.4>

*Corresponding Author: Işık ÇİÇEK, cicekis@yahoo.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INTRODUCTION

In today's increasingly competitive conditions, a vision statement is an important statement that businesses will use to shape their future. In air transportation, where international legislation prevails, the rules are clearly determined by ICAO and it is explained how the internal processes of the enterprises will be carried out. At the country level, businesses in the market economy continue their passenger or cargo transportation activities according to the local authority DGCA and the level of liberalization allowed within the framework of the country's macroeconomic policies. In this context, although the standards set and the limited economic role in the market economy are the same for many businesses, long-term goals, in other words, the vision, may have different content for each organization.

In the literature, the airline industry is described as a sector that is open to change, dynamic, and where uncertainty and competition are intense (Garakuş, 2023; Sercan et al, 2023). The increasing demand for better quality transportation services in the aviation industry has pushed many airline companies to adopt a management approach that exceeds the expected standard, is of high quality and meets the expectations of all stakeholders. According to Oschman (2019:1), the aviation industry is a technology-oriented sector characterized by automation and digitization elements that integrate complex service production systems and processes in order to adapt to the ever-increasing global air transportation demand (Çubukçu, 2023). For these organizations, the most important external environment component is technology. In this context, rapidly changing technologies may cause a change in the definition of vision, which is the top heading of the goals of the companies in the sector, in a shorter time than expected. These vision statements will shape the goals to be determined for the future in a more dynamic context.

Vision, organizational values, and employee behaviors are closely related to each other values are a set of guiding rules that force members to behave consistently in order for an organization to survive and develop safely within certain limits. Values describe how the organization plans its business. Values are characteristics specific to the organization that determine the way of thinking, behavior and reactions to events. For this reason, changing vision content as a top heading of the goals will also change the values that employees will adopt in order to achieve the goals (Kılıç, 2010).

Air transportation is the most modern form of logistics offered by developing technology. Air transportation is free from many limitations that affect other transportation modes (air, land, sea, railway, and pipeline transportation) (Akoğlu and Fidan, 2020). Air transportation, a fast and safe means of transportation, has always been the focus of attention of receivers and senders. As predicted by international authorities, air cargo transportation is constantly evolving. The advancement of air transportation will allow exports and therefore the economy to become stronger (Balık, 2015). Recently, businesses' efforts to reduce storage costs, their desire to shorten the duration of their goods' movement in the market, and the short product life span in many industries (computers, medical products) have revealed the importance of the concept of speed. The spread of e-commerce and the provision of logistics solutions have increased the competitiveness of organizations that operate on a global scale, therefore the demand for international goods has increased and air cargo transportation has become inevitable for an effective commercial order (Zhang A. and Zhang Y, 2002:281, Balık, 2015). It is expected that the importance of air cargo and its share in general transportation will increase in the coming period. Domestic air cargo companies such as THY Cargo, MNG Cargo, ACT Cargo, ULS Cargo are constantly increasing their capacity in Türkiye. In this context, examining the relationship between the visions that companies in the air cargo transportation sector, which play an important role in the export and import of countries, will determine by taking on this strategic role and the organizational values that will be developed based on these visions will reveal sector-specific

benefits.

In the study, the vision and value statements of Turkish Cargo, MNG Airlines and Transportation, ULS Airlines Cargo Transportation, and ACT Airlines, which have an air cargo operating license at Directorate General of Civil Aviation (DGCA) of Türkiye and only carry cargo transportation, were examined. The aim of the research is to reveal a relationship between vision statements and values in Turk Air Cargo companies.

LITERATURE FRAMEWORK

Air-Cargo Organizations

Air cargo is defined as the transportation of any goods from one place to another by aircraft (Allaz, 1998:8). Air cargo, beyond just the meaning of transportation by air, has a technical aspect that is highly standardized and regulated, and it includes many components. All loads, except passenger luggage carried in the cargo compartment, constitute the subject of air cargo (O'Connor, 2000:271). Air cargo transportation; in accordance with ICAO (International Civil Aviation Organization) and IATA (International Air Transport Association) rules, packaging and labeling of goods, excluding postage and baggage, preparation of documents appropriately and taking into account country and carrier restrictions. Air-cargo is defined as being shipped by an aircraft (Öztürk, 1993:23, Balık, 2015)

The air cargo sector plays an important role in the ever-increasing world trade. Its other advantages and speed increase the interest in air cargo. The increase in the circulation of goods, especially those that are risky to be transported by land and sea, in world markets is one of the most important factors affecting the development of air cargo (Balık, 2015).

Air cargo transportation itself is considered a large industry in itself. In Türkiye, the number of terminals operated by private sector general aviation-cargo businesses is 7. According to the latest 2023 data, the total cargo transported on domestic and international flights is 4,211,507 tons. There are 34 aircraft dedicated solely to cargo transportation, and the total cargo capacity of these aircraft is 2,513,875 kg. The cargo capacity has increased by 730% in the last 21 years. (DGCA report, 2023). At the same time, it has a structure that provides input to the production processes of other sectors (Hensher, 2001:1). The growth of cargo volume worldwide has increased the importance of effective management of cargo capacity (Hertwig and Rau, 2010:6, Balık, 2015).

In Directorate General of Civil Aviation (DGCA) of Türkiye legislation,

Cargo aircraft: It refers to an aircraft designed entirely to carry cargo,

ARTICLE 28 – (1) It refers to enterprises that will transport passengers and cargo with aircraft with a capacity of twenty or more seats, and enterprises that will transport only cargo.

According to Air Cargo and Mail Security Instructions; There are two groups of air cargo authorized agencies: A and B.

a) Group A authorized agency: Logistics providers, airline companies, transportation organizers and ground handling companies that carry out security checks and scanning of cargo and mail and/or are responsible for integrated storage and transportation services in the secure supply chain,

b) Group B authorized agency: Transportation organizers who deliver cargo and mail to Group A authorized agencies, but do not carry out security practices and screening related to cargo and mail.

Vision

According to Burnside (1994), vision can be described as a desired situation, a living picture of

the future. Şimşek (1998) defined vision as "a process that determines the values of a business, its current situation, the goals it wants to achieve, and guides the organization towards the targeted future by integrating employees around a common goal." Vision is a management tool with future reference (Savaş and Arıcıoğlu, 2024). It functions as the paradigm that determines the corporate culture of organizations, world view, future perspective, and managers' perception of the universe. Thus, goals and what needs to be done to achieve these goals are determined (Barca and Balcı, 2006). The vision must be known and shared by employees. Because setting a common goal and reaching there can only be achieved with a shared vision (Çetin, 2009, Haque et al, 2016).

Features of Vision

According to Yalçın (2002), a strong vision must have the following features:

“Must show what the future looks like (be imaginable).

- It must be attractive to employees, customers and shareholders in the long term.
- Must have realistic goals (be achievable).
- Must show sufficiently clear direction in decision making (being focused).
- It should give people the opportunity to take initiative according to changing conditions (being flexible).
- It should be easily explainable to other people (communicable).”

According to Eren, the features of vision are as follows:

“It is original for every manager and leader.

- Requires perception of all activities.
- It gains value as it is shared.
- It directs strategies.
- It provides information about the creativity, innovation, risk-taking and participation qualities of strategists.” (Eren, 2002:12).

A well-conceived vision consists of two basic components; “core ideology and the envisioned future”. Core ideology consists of values that determine the character of an organization, such as the life course of the product and market, technological status, management principles, personal principles and managers (Şimşek, 1998). Core ideology defines what the organization stands for and why it exists. Effective vision must include the core ideology of the organization (Çetin, 2009). Core ideology also consists of two parts: core values and objectives, which are the most basic reason for the existence of the organization. Designed future; It includes becoming, achieving, creating, and requires significant change and progress to achieve these (Collins and Porras, 1999, Çetin, 2009, Haque et al., 2016).

Organizational Values

According to Mirze and Ülgen, the vision is the combination of the organization's mission, goals, objectives and values. Mission is the reason for the existence of the organization and is determined to give direction and meaning to it. The purpose must create direction in the growth process for the future and reveal common values. Values show what is important for managers and employees in achieving the goal (Mirze and Ülgen, 2004, Çetin, 2009, Bourne and Jenkins, 2013). Organizational values are a fundamental part of organizational culture (Kılıç, 2010; Bourne and

Jenkins, 2013).

Values guide the organization's decisions, choices and strategies. Core values should have the characteristics of the common and shared beliefs in the organization, a set of moral principles, and the basis of legitimacy on which the purpose and vision will be processed (Narinoğlu, 2006; Çetin, 2009; Bourne and Jenkins, 2013).

Core values, formed as a result of long time and effort, also form the basis for the culture of the organization. The values of an organization may include integrity, openness, honesty, freedom, equality of opportunity, merit or commitment. These, together with the vision, change the organization's perspective on life (Senge, 2002; Akdemir and Yılmaz, 2005; Çetin, 2009; Bourne and Jenkins, 2013).

The relationship between vision and organizational values

Vision simplifies the potentially hundreds of detailed decisions by providing clarity in the overall direction for change. This is important because people often disagree or are confused about the direction to take. An effective vision eliminates this obstacle (Çetin, 2009). Therefore, there is a significant relationship between values and vision.

Perceiving values as a part of the vision is useful in overcoming some obstacles. Vision means finding direction with values, communicating and sharing (Akdemir and Yılmaz, 2005). Values mean “how do we want to behave on the path we set out to achieve our vision?” They answer the question (Çetin, 2009). Without a clear understanding and belief in organizational values, the vision cannot be shared by employees (Padaki, 2000).

Organizational values are elements of vision. Kılıç (2010) stated that:

Organizational ideal + Values = Vision

A vision statement must be obvious and significant to all stakeholders; good vision statements are succinct and utilize aspirational yet measurable language, enabling personnel to recognize when the vision has been accomplished or requires modification to better align with the organization's objectives. This process of meaning-making occurs through organizational values (Pekarsky 2007, Gurley et al., 2014).

Stakeholders in a vision-driven company, through a well-defined and endorsed vision statement, are clear about their direction, purpose, and criteria for success. Organizational values lead this identification process with the vision for employees. Kose (2011) asserts that organizational values can be leveraged through a well-articulated and endorsed vision statement to instigate significant change inside organizations at various levels (Gurley et al., 2014).

Organizational values statements delineate the collective convictions of an organization. DuFour and Eaker (1998) asserted that core values declarations address the inquiry, "How must we conduct ourselves to actualize our collective vision?" (Gurley et al., 2014). Blanchard and O'Connor (1997) posited that when individuals are aligned with shared corporate values and unified by a common purpose, they may achieve remarkable outcomes and provide their organization with a competitive advantage (Gurley et al., 2014). Blanchard and O'Connor (1997) asserted that firms grounded in strong, shared values demonstrate superior client service, increased profitability, and enhanced quality of work environments for their employees in relation to organizational vision. The writers asserted that these shared principles serve as the principal authority within an organization, to which all members are accountable. Calder (2011) enhanced the comprehension of the significance of values declarations by asserting that they constitute a crucial basic pillar for corporate operations.

Calder stated that organizational values significantly define work processes and hence affect an institution's beneficial progression in alignment with its vision (Gurley et al., 2014).

To sum up, organizational values define a route for how employees will behave in the process of realizing the vision. Therefore, vision and organizational values are closely related to each other.

METHOD

Mixed method was used in the research. In the qualitative part of the research, the vision and organizational value statements of the companies were obtained from their websites and subjected to content analysis. The categories determined for both variables were transformed into themes. In the quantitative part of the research, the significant relationship between the obtained themes was examined with the chi-square test.

Sampling

Turkish Cargo, MNG Airlines and Transportation, ULS Airlines Cargo Transportation, and ACT Airlines, which have only air cargo transportation licenses at Directorate General of Civil Aviation (DGCA) of Türkiye, were included in the sample

Data Analysis

Vision statements

Turkish Cargo: “As Turkey's global air cargo brand, Turkish Cargo, we continue to provide the best service to our reliable and business partners. We act with a sense of responsibility to make the world a more livable place and create our sustainable future vision”.

ULS: “Our vision is to be the leading airline in the air cargo transport sector both within our region and globally, with our quality and special flexible solutions”.

MNG: “To renew our fleet by ensuring sustainable growth based on knowledge and innovation, and to become a company that will direct air cargo transportation with high value-added, competitive, customer-specific flexible solutions in different markets by taking advantage of the advantages of e-commerce”.

ACT: “A professional airline doing business with an amateur spirit, we aim to be a leading air freighter company who shall be the customers' first choice with respect to the quality and range of its services, and to keep growing with sustainable profitability”.

Organizational values

Turkish Cargo: “Honesty and Fair Dealing, Customer Satisfaction, Respect to Individuals, Innovation, Teamwork, Leadership, Productivity, Confidentiality, Open Door” Policy”.

ULS: Not directly available. The statements are reported from other sections in the web site for ULS company

Table 1

Indirect Information about Organizational Values for ULS Company

Some statements about organizational values:	Produced from mission statement:
“The company has the authority and competence to operate without restrictions all over the world and has security and safety certificates”.	“Trained and experienced personnel, our customers' expectations, safety rules, improving the quality of air cargo transportation, improving our service day by day”.

MNG: “Flight Safety and Security, Reliability, Solution Orientation, Cost Orientation, Flexibility, Environmental Awareness, Teamwork and Compromise, Positive Corporate Climate, Data Security and Privacy, Hygiene and Employee Health, Animal Rights”.

ACT: Not directly available. The statements are reported from another sections in the web site for ULS company

Table 2

Indirect Information about Organizational Values for ACT Company

Quality and Safety policy:

“with partnership and active involvement of its managers and employees, health and safety of its employees, customers, the general public, its contractors, agents, subsidiary, and associated companies, meeting its obligations under all applicable regulations and standards: at global level, environmental scanning, change management.

“Safety risks to operations, safety awareness, safety culture and continually improve operational quality, safety and security performance”

“includes sufficient trained and educated manpower, Realize appropriate training and education programs for all managers and employees, Run inspection and audit programs that provides feedback and results in timely preventive, corrective and improvement actions -such inspection and audit programs shall cover externally supplied systems and services to support our operations, Encourage effective reporting and communication of internal quality, safety and security related issues, and operate hazard identification, reporting and risk management processes, Measure and monitor safety performance against realistic safety performance indicators and safety performance targets”

Code of Conducts & Ethics:

“ethical fashion that complies with all applicable laws and regulations, equal employment opportunities and prohibit discriminatory practices, satisfy our customers', suppliers' and our shareholders' expectations in a honest and fair manner. privacy of every employee in the conduct of his/her personal affairs, we ask our employees to ensure that their personal and financial interests do not conflict with, or appear to conflict with, their duties on behalf of ACT Airlines. Paying extreme care to confidentiality, open communication and run a structured reporting system to support organizational learning and continuous improvement of our processes”.

FINDINGS

Table 3

Categories of Vision Statements and Organizational Values

	Vision	Organizational values
Turkish Cargo	global, customer, business partner, quality, environment, responsibility, sustainable future	honesty and fair dealing customer satisfaction respect to individuals innovation teamwork leadership productivity confidentiality “open door” policy
ULS	leader, global, quality, special flexible solutions	globalization, competency, reliability, safety, institutional authority, customer-oriented, developing sectorial quality, kai-zen
MNG	information, innovation, sustainable growth, e-commerce, new market, competition, customer, specific flexible solution, leader	flight safety and security, reliability, solution orientation, cost orientation, flexibility, environmental awareness, teamwork and compromise, positive corporate climate, data security and privacy, hygiene and employee health, animal rights
ACT	professionalism, leader, customer, quality, services, sustainable profitability	quality, health and safety, security, active involvement, stakeholders, obeying regulations and standards, globalization, importance for environmental scanning, change management, kai-zen, manpower as a resource, feedback, timeliness, effective reporting and communication, equal employment opportunities, prohibit discriminatory practices, honesty, fairness, privacy, confidentiality, open communication, organizational learning

Table 4

Themes of Vision Statements and Organizational Values

	Vision	Organizational values
Turkish Cargo	global, customer, partner sustainability, quality	honesty, justice, customer-oriented, respect for people, innovation, teamwork, leadership, performance
ULS	leader, global, quality, special flexible solutions	globalization, competency, reliability, safety, customer-oriented, sectorial quality, continuous improvement
MNG	innovation, sustainability, new market, competition, customer, specific flexible solution, leader	health, safety and security, reliability, solution-orientation, cost, flexibility, environmental awareness, teamwork, positive corporate climate, privacy,
ACT	professionalism, leader, customer, quality, sustainability	quality, health and safety, security, active involvement, stakeholders, obeying regulations and standards, globalization, environmental awareness, change management, organizational resources, feedback, timeliness, honesty, fairness, privacy, open communication

By combining the vision and organizational value themes of cargo enterprises with an inductive approach and collecting the individual meanings of the terms in a holistically different term content, vision themes and organizational value themes for the sector in general have been obtained (Table 5)

Table 5

Themes of Vision Statements and Organizational Values for Sector (inductive)

	Vision	Organizational values
Turkish Cargo		Honesty, Justice, Customer-oriented, Respect for People, Innovation, Teamwork,
ULS		Leadership, Performance
MNG		
	Global, Customer, Partner	Globalization, Competency, Reliability,
	Sustainability, Quality, Leader,	Health, Safety, Security, Quality, Continuous
	Special flexible solutions,	Improvement, Solution Orientation, Cost,
	Innovation, Growth, Competition,	Flexibility, Environmental Awareness,
		Positive Corporate Climate, Privacy,
ACT	Professionalism,	Active Involvement, Stakeholders,
	(13)	Regulations and Standards,
		Change Management, Organizational
		Resources, Feedback, Timeliness, Open communication (30)

Table 6 shows how many of the vision themes and value themes determined for the sector are present in each company.

Table 6*Number of Common Themes Between Companies and the Sector in General*

Company	Vision	Organizational values
Turkish Cargo	5	8
ULS	4	7
MNG	7	11
ACT	5	16

According to chi-square test results, the four companies in the airline cargo sector do not differ statistically significantly in terms of the content of their vision statements. The four companies do not differ statistically significantly in terms of the content of their organizational value statements (Table 7)

Table 7*Chi-square test results for themes of vision and organizational values*

Chi-square test	Vision differentiations	Organizational values differentiations
Chi-square	2.571	5.652
df	2	3
P:	0,276	0,130

DISCUSSION

According to the analysis results, the vision and organizational value expressions of the companies are similar to each other. According to the research findings, 6 of the vision themes were expressed verbatim as organizational values. Sustainability, as a vision theme, is expressed with two separate values in the definition of organizational value: "environmental awareness" and "organizational resources". "Partner", one of the vision themes, is shown as a more comprehensive term, "stakeholder" in organizational values. Considering common terms, it can be said that vision themes are largely expressed in organizational values.

Some of the research conducted in the national literature on quality standards, mission and vision statements applied in airline companies in Turkey; Önen (2017) content analysis of vision and mission statements of airline companies, Şengür and Kuyucak (2017) airline business models, Annaç (2018) AS9100 quality standard in the aviation industry, Göksel and İyidemirci (2018) total quality management and strategic management school in the Turkish civil aviation sector. approaches, Güreş et al. (2013) has studies on the evaluation of the websites of Turkish airline companies, and Bezirgan (2020) on the analysis of vision and mission statements on websites (Çubukçu, 2023)

No study has been found in the Turkish literature that directly examines the relationship between organizational values and vision in air cargo companies. In a study found in the international literature, Kimyagaran and Karimi (2024) reported that the organizational culture, whose most important component is values, significantly influences the design of a strategic vision for low-cost airlines. In his research, Çubukçu (2023) subjected the vision statements of Turkish Airlines, Pegasus, MNG Airlines, Sun Express, Tailwind Airlines to content analysis. The general vision codes are innovative, economical, low cost, added value, sustainability, leader, growth, zero accident, quality service, loyal customer, educated personnel, aggressive, rational, principled, responsible, guest, information, competitive, flexible solution, customer. reported as private, preferred and governance. The most emphasized vision terms are innovation, economic-low cost, added value, sustainability, and

leadership. Among the reported themes, innovation, sustainability and leadership are the same as the vision themes put forward for airline cargo businesses in this study. Çubukçu (2023) subjected organizational values for THY, Pegasus and MNG to content analysis and determined the value codes as efficiency, innovation, teamwork, confidentiality, security, honesty, fair, customer satisfaction, respect for the individual, leadership, open door, people-oriented, goal-oriented, reported as competitiveness, solution-oriented, cost-oriented, flexibility, environmentally friendly, communication and compromise. Among these value expressions, the ones with the highest frequency are efficiency, innovation, teamwork, confidentiality and security. Four of the stated value expressions were also put forward in this study. Efficiency is closely represented by the term performance.

RESULT

There are universal terms in the vision and organizational value themes of airline cargo companies. Similar to the findings of Çubukçu (2023), it has a universal isomorphism structure in terms of content. The four companies examined do not differ in terms of vision and organizational value themes representing the sector. Considering the results of previous field research, it can be stated that airline cargo businesses are different from passenger businesses in terms of vision themes, but their organizational values are similar.

Vision statements are generally short, but it can be stated that they are lacking in terms of some necessary features (idealist, originality, distinctiveness, attractiveness, communication, future defining, inspiring features) (Önen, 2017).

MANAGERIAL IMPLICATIONS AND FURTHER STUDY

Vision statements can be created by the top management of the business by reconsidering them in terms of the necessary features. Thus, its guidance on values can be more accurate. Vision and organizational value statements are a strategic force. The organizational culture that will provide the basis for the sharing of vision statements by employees for air cargo companies to achieve their goals should be developed correctly. Organization executives must meticulously oversee the dynamic formulation of organizational values to actualize the vision with the awareness of effect on organizational environment. The vision and value content that prevails in the sector is homogeneous. For this reason, it is important for business managers to monitor the sectoral environment very closely and make the necessary changes in vision and values in a timely manner.

Conducting vision and organizational value analysis for only 4 cargo companies is a limitation of the research. In transforming vision and organizational value categories into themes, the researcher's management knowledge, experience and subjective interpretation may be involved.

We may expand our work with airline passenger companies operating in Türkiye. Conducting a comparative study by including foreign airline companies that organize flight schedules to Turkey from outside the companies registered with DGCA is a subject of further research. Another research topic is to what extent a detailed examination of the form in which vision statements should be would change the study results.

Ethical Committee Approval

There is no need to obtain ethical permission for the current study as per the legislation. The "Declaration Form Regarding No Ethics Permission Required" was sent to the journal by the author on this subject..

Author Contributions

Research Design (CRediT 1) Author 1 (100%)

Data Collection (CRediT 2) Author 1 (100%)

Research - Data Analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Author 1 (100%)

Writing of the Article (CRediT 12-13) Author 1 (100%)

Text Revision and Improvement (CRediT 14) Author 1 (100%)

Funding

There is no financial support for the study.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Sustainable Development Goals (SDG)

Sustainable Development Goals: Does not support

REFERENCES

- Akdemir, S. & Yılmaz, A. (2005). *Örgütlerde Vizyon ve Yönetimi*. Ankara: Detay Yayıncılık.
- Akoğlu, B. & Fidan, Y. (2020). Dünyada Hava Kargo Taşımacılığı Pazarı ve Türkiye'nin Yeri, *Ekonomi, İşletme ve Yönetim Dergisi*, 4(1), 30-51
- Allaz, C. (1998). *The History of Air Cargo and Air Mail from the 18th Century*. London: Christopher Foyle Publishing.
- Annaç Göv, S. (2018). Havacılık Sektöründe Kalite Sistemi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(2), 391-406.
- Balık, F. M. (2015). *Havakargo taşımacılığı ve Türkiye'deki gelişimini etkileyen faktörler*, [Yüksek lisans tezi] Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Barca, M & Balcı, A. (2006). Kamu Politikalarına Nasıl Stratejik Yaklaşılabılır? *Amme İdaresi Dergisi*. 39 (2), 29-51.
- Bezirgan, M. (2020). *Analysis of the Vision and Mission Statements in the Websites: A Research on Five-Star Hotels in Istanbul, Ankara, and Izmir, Digital Marketing Strategies for Tourism, Hospitality, and Airline Industries*, IGI Global Publisher: Hershey - Pennsylvania (US), ss.179-196.
- Bourne, H. & Jenkins, M. (2013). Organizational values: A dynamic perspective. *Organization Studies*, 34(4), 495-514.
- Burnside, R. M. (1994). Visioning: Building Pictures of the Future. In Jane Henry ve David Walker (Eds) *Managing Innovation*, London: Sage
- Calder, W. B. (2011). Institutional VVM statements on web sites. *Community College Enterprise*, 17(2), 19-27.
- Collins, C.J. & Porras, J.I. (1999). *Şirketinizin Vizyonunu Oluşturmak. Değişim*, Harward Business Review (Çeviren: Meral Tüzel). İstanbul: Mess Yayınları
- Çetin, S. (2009). Vizyon Yönetimi, *Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22, 95-103
- Çubukçu, M. (2023). Havayolları İşletmelerinde Misyon, Vizyon Beyanları ve Değer İfadelerinin İçerik Analizi, *Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi*, 5.6(3), ss.910-925, Doi: <https://doi.org/10.33712/mana.1244331>
- DuFour, R., DuFour, R., & Eaker, R. (2008). *Revisiting professional learning communities at work: New insights for improving schools*. Bloomington, IN: Solution Tree.
- Eren, E. (2002). *Stratejik Yönetim ve İşletme Politikası (Altıncı Basım)*. İstanbul: Beta Yayınları
- Göksel, A. & İyidemirci, H. (2018). Avrupa Birliği'ne üyelik sürecinde Türk Sivil Havacılık Sektöründe Toplam Kalite Yönetimi ve Stratejik Yönetim Okulu yaklaşımları bağlamında kurumsallaşma, *Gazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(14), 513-536.
- Gurley, K., Peters, G. B., Collins, L., & Fifolt, M. (2014). Mission, vision, values, and goals: An exploration of key organizational statements and daily practice in schools, *Journal of Educational Change*, 16(2), 217-242.
- Güreş, N., Arslan, S., & Yalçın, R. (2013). Türk Havayolu İşletmelerinin Web Sitelerinin Değerlendirilmesine Yönelik Bir Araştırma. *Niğde Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 173-185.

- Haque, M., TitiAmayah, A. & Liu, L. (2016). The role of vision in organizational readiness for change and growth, *Leadership & Organization Development Journal*, Vol. 37 No. 7, pp. 983-999. <https://doi.org/10.1108/LODJ-01-2015-0003>
- Hensher, D.A. (2001). *Handbook of Logistics and Supply Chain Management*, Oxford: Pergamon Publishing
- Hertwig, P.H. & Rau, P. (2010) *Risk Management in the Air Cargo Industry, Revenue Management Capacity Options and Financial Intermediation*, Hamburg: Dip-lomica Verlag.
- Karakuş, G. (2023). Türk Hava Yolları sürdürülebilirlik raporları üzerine bir araştırma. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(2), 86-113. <http://dx.doi.org/10.56753/ASREL.2023.2.4>
- Kılıç, M. (2010). Stratejik Yönetim Sürecinde Değerler, Vizyon ve Misyon Kavramları arasındaki ilişki, *Sosyoekonomi*, 2, 81-97
- Kimyagaran, A. & Karimi, I. (2024). Strategic Vision Design in Low-Cost Airlines Amid Technological Challenges and Organizational Dynamics. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4936340> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4936340>
- Kose, B. W., (2011). Developing a transformative school vision: Lessons from peer-nominated principals. *Education and Urban Society*, 43(2), 119-136.
- Mirze, K. & Ülgen, H. (2004). *İşletmelerde Stratejik Yönetim*. İstanbul: Literatür Yayınları.
- Narinoğlu, A. (2006). *Yerel Yönetimlerde Stratejik Planlama ve Uygulama*. İstanbul: Mart Matbaacılık.
- O'Connor A.W. (2000). *Introduction to Airline Economics*, Santa Barbara: Praeger Publishers.
- Oschman, J. J. (2019), “A Conceptual Framework Implementing an AS9100 Quality Management Sysytem for the Aerospace Industry”, *South African Journal of Industrial Engineering*, S.30(2), ss.1-16.
- Önen, V. (2017), “Vizyon ve Misyon İfadelerinin İçerik Analizi: Türk ve Avrupa Havayolu İşletmeleri”, *Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(6), ss.1-15
- Öztürk, A. (1993). Türkiye'de Hava Kargo Trafığı, *Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Bülteni*. 4(15), Eskişehir
- Padaki, V. (2000). Coming to grips with organisational values, *Development in Practice, Taylor & Francis Journals*, 10(3-4), pages 420-435, August.
- Pekarsky, D. (2007). Vision and education: Arguments, counterarguments, rejoinders. *American Journal of Education*, 113(3), 423-450.
- Savaş, Y. & Arıcıoğlu M. A. (2024). Strategic Human Resources Management in Türkiye: Strategic Human Resources Management in the Context of Thesis Studies, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Dergisi*, 6(1), 202-211.
- Senge, P. (2002). *Beşinci Disiplin (Çev. Ayşegül İlideniz-Ahmet Doğukan)*. İstanbul: Yapı Kredi Yayınları
- SHGM mevzuat:
- <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=19025&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- <https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2018/SHT-17.6.pdf>
- Sercan, M., Özelge K., Ordukıran, B. & Altıntaş, E. (2023) Havacılık Çalışanlarının Örgütsel Destek

Algılarının Demografik Özelliklerine Göre İncelenmesi. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(1), 48-55.

Şimşek, M. Ş. (1998). *Yönetim ve Organizasyon*. Ankara: Nobel Yayınları.

Yalçın, A. (2002). *Değişim Yönetimi*. İstanbul: Nobel Yayınları

Zhang, A. ve Zhang, Y. (2002). Issues on Liberalization of Air Cargo Services in International Aviation, *Journal of Air TransportManagement*, 8(5), 275-287.

Uydu Verileri ile Bulut Tespiti için Makine Öğrenmesi Yaklaşımı

Sabri KOÇER^{ID} Yasin ER^{*ID}

Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 19.11.2024
Kabul Tarihi: 06.12.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Uydu verisi,
Konvolüsyonel sinir ağları,
Çok katmanlı algılayıcılar,
Bulut maskesi,
Bulut tespiti,
Görünür ve kızılötesi bantlar.

Bu makalede multispektral uzaktan algılama verileri kullanılarak bulut sınıflandırma ve bulut maskesi oluşturma yöntemleri değerlendirilmektedir. Özellikle Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP) ve Konvolüsyonel Sinir Ağları tabanlı bir model olan CS-CNN üzerinde durulmuştur. MLP, piksel düzeyinde sınıflandırmalar için ileri beslemeli yapısıyla etkili bir yöntem olarak öne çıkarken; CS-CNN, mekânsal bağlamı entegre ederek özellik çıkarma ihtiyacını ortadan kaldıran bir segmentasyon yeteneği sunmaktadır. Çalışmada, bulut tespiti için farklı spektral bantların katkıları da incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, CS-CNN'nin geleneksel eşik tabanlı yöntemlere kıyasla daha yüksek doğruluk ve esneklik sağladığını göstermektedir. Ayrıca, makine öğrenimi tabanlı yaklaşımların, EUMETSAT bulut maskesi gibi geleneksel algoritmalarla karşılaştırıldığında üstün performans sergilediği vurgulanmıştır.

Machine Learning Approach for Cloud Detection with Satellite Data

Article Info

ABSTRACT

Received: 19.11.2024
Accepted: 06.12.2024
Published: 31.12.2024

Keywords:

Satellite data,
Convolutional neural network,
Multilayer perceptron,
Cloud mask,
Cloud detection,
Visible and infrared bands.

This paper evaluates cloud classification and cloud masking methods using multispectral remote sensing data. In particular, Multilayer Perceptrons (MLP) and CS-CNN, a Convolutional Neural Network based model, are emphasized. While MLP is an effective feed-forward method for pixel-level classifications, CS-CNN offers a segmentation capability that eliminates the need for feature extraction by integrating spatial context. In the study, the contributions of different spectral bands for cloud detection were also investigated. The results show that CS-CNN provides higher accuracy and flexibility compared to traditional threshold-based methods. It is also emphasized that machine learning-based approaches exhibit superior performance compared to traditional algorithms such as the EUMETSAT cloud mask.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Koçer, S., & Er, Y. (2024). Uydu verileri ile bulut tespiti için makine öğrenmesi yaklaşımı. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 142-157. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.5>

***Sorumlu Yazar:** Yasin ER, yasineryasiner@gmail.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Uzaktan algılamanın en çok kullanılan yöntemi elektromanyetik dalgalardır, ancak ses de dahil olmak üzere diğer taşıyıcı ortamlar da kullanılabilir. Elektromanyetik spektrumun “görünür”, “yakın kızılötesi” ve “kızılötesi” bölgeleri METEOSAT ikinci nesil (MSG) uyduları tarafından ölçülmektedir. Elektromanyetik dalgalar ya yansıyan güneş ışığı ya da yüzeyden ve/veya atmosferik partiküllerden yayılan karasal radyasyondan kaynaklanır. Kızılötesi “Atmosferin Tepesi” (TOA) radyansları uydu sensörleri tarafından ölçülür. Parlaklık Sıcaklığı (BT) bu radyansları ifade etmenin bir yoludur. Yerden yansıyan yüzey radyasyonu bazen bulutlarda dolayı uyduya ulaşamaz ve tamamen emilir. Bu durumda ölçülen radyasyonun kaynağı yer yüzeyi değil bulutun tepe noktasıdır. IR 10.8 µm kanalı ve VIS 0.6 µm kanalı kullanılarak otomatik bulut maskeleye için bir algoritma geliştirilmesini amaçlanmaktadır. Algoritma, dinamik eşik değerleri kullanarak açık gökyüzü parlaklığının belirlenmesini ve bulutlu piksellerin tanımlanmasını içermektedir (Huckle, 2009).

MSG Sistemi bir Uzay Segmenti ve bir Yer Segmentinden oluşmaktadır. MSG-1, MSG -2 ve MSG -3 olarak adlandırılan üç uydu serisine dayalı olarak en az 12 yıllık sistem ömrü boyunca veri, ürün ve hizmet sağlamak üzere tasarlanmıştır.

MSG Uzay Segmenti ESA tarafından yürütülmektedir. ESA aynı zamanda MSG-1 olarak adlandırılan ilk uydunun geliştirilmesi ve tedarik edilmesi sorumluluğunu üstlenmiştir. MSG-2 ve MSG-3 uydularının tedarikini EUMETSAT adına yürütmüştür.

MSG Yer Segmenti EUMETSAT tarafından geliştirilmiştir. EUMETSAT'ın Genel Merkezinde bulunan merkezi tesislerden ve uzak yer istasyonlarından oluşan bir kontrol, edinim, ön işleme ve dağıtım yer segmentinden oluşmaktadır (Aminou, n.d.).

Çok sayıda uzman, halihazırda erişilebilir olan teknolojiyi kullanarak çeşitli otomatik segmentasyon yöntemleri incelemiştir. Daha önceki sistemlerde matematiksel modelleme ve tespit filtreleri gibi geleneksel teknolojiler kullanılmaktayken, özelliklerin çıkarılmasına yönelik makine öğrenimi teknikleri birincil yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Böyle bir sistemin oluşturulmasında ana odak noktası her zaman bu bileşenlerin geliştirilmesi ve çıkarılması olmuştur. Çünkü bu sistemlerin karmaşıklığı benimsenmelerinin önünde büyük bir engel olarak görülmüştür (Koçer et al., 2022).

Bulutlar Dünya'daki yaşamın birçok yönünü etkilediğinden ve iklimimiz için çok önemli olduğundan, bir dizi uygulama alanı için son derece hayati öneme sahiptir (Dröner et al., 2018a). Birçok bulut maskesi algoritması için eşik tabanlı kontroller kullanılmıştır. Görünür (VIS), yakın kızılötesi (NIR), kısa dalga kızılötesi (SWIR) ve termal kızılötesi (TIR) dalga boyu aralıklarındaki birçok uydu kanalı, bu algoritmalar tarafından bulutları ve kar/buz örtüsünü tespit etmek için kullanılır. Örneğin MOD35, 10 yansıma bandı ve 9 termal kızılötesi banttan oluşan 19 bant kullanır. Bu algoritmalar genellikle eşik testlerinin birleştirilmesi esasına dayanır. Bu değerlendirmelerde genellikle uzman deneyimlerinden, bulutlu veya açık gökyüzü istatistiklerinden ve model simülasyonlarından elde edilen eşikler kullanılır (Chen et al., 2018a). Farklı ışınım salımları, bulutun dikey profilinin sudan karışık (su ve buz) faza ve buza dönüşmesinden ve bulut parçacık boyutu dağılımının yükseklikle değişmesinden kaynaklanır. Bulutların güneş radyasyonunu yansıtma ve Dünya'dan gelen ısıyı hapsedme yeteneği, Dünya'nın iklimini düzenlemede kritik öneme sahiptir.

OCA (Optimal Cloud Analysis): Meteosat İkinci Nesil (MSG) uydularında bulunan Dönen Geliştirilmiş Görünür ve Kızılötesi Görüntüleyici (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, SEVIRI) cihazından bulut özelliklerini tahmin etmek için kullanılan bir algoritmadır. OCA, tüm ölçümleri ve önemli bulut parametrelerini eş zamanlı olarak ele alan ve bir çözüm elde etmek için optimal tahmin tekniğini kullanan bir yaklaşımdır (Meyer, n.d.).

OCA (Optimal Cloud Analysis) ürünü Haziran 2013'ten beri saatlik frekansta çalışmaktadır. Bu ürün, EUMETCast (EUMETSAT tarafından işletilen çeşitli (çoğunlukla uydu tabanlı) meteorolojik verilerin dağıtım programı) istasyonları ve EUMETSAT (Avrupa Meteoroloji Uydularından İşletme Teşkilatı) veri merkezi aracılığıyla Avrupa ve Afrika üzerinde gerçek zamanlı olarak veri sağlamaktadır. OCA yönteminde, sıcak kanallardan (görünür 0.6 ve 0.8 mm ve yakın kızılötesi 1.6 mm) gelen yansımalar, termal kanallardan (kızılötesi kanallar) gelen yansımalar ve Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF) tarafından üretilen meteorolojik sayısal modellerden gelen tahmin verileri kullanılır. Ayrıca bulut tepe basıncı (CTP) ve bulut maskesi (CLM) gibi bazı MSG (Meteosat Second Generation) uydu ürünleri de bu algoritmalarda kullanılmaktadır (Hadizadeh et al., 2019).

Key ve Intrieri (2000) tarafından, Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) uydularının Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometresinde (AVHRR) 8.7 μm 'nin bulunmaması durumunda, 10.8 μm ve 12.0 μm 'ye ek olarak 3.7 μm 'nin uygulanmasıyla bulut fazının belirlenmesi kaydedilmiştir. Ancak, 3.7 μm görüş/aydınlatma geometrisi, yüzey yansıması, bulut ve yüzey sıcaklıkları gibi pek çok faktörden etkilendiği için onların yöntemi yeterli olmamıştır (Key & Intrieri, 2000). Operasyonel hava hizmetlerinde kullanılan konvektif hücre tespit algoritmaları genellikle tek kızılötesi kanal verilerine dayanmaktadır. Bu yöntemlerin dezavantajları nedeniyle, konvektif bulutların otomatik olarak tanınması amacıyla Meteosat SEVIRI kanallarının 0.6 μm ve 1.6 μm farkı ile ürün tanımlamak için bir girişimde bulunulmuştur (Mahović & Zeiner, 2009).

YÖNTEM

Bulut maskesi, bulutlu ya da bulutsuz olarak kategorize edilen açıkça işaretlenmiş bölümlere sahip bir haritadır. Başka bir deyişle, uydu görüntülerinde hangi piksellerin bulutları temsil ettiğini belirleyen bir veri katmanıdır (Bechini & Cremonini, 2007).

Bu çalışma, Evrişimli Sinir Ağları (CNN) kullanarak hızlı bulut segmentasyonu için MSG/SEVIRI verilerini kullanan bir çalışma sunmaktadır. SEVIRI'nin 15 dakikalık zamansal çözünürlüğü ve 2004'ten beri veri bulunması nedeniyle CNN'lerin eğitimi ve değerlendirmesi için bol miktarda veri bulunmaktadır (Dröner et al., 2018b).

CS-CNN modeli, giriş parametresi olarak; üç farklı senaryoyu göz önünde bulundurarak farklı kanalların etkisini değerlendirmek için üç farklı giriş kanalı konfigürasyonu ile eğitilir. Bu senaryolar; 11 kanalın tümünün dahil edilmesi, sadece 8 adet termal kanalın dahil edilmesi ve güneş ışınımından etkilenmeyen 7 termal kanalın dahil edilmesi ile konfigüre edilerek modelin eğitilmesi üzerine oluşturulmuştur.

CS-CNN modelinin çıktısı, her pikselin belirli bir bulut sınıfına atandığı bir segmentasyondur. Model, her piksel için dört olası sınıfı temsil eden beş boyutlu bir olasılık vektörü üretir:

Bulutsuz: Piksel bulut veya kar/buz içermemektedir.

Bulutla Kirlenmiş: Piksel kısmen bulutlu (karışık) veya yarı saydam bulutludur.

Bulutla Dolu: Piksel tamamen opak bulutlarla doludur.

Kar/Buzla Kirlenmiş: Piksel kar veya buz içermektedir.

CNN'lerde parametreler seçilirken, sağlanan verilerin boyutu ve türü göz önünde bulundurulmalıdır. Kurulan algoritmanın performansı ara testlerde daha düşük filtre seçimi ile düşer, ancak daha büyük filtre seçimi ile önemli ölçüde iyileşmez. Aşırı uyum (Overfitting) olasılığını azaltmak amacıyla bırakma (Dropout) için optimum değer kullanılmalıdır (Kacar et al., 2023).

CNN kullanılan sınıflandırmada temel veri kümesi küçüldükçe, veri artırımının katkısı giderek

daha belirgin hale gelir. Ancak, veri kümesi çok küçükse veri artırımı sınıflandırma performansını artırmaz. Ayrıca, sınıflandırma nispeten az veri kullanılarak artırıldıktan sonra yapıldığında sınıflandırma performansı kötüleşir (Oztimur Karadag & Erdas Cicek, n.d.).

Orijinal veri kümeleriyle veya daha fazla veriyle, derin öğrenme modeli daha iyi performans gösterir; ancak, özellikle veri ön işleme prosedürlerinin bir sonucu olarak performansı düşer (Hacıbeyoglu et al., 2024).

Çok katmanlı algılayıcı (MLP) sinir ağları kullanarak MSG/SEVIRI gündüz bulut maskeleye için bir model sunmaktadır. Model, bulut ve açık gökyüzünü sınıflandırmak için önceden tanımlanmış değeri haritalamak üzere eğitildiğinde %88.96'lık bir tespit doğruluğu elde etmiştir (Taravat et al., 2015).

Radyatif transfer simülasyonlarına dayalı ayrıca bir sinir ağı bulut maskeleye algoritması sunulmaktadır. Bu algoritma, CALIOP bulut maskesi ile doğrulanmış ve özellikle ince bulutların tanımlanmasında iyileştirmeler göstermiştir (Chen et al., 2018b).

EUMETSAT tarafından işletilen dört MSG uydusunun (Meteosat-8, 9, 10 ve 11) ilk üçünden gelen veriler, Ocak 2004 - Aralık 2015 dönemini kapsayan CLAAS-2 (CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI - Edition 2) veri kaydında yer almaktadır. MSG uyduları benzer konumlarda bulunduğundan dolayı SEVIRI görüntüleme geometrileri uydular arasında biraz farklılık göstermekte ve bu durum CLAAS-2 veri kaydının oluşturulmasında dikkate alınmaktadır.

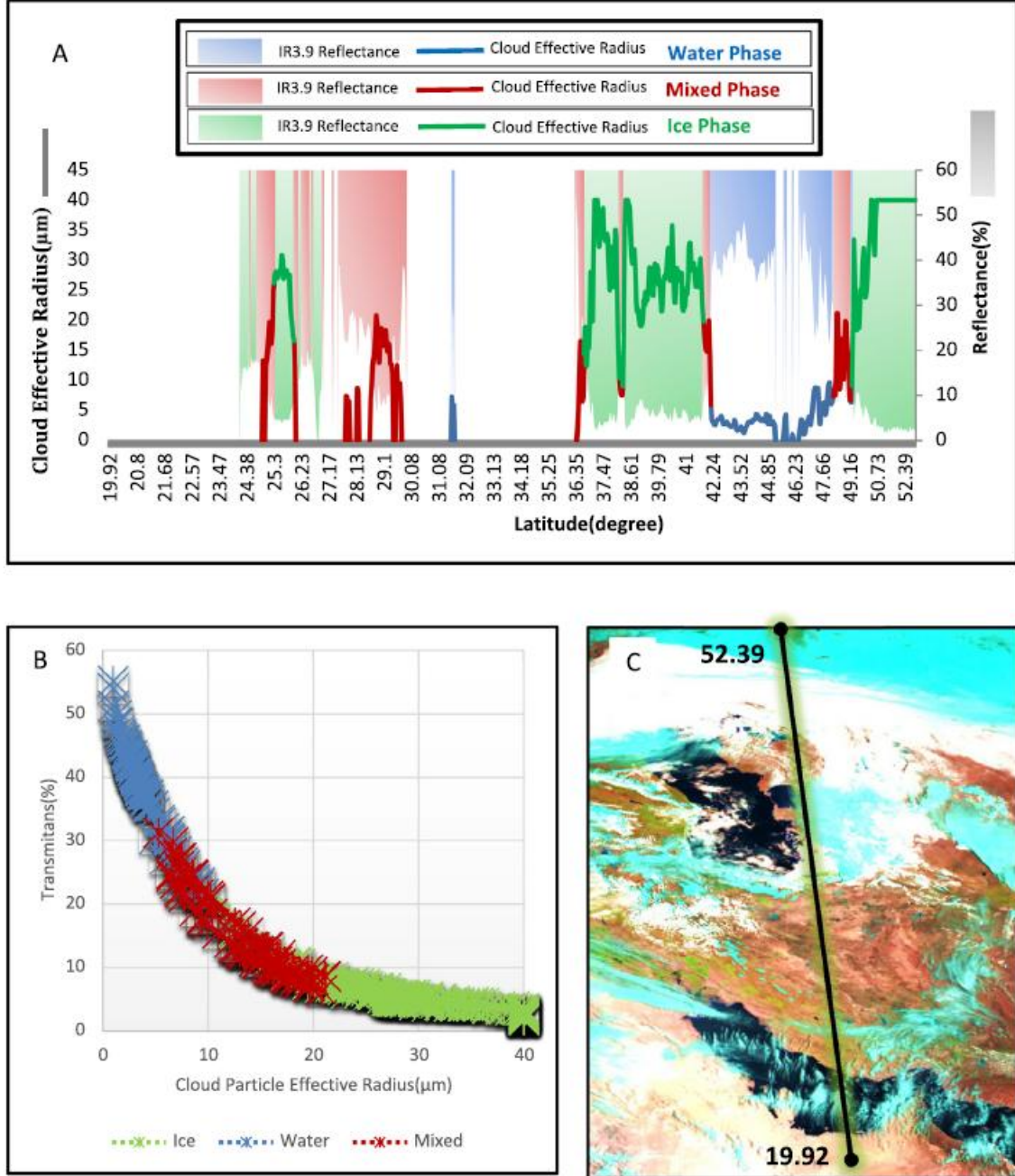
NoWCasting ve çok kısa vadeli tahminleri desteklemek için Uydu Uygulama Aracı (SAFNWC) geliştirilmiştir. Bu araçta, MSG/SEVIRI görüntülerinde Nowcasting ile uyumlu 12 üründen oluşan bir koleksiyon kullanılmıştır. Bu SAFNWC/MSG yazılım paketinde kullanılan bulut maskesi (CMA) ve bulut tipi (CT) algoritmaları kullanılmaktadır. Test dizisi coğrafi konum ve aydınlatma koşullarına dayanırken, eşiklerin çoğu radyatif transfer modelleri kullanılarak yardımcı verilerden (klimatoloji haritaları, atlaslar ve sayısal hava tahmin (NWP) modeli tahmin alanları) dinamik olarak hesaplanır (Derrien & Le Gléau, 2005).

Orta kızılötesi kanaldaki parlaklık ve sıcaklık artışı nedeniyle, parçalanmış bulutlu pikseller sıklıkla sahte yangın pikselleriyle ilişkilendirilir. Bununla birlikte, bir yangın pikseli, özellikle bulut sınırlarında, uygun olmayan bulut maskeleye nedeniyle tespit edilemeyebilir. EUMETSAT, SEVIRI görüntülerine ek olarak bir bulut maskesi (CLM) ürünü sunmaktadır. MSG-SEVIRI spektral kanalları kanal 8 (IR 9.7) ve kanal 12 (HRV) hariç olmak üzere bu maskenin hesaplanmasında kullanılmıştır. SEVIRI görüntülerinin CRPSM tarafından özel olarak kullanılması, yangınları erken bir aşamada (0,1 hektardan daha küçük boyutlarda) tespit etmek için yüksek bir hassasiyet gerektirmektedir. Bunun için kanal 4'te (3,9 µm) tespit edilen parlaklıktaki değişiklikler takip edilmektedir. (Saunders & Kriebel, 1988).

Gelişmiş Çok Yüksek Çözünürlüklü Radyometre (AVHRR) uyduları için bulut-parçacık etkin yarıçapı ile IR3.7 kanalının yansıtıcılığı arasındaki ilişkinin bir yaklaşımı (Kaufman & Nakajima, 1993) tarafından önerilmiştir.

Şekil 1

Karşılaştırma, 22 Mart 2017 tarihinde saat 06:45'te Orta Doğu'da 3,9 mm dalga boyu yansımaları kullanılarak elde edilen bulut parçacığı etkin yarıçapının kesitini göstermektedir. (A ve B) Su fazı bulutları mavi nokta, çizgi ve bölge ile gösterilmiştir. Karışık (buz) faz bulutu kırmızı (yeşil) nokta, çizgi ve bölge ile gösterilmiştir. (C) MSG1 (IODC) uydusunun doğal RGB kompozit görüntüsü.



MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): Terra ve Aqua uydularında bulunan ve Dünya'nın atmosferini, kara yüzeyini ve okyanuslarını gözlemlemek için kullanılan bir görüntüleme spektrometresidir. MODIS, bulut özelliklerini (optik kalınlık, efektif parçacık yarıçapı ve termodinamik faz dahil) belirlemek için algoritmalar kullanır (Benas et al., 2017).

Bu çalışmada, MODIS Terra sensöründen 2009 ve 2010 yıllarında toplanan veriler kullanılmıştır. Eşleşen MOD03 coğrafi konum ve MOD35 bulut maskesi verileriyle birlikte dünyanın dört bir yanından 30'dan fazla MOD021KM yansıma veri noktası seçilmiştir. Bulut gölgesi konumlarını hesaplamak için,

bulut maskesi tarafından sağlanan bulutların konumları ve azimut ile güneş ve görüş açıları dahil olmak üzere coğrafi konum verileri kullanılır. Ardından, eğitim örnekleri toplamak üzere, belirli kanallarda spektral eşik tabanlı otomatik bir eğitim örneği veri çıkarma prosedürü gerçekleştirilir. Son olarak, bulut gölgelerinin tam konumlarını tespit etmek için bir Destek Vektör Makinesi (SVM) sınıflandırma prosedürü kullanılır (Zhang et al., 2013).

UYGULAMA ALANLARI

Bulutlar iklim tahminlerinde önemli bir rol oynamaktadır. İklim tahminleri, tahmin edilen parçalanmış bulut örtüsü veya bulutlarla kaplı alanı etrafındaki önemli belirsizlik nedeniyle zordur. Gelecekteki iklim tahminlerini geliştirmek amacıyla, Avrupa Bulut Örtüsü veri seti, bulut örtüsü ile diğer çevresel değişkenler arasındaki istatistiksel ilişkileri belirlemede kullanılabilir (Svennevik et al., 2024).

Bulutlar ve radyasyon etkileşim içinde olduğundan, parçalı bulut örtüsündeki (CFC) veya gökyüzünün bulutlarla kaplı yüzdesindeki değişikliklerin küresel ısınma üzerinde bir etkisi olacağı tahmin edilmektedir. Bu durum, güneş enerjisi üretimi ve tarım da dahil olmak üzere toplum ve çevre üzerinde etkili olacaktır (Svennevik et al., 2024).

İklimi etkileyen atmosfer, okyanuslar, kara yüzeyi ve buz fiziği ile ilgili diferansiyel denklemler, sayısal iklim modelleri (NCM) kullanılarak çözülür. NCM'ler iklim tahmini için çok önemli araçlardır. Sıcaklık ve basınç gibi bazı değişkenler doğru bir şekilde tahmin edilebilir, ancak parçalı bulut örtüsü gibi diğer değişkenler çok daha büyük belirsizliklerle bağlantılıdır (Zelinka et al., 2020).

Toplum, insan kaynaklı iklim değişikliğinin yakınlığı konusunda bilinçlendirilmiştir. İklim değişikliğinin dünyanın çeşitli bölgeleri üzerindeki etkisi bölgesel iklim modelleri kullanılarak değerlendirilebilir. Bu modellerin ölçümlerle doğrulanması çok önemlidir. Bu durumda, yüksek zamansal çözünürlüğe sahip küresel veriler sağladıkları için uydu verileri oldukça yardımcı olmaktadır (Huckle, 2009).

Bitki örtüsünün yoğunluğunu ve sağlığını ölçmek için kullanılan NDVI (Normalize Edilmiş Fark Vejetasyon İndeksi) hesaplamalarında, bulutlu pikseller hatalı sonuçlara yol açabilir. Bulut maskeleri kullanarak bu pikseller maskelenir ve NDVI hesaplaması sadece bulutsuz pikseller üzerinden yapılır, bu da daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar (Meyer, n.d.; Rasmussen et al., 2011).

Okyanus rengi, suyun içindeki klorofil ve diğer maddelerin konsantrasyonu hakkında bilgi sağlar. Bulutlar, okyanus yüzeyinden yansıyan ışığı etkileyerek renk ölçümlerinde hatalara neden olabilir. Bulut maskeleri, bulutlu pikselleri tanımlayarak bu piksellerin analizlerden çıkarılmasını ve okyanus rengi ölçümlerinin doğruluğunun artmasını sağlar (Ackerman et al., 2006; Choi et al., n.d.).

Kara yüzeyi sıcaklığı, iklim değişikliği, su kaynakları yönetimi ve tarım gibi birçok alanda önemli bir parametredir. Bulutlar, termal kızılötesi sensörler tarafından ölçülen kara yüzeyi sıcaklığını etkileyerek daha düşük sıcaklık değerlerine yol açabilir. Bulut maskeleri, bulutlu pikselleri tanımlayarak bu piksellerin analizlerden çıkarılmasını ve kara yüzeyi sıcaklığı ölçümlerinin doğruluğunun artırılmasını sağlar (Rasmussen et al., 2011).

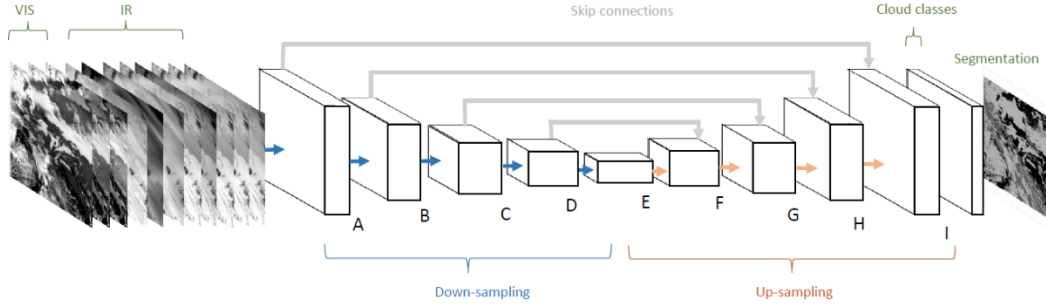
BULUT SEGMENTASYONU EVRİŞİMSEL SİNİR AĞI (CS-CNN)

CS-CNN, multispektral uzaktan algılama verilerinden yüksek çözünürlüklü mekânsal sınıflandırmalar elde etmek için etkili bir yöntemdir. Bu model, mekânsal bilgileri dahil etmek için yalnızca ham veriler üzerinde çalışır ve önceden tanımlanmış özelliklerin oluşturulmasına ihtiyaç duymaz. CS-CNN'nin temel amacı, multispektral uzaktan algılama verilerini kullanarak bulut maskeleri oluşturmaktır. Mimari, multispektral uydu görüntülerini girdi olarak alır ve her pikseli uygun bir bulut

sınıfına atayan bir segmentasyon sonucu üretir. CS-CNN, bu tür görevler için önceden tasarlanmış bir yapıya veya önceden eğitilmiş bir modele bağımlı değildir (Dröner et al., 2018b).

Şekil 2

CS-CNN Mimarisi



Ağ için kullanılan giriş, Şekil 2'nin sol tarafında sunulmuştur. Çalışma alanının boyutu, 508x508 piksel uzamsal çözünürlükle uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir. Her sahnede seçilen kanalların sayısı, girişin derinlik boyutunu oluşturur. Giriş katmanını, birden fazla konvolüsyon katmanından oluşan öğrenme blokları takip eder. Tablo 1'de her bloğa verilen etiketler (A-I), konvolüsyon katmanları ve bu blokların bağlantı yapıları hakkında bilgi sağlar. Şekil 2'nin sağ tarafında ise her piksel için her sınıfa ait olasılıkların yer aldığı hesaplanmış bulut sınıfları gösterilmektedir.

Tablo 1

Bulut Segmentasyonu Mimarisi

Blok	Katman Tipi	Çıkış Boyutu	Atlama Bağlantısı
Giriş	Giriş	$\{7,8,11\} \times 508 \times 508$	
A	3×3 conv, relu	$32 \times 506 \times 506$	
A	3×3 conv, relu	$32 \times 504 \times 504$	I
A	3×3 conv, stride2	$32 \times 252 \times 252$	
B	3×3 conv, relu	$64 \times 250 \times 250$	
B	3×3 conv, relu	$64 \times 248 \times 248$	H
B	3×3 conv, stride2	$64 \times 124 \times 124$	
C	3×3 conv, relu	$128 \times 122 \times 122$	
C	3×3 conv, relu	$128 \times 120 \times 120$	G
C	3×3 conv, stride2	$128 \times 60 \times 60$	
D	3×3 conv, relu	$256 \times 58 \times 58$	
D	3×3 conv, relu, dropout	$256 \times 56 \times 56$	F
D	3×3 conv, stride2	$256 \times 28 \times 28$	
E	3×3 conv, relu	$512 \times 26 \times 26$	
E	3×3 conv, relu, dropout	$512 \times 24 \times 24$	
E	3×3 deconv, relu	$256 \times 48 \times 48$	
F	3×3 conv, relu	$256 \times 46 \times 46$	
F	3×3 conv, relu	$256 \times 44 \times 44$	
F	3×3 deconv, relu	$128 \times 88 \times 88$	
G	3×3 conv, relu	$128 \times 86 \times 86$	
G	3×3 conv, relu	$128 \times 84 \times 84$	
G	3×3 deconv, relu	$64 \times 168 \times 168$	
H	3×3 conv, relu	$64 \times 166 \times 166$	
H	3×3 conv, relu	$64 \times 164 \times 164$	
H	3×3 deconv, relu	$32 \times 328 \times 328$	
I	3×3 conv, relu	$32 \times 326 \times 326$	
I	3×3 conv, relu	$32 \times 324 \times 324$	
Çıkış	3×3 deconv, relu	$5 \times 324 \times 324$	

Tablo 1, CS-CNN modelinin farklı katmanlarını, bu katmanların türlerini, çıkış boyutlarını ve atlama bağlantılarını (skip connection) listelemektedir. Her bir sütunun detaylı açıklaması şu şekildedir:

Blok: CS-CNN modeli, her biri belirli bir işlevi yerine getiren bir dizi konvolüsyon katmanı bloğundan oluşmaktadır. A'dan I'ya her blok, model içinde belirli bir aşamayı temsil eder.

Katman Türü: Bu sütun, her blokta bulunan katmanların türünü belirtir. CS-CNN modeli, aşağıdaki katman türlerini kullanır:

- **Giriş:** Modelin girdi verilerini (çok spektral uydu görüntüleri) temsil eder.
- **conv:** Konvolüsyon işlemi gerçekleştiren katmanları temsil eder. Bu katmanlar, girdi verilerindeki özellikleri çıkarmak için kullanılır. Tablodaki "3x3 conv" ifadesi, 3x3 piksellik bir konvolüsyon çekirdeği kullanıldığını belirtir.
- **relu:** ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonunu uygulayan katmanları temsil eder. ReLU, modelin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlar.
- **stride:** Konvolüsyon işlemi sırasında kullanılan adım sayısını belirtir. "stride 2" ifadesi, konvolüsyon çekirdeğinin her adımda 2 piksel kaydırıldığını gösterir.
- **deconv:** Tersine çevrilmiş konvolüsyon (transposed convolution) işlemi gerçekleştiren katmanları temsil eder. Bu katmanlar, modelin çıkış boyutunu artırmak ve segmentasyon haritasını oluşturmak için kullanılır.
- **dropout:** Aşırı uyumu (overfitting) önlemek için bazı nöronları rastgele olarak devre dışı bırakan katmanları temsil eder.
- **Çıkış:** Modelin son çıkış katmanını temsil eder.

Çıkış Boyutu: Bu sütun, her bloktan sonra elde edilen çıkış verilerinin boyutunu belirtir. Örneğin, "32x506x506" ifadesi, bloğun çıktısının 32 kanal, 506 piksel genişlik ve 506 piksel yükseklik olmak üzere üç boyutlu bir tensör olduğunu gösterir.

Atlama Bağlantısı: Atlama bağlantıları (skip connections), modelin farklı katmanları arasında doğrudan bağlantılar kurarak bilginin daha etkili bir şekilde akmasını sağlar.

Tablo 1, CS-CNN modelinin mimarisini ve her katmanın rolünü anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır. Modelin farklı katmanları, konvolüsyon, alt örnekleme ve üst örnekleme işlemleri aracılığıyla girdi verilerini işler ve nihayetinde her pikselin bir bulut sınıfına atandığı bir segmentasyon haritası üretir. Atlama bağlantıları, modelin daha doğru ve sağlam sonuçlar elde etmesine yardımcı olur.

Tablo 2

Sahne İstatistikleri CS-CNN Senaryosu

Sınıf	Doğruluk	HSS	POD	FAR	POFD	Bias
Birleştirilmiş	0.942	0.905				
Bulutsuz	0.961	0.920	0.957	0.047	0.036	1.004
Bulutla Kirlenmiş	0.973	0.885	0.886	0.082	0.013	0.968
Bulutlu	0.950	0.898	0.946	0.060	0.047	1.006
Kar / Buz	0.999	0.824	0,788	0.124	0.0002	0.913

Tablo 2’de, CS-CNN’in örnek sahne için yüksek performanslı olduğu görülmektedir. Birleştirilmiş doğruluk 0.942 ve HSS (Heidke Skill Score) 0.905’tir, bu da modelin bulut ve yüzey tiplerini doğru bir şekilde sınıflandırmada başarılı olduğunu göstermektedir.

- Bulutsuz sınıfı için HSS 0.920’dir, bu da modelin bulutsuz bölgeleri tespit etmede oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.
- Bulutla kirlenmiş sınıfı için HSS 0.885’tir ve bu da kısmen bulutlu bölgeleri tespit etmede de iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.
- Kar/buz sınıfı için HSS 0.824’tür, bu da kar/buz kaplı bölgeleri tespit etmede nispeten daha düşük bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

CS-CNN’in, örnek sahne için genel olarak iyi bir performans sergilediği görülmektedir. Yüksek doğruluk ve HSS değerleri, modelin bulut ve yüzey tiplerini doğru bir şekilde sınıflandırabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, kar/buz sınıfı için HSS değerinin daha düşük olması, bu sınıfın tespit edilmesinde bazı zorluklar olduğunu düşündürmektedir.

ÇOK KATMANLI ALGILAYICI (MULTILAYER PERCEPTRON, MLP) SINIR AĞLARI MODELİ

Piksel bazlı sınıflandırmalar için en etkili yapının Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) olduğu belirlenmiştir (Christopher M. Bishop, 1995). MLP, ileri beslemeli yapay sinir ağlarını temel alan bir sınıflandırıcıdır. Bu yapıda, çıkış katmanı hariç tüm algılayıcılar yalnızca ileri yönde bağlanır ve bir katmandaki her algılayıcı bir sonraki katmandaki tüm algılayıcılarla bağlantılıdır (Taravat et al., 2015).

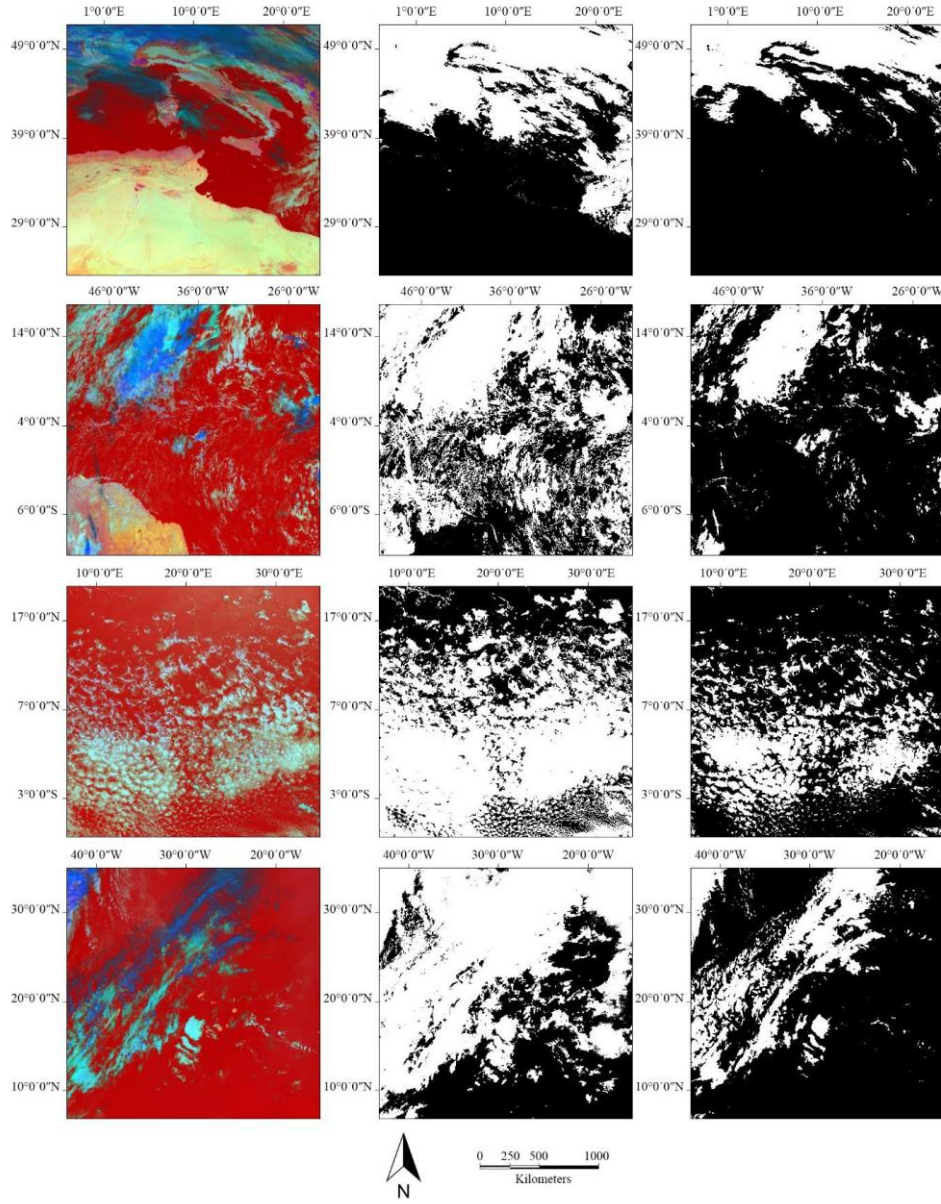
Gün ışığında bulut tespiti için 0,6 ve 0,8 μm görünür bantları, 1,6 μm yakın kızılötesi, 3,9 μm kızılötesi, 6,2 μm su buharı kanalları ve 10,8 μm kızılötesi dahil olmak üzere ek spektral kanal verileri kullanılmıştır (Derrien & le Gléau, 2010). IR 3.9 μm kanalı, alçak bulutların belirlenmesinde kritik bir role sahipken, görünür kanallar aerosol saçılmasını (ör. pus, duman, toz, polen vb.) tespit etmek için gereklidir (Bennouna et al., 2010; Derrien & Le Gléau, 2005). 0,6 ve 0,8 μm ’deki iki görünür kanal, bulutları benzer şekilde tanımlasa da kara yüzeyleri 0,8 μm ’de daha parlak, deniz yüzeyleri ise 0,6 μm ’de daha güçlü bir yansıma gösterir (Bennouna et al., 2010). Bu nedenle, bulutlar ile yüzey hedefleri arasında belirgin bir kontrast sağlamak amacıyla bu iki görünür kanal seçilmiştir.

1,6 μm NIR kanalı, kar, buz ve su bulutlarını ayırt etmek için kullanılırken, su buharı kanalı (6,2 μm) ince bulutların sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır (Bennouna et al., 2010). 10.8 μm kızılötesi kanalı ise, hem yüzey ve bulut tepe sıcaklıklarının hem de volkanik kül ve sirrus bulutlarının tespit edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Prata, 1989).

Makine öğrenimi sınıflandırıcısının sonuçları, EUMETSAT bulut maskesi (CLM) ile karşılaştırıldığında görsel inceleme ile doğrulanmıştır (Şekil 3). MLP sinir ağları, test veri seti üzerinde %88,96 doğruluk oranı ile komisyon (yanlış sınıflandırılan örnekler) ve ihmal (sınıflandırılmayan örnekler) hatalarını sırasıyla %1,68, %3,88 ve %11,04 standart sapma ile hesaplamıştır. Buna karşılık, MPEF CLM için ortalama doğruluk %86,10 olup komisyon ve ihmal hataları sırasıyla %2,47, %7,27 ve %13,90 standart sapma ile ölçülmüştür.

Şekil 3

Meteosat İkinci Nesil SEVIRI Görüntülerinin RGB Kombinasyonu, MLP NN, EUMETSAT Bulut Haritası



Şekil 3'te Meteosat ikinci nesil SEVIRI görüntülerinde bulut tespiti için çok katmanlı algılayıcı sinir ağları (MLP-NN) modelinin etkinliğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Şekil 3 üç farklı görüntü içermektedir:

Birinci Sütun: 10.8 μm (R), 1.6 μm (G) ve 0.6 μm (B) bantlarının birleştirilmesiyle oluşturulan Meteosat ikinci nesil SEVIRI görüntülerini göstermektedir. Bu renkli kompozit görüntü, bulutların ve yer yüzeyi özelliklerinin görselleştirilmesine yardımcı olur.

İkinci Sütun: MLP sinir ağı modeli tarafından sınıflandırılmış pikselleri göstermektedir. Siyah renk bulutsuz pikselleri, beyaz renk ise bulutlu pikselleri temsil etmektedir.

Üçüncü Sütun: EUMETSAT'ın Meteorolojik Ürün Çıkarma Aracı (MPEF) tarafından sağlanan bulut maskesi ürünlerini gösterir. Siyah renk bulutsuz pikselleri, beyaz renk ise bulutlu pikselleri temsil

etmektedir.

Şekil 3, MLP modelinin EUMETSAT bulut maskesine kıyasla çeşitli koşullar altında kabul edilebilir bulut tespit sonuçları elde ettiğini görsel olarak göstermektedir. Model hem parlak kalın bulutları hem de ince veya daha az parlak bulutları tespit edebilmektedir. Bu gözlem, MLP modelinin SEVIRI görüntülerinden bulutları tespit etmedeki etkinliğini desteklemektedir.

Görsel Karşılaştırma: Şekil 3, MLP modelinin ve EUMETSAT bulut maskesinin sonuçlarını yan yana görselleştirerek doğrudan bir karşılaştırma imkânı sunar. Bu görsel karşılaştırma, iki yöntemin performansını değerlendirmek için temel oluşturur.

MLP Modelinin Başarısı: MLP modelinin görsel incelemeye dayalı olarak kabul edilebilir tespit sonuçları elde ettiği görülmektedir. Bu, modelin gerçek bulut örtüsünü yakalamada başarılı olduğunu göstermektedir.

Kalın ve İnce Bulutların Tespiti: MLP modelinin hem kalın hem de ince bulutları tespit edebildiği görülmektedir. Bu, modelin farklı bulut tiplerini ayırt etme yeteneğini göstermektedir.

Tablo 3

Farklı modeller için farklı modeller için doğrulukların minimum, maksimum ve ortalama değerleri (% olarak).

Model	Mean	Min	Max	St.Dev	MeanComm	MeanOmm
MLP NN	88.96	85	91.8	1.68	3.88	11.04
MPEF CLM	86.10	82	89.2	2.47	7.27	13.90

SONUÇ

Bulut tespiti için, ışımsal transfer simülasyonlarıyla desteklenen sinir ağı tabanlı bir bulut maskesi algoritması, eşiklere dayalı geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün bir performans sergileyen bir çözüm sunmaktadır. Uyarlanabilir yapısı sayesinde, farklı sensörlerle çalışabilir ve bu özelliğiyle uydu uzaktan algılama için değerli bir araç haline gelir. Multispektral uydu verilerini doğru ve verimli bir şekilde işleyerek bulut sınıflandırması yapma potansiyeli taşıyan bir diğer yaklaşım ise CS-CNN yöntemidir. Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP), ileri beslemeli yapay sinir ağı yapıları sayesinde, piksel bazlı sınıflandırma görevlerinde yüksek doğruluk sağlayarak, özellikle uzaktan algılama uygulamalarında güvenilir ve etkili bir çözüm sunmaktadır.

Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP) ve Bulut Segmentasyonu Konvolüsyonel Sinir Ağları (CS-CNN), uzaktan algılama uygulamalarında sınıflandırma ve segmentasyon için iki farklı güçlü yaklaşımdır. MLP, ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısıyla, piksel bazlı sınıflandırmalarda yüksek doğruluk sağlayan, nispeten basit ve anlaşılır bir mimariye sahiptir. Bununla birlikte, yalnızca piksel düzeyinde işlem yapması ve mekânsal bağlamı doğrudan kullanamaması, özellikle karmaşık sahnelerde sınırlayıcı olabilmektedir. Öte yandan, CS-CNN, hem mekânsal hem de spektral bilgileri etkili bir şekilde birleştirerek özellik çıkarma gereksinimi olmadan yüksek doğruluklu segmentasyonlar üretmektedir. Bu durum, CS-CNN'yi özellikle bulut maskesi oluşturma gibi daha karmaşık duyarlı uzaktan algılama görevleri için daha yenilikçi ve uyarlanabilir bir yöntem haline getirmektedir. Dolayısıyla, MLP daha basit ve hızlı çözümler için uygunken; CS-CNN, mekânsal detayların ve bağlamsal bilgilerin kritik olduğu senaryolarda üstün bir alternatif sunmaktadır.

REFERENCES

- Ackerman, S., Strabala, K., Menzel, P., Frey, R., Moeller, C., Gumley, L., Baum, B., Seemann, S. W., & Zhang, H. (2006). *Discriminating Clear-Sky From Cloud With Modis Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35) MODIS Cloud Mask Team*.
- Aminou, D. M. (n.d.). *The MSG system Comparison LEO and GEO satellites View project Meteosat Third Generation View project*. <https://www.researchgate.net/publication/241275071>
- Bechini, R., & Cremonini, R. (2007). *2007_MSG_cloud_mask_algorithm_validation_using_data_by_MODIS-libre*.
- Benas, N., Finkensieper, S., Stengel, M., Van Zadelhoff, G. J., Hanschmann, T., Hollmann, R., & Meirink, J. F. (2017). The MSG-SEVIRI-based cloud property data record CLAAS-2. *Earth System Science Data*, 9(2), 415–434. <https://doi.org/10.5194/essd-9-415-2017>
- Bennouna, Y. S., Curier, L., Piazzola, J., de Leeuw, G., Roebeling, R., & de Valk, P. (2010). An automated day-time cloud detection technique applied to MSG-SEVIRI data over Western Europe. *International Journal of Remote Sensing*, 31(23), 6073–6093. <https://doi.org/10.1080/01431160903376399>
- Chen, N., Li, W., Gatebe, C., Tanikawa, T., Hori, M., Shimada, R., Aoki, T., & Stamnes, K. (2018a). New neural network cloud mask algorithm based on radiative transfer simulations. *Remote Sensing of Environment*, 219, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.029>
- Chen, N., Li, W., Gatebe, C., Tanikawa, T., Hori, M., Shimada, R., Aoki, T., & Stamnes, K. (2018b). New neural network cloud mask algorithm based on radiative transfer simulations. *Remote Sensing of Environment*, 219, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.029>
- Choi, Y.-S., Ho, C.-H., Ahn, M.-H., & Kim, Y.-M. (n.d.). *Remote Sensing of Cloud Properties from the Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) Imagery*. <https://www.researchgate.net/publication/239847339>
- Christopher M. Bishop. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Clarendon Press.
- Derrien, M., & Le Gléau, H. (2005). MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC. *International Journal of Remote Sensing*, 26(21), 4707–4732. <https://doi.org/10.1080/01431160500166128>
- Derrien, M., & le Gléau, H. (2010). Improvement of cloud detection near sunrise and sunset by temporal-differencing and region-growing techniques with real-time SEVIRI. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7), 1765–1780. <https://doi.org/10.1080/01431160902926632>
- Drönner, J., Korfhage, N., Egli, S., Mühling, M., Thies, B., Bendix, J., Freisleben, B., & Seeger, B. (2018a). Fast cloud segmentation using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111782>
- Drönner, J., Korfhage, N., Egli, S., Mühling, M., Thies, B., Bendix, J., Freisleben, B., & Seeger, B. (2018b). Fast cloud segmentation using convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/rs10111782>
- Hacıbeyoglu, M., Arıcı, F. N., & Karaaltun, M. (2024). Intrusion Detection System Application with Machine Learning. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 24(5), 1165–1179. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1455995>
- Hadizadeh, M., Rahnema, M., Kamali, M., Kazemi, M., & Mohammadi, A. (2019). A new method to estimate cloud effective radius using Meteosat Second Generation SEVIRI over Middle East.

- Advances in Space Research*, 64(4), 933–943. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.035>
- Huckle, R. (2009). *Determination of clouds in MSG data for the validation of clouds in a regional climate model*.
- Kacar, M. S., Yumusak, S., & Kodaz, H. (2023). Price Rank Prediction of a Company by Utilizing Data Mining Methods on Financial Disclosures. *Chinese Journal of Epidemiology*, E106D(9), 1461–1471. <https://doi.org/10.1587/transinf.2022OFP0002>
- Kaufman, Y. J., & Nakajima, T. (1993). Effect of Amazon Smoke on Cloud Microphysics and Albedo-Analysis from Satellite Imagery. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 32(4), 729–744. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<0729:EOASOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<0729:EOASOC>2.0.CO;2)
- Key, J. R., & Intrieri, J. M. (2000). *Cloud Particle Phase Determination with the AVHRR*.
- Koçer, S., Sheikh, B., Jama, A., Er, Y., Dündar, Ö. (2022). *A Comparative Study for Evaluating the Performance of Various Classification Techniques on Brain Tumour*.
- Mahović, N. S., & Zeiner, B. (2009). Application of Meteosat SEVIRI channel difference 0.6 μm -1.6 μm in convective cells detection. *Atmospheric Research*, 93(1–3), 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.023>
- Meyer. (n.d.). *MSG Meteorological Products Extraction Facility Algorithm Specification Document*. <http://www.eumetsat.int>
- Oztimur Karadag, O., & Erdas Cicek, O. (n.d.). International Journal of INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING Empirical Evaluation of the Effectiveness of Variational Autoencoders on Data Augmentation for the Image Classification Problem. *Original Research Paper International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering IJISAE*, 2020(2), 116–120. <https://doi.org/10.1039/b0000000x>
- Prata, A. J. (1989). Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 μm window using AVHRR/2 data. In *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 10, pp. 751–761). Informa UK Limited. <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=5d07892b-9bcf-3e96-8007-69a0ac95e0c8>
- Rasmussen, M. O., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., & Sandholt, I. (2011). Directional effects on land surface temperature estimation from meteosat second generation for savanna landscapes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11 PART 2), 4458–4468. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2144604>
- Saunders, R. W., & Kriebel, K. T. (1988). An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9(1), 123–150. <https://doi.org/10.1080/01431168808954841>
- Svennevik, H., Hicks, S. A., Riegler, M. A., Storelvmo, T., & Hammer, H. L. (2024). A dataset for predicting cloud cover over Europe. *Scientific Data*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03062-0>
- Taravat, A., Proud, S., Peronaci, S., Del Frate, F., & Oppelt, N. (2015). Multilayer perceptron neural networks model for meteosat second generation SEVIRI daytime cloud masking. *Remote Sensing*, 7(2), 1529–1539. <https://doi.org/10.3390/rs70201529>
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, 47(1). <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhang, R., Sun, D., Li, S., & Yu, Y. (2013). A stepwise cloud shadow detection approach combining

geometry determination and SVM classification for MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(1), 211–226. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.712231>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Cloud detection is essential for applications like climate monitoring and weather forecasting, yet traditional methods often struggle in complex scenarios such as snow-covered regions or mixed cloud types. This study investigates advanced machine learning techniques, specifically Multilayer Perceptrons (MLP) and Convolutional Neural Networks (CS-CNN), to improve accuracy and adaptability in cloud classification. CS-CNN integrates spatial and spectral information without relying on predefined features, offering a significant advancement over traditional methods. By analyzing the contributions of specific multispectral bands and comparing methods, this research highlights CS-CNN's potential as a robust tool for remote sensing applications.

Method: This study employs a comparative analysis to evaluate the effectiveness of machine learning techniques, specifically Multilayer Perceptrons (MLP) and Convolutional Neural Networks (CS-CNN), for cloud detection and classification using multispectral remote sensing data. The data includes visible, near-infrared, and thermal infrared bands, carefully selected to capture critical features of clouds and surface conditions. MLP models are trained as pixel-based classifiers, leveraging feedforward architectures to assign cloud classes to each pixel based on spectral characteristics. Conversely, the CS-CNN model incorporates both spectral and spatial information, utilizing convolutional layers to process multispectral images and extract contextual features. Key spectral bands, such as 0.6 μm , 0.8 μm , 1.6 μm , 3.9 μm , 6.2 μm , and 10.8 μm , are analyzed for their contributions to cloud classification. The performance of these models is evaluated against the EUMETSAT cloud mask (CLM) benchmark through metrics such as accuracy, commission, and omission errors. This approach ensures a robust comparison of methods while demonstrating the potential of CS-CNN for enhanced cloud detection in diverse environmental conditions.

Findings: The analysis reveals that Convolutional Neural Networks (CS-CNN) significantly outperform traditional methods and Multilayer Perceptrons (MLP) in cloud detection and classification tasks. CS-CNN effectively integrates spatial and spectral information, achieving higher accuracy and adaptability in complex scenarios, such as snow-covered areas and mixed cloud types. The model demonstrates superior performance, surpassing the EUMETSAT cloud mask (CLM) in accuracy metrics and reducing both commission and omission errors. Additionally, the study highlights the critical role of specific spectral bands, such as near-infrared and thermal infrared channels, in improving classification precision. These findings underscore CS-CNN's potential as a robust and reliable tool for remote sensing applications.

Discussion: The findings highlight the transformative potential of CS-CNN in addressing long-standing challenges in cloud detection and classification. Unlike traditional threshold-based methods and pixel-level classifiers like MLP, CS-CNN excels by integrating spatial context with spectral information, offering greater accuracy and adaptability. The study emphasizes the importance of specific spectral bands, such as near-infrared and thermal infrared, in distinguishing cloud types and surface features. While the results demonstrate clear advantages, the discussion also considers limitations, such as computational complexity, and the need for further validation across diverse sensors and environmental conditions. These insights pave the way for advancing machine learning applications in remote sensing.

Conclusion: This study demonstrates the superiority of Convolutional Neural Networks (CS-CNN) over traditional methods and Multilayer Perceptrons (MLP) in cloud detection and classification using multispectral remote sensing data. By effectively integrating spatial and spectral information, CS-CNN achieves higher accuracy, adaptability, and robustness in complex scenarios, such as snow-covered regions and mixed cloud formations. The critical role of specific spectral bands in enhancing classification performance is also underscored. These findings highlight CS-CNN's potential as a powerful tool for remote sensing applications, offering a significant step forward in improving the accuracy and efficiency of cloud detection methodologies.

Recommendation: It is recommended that future studies explore the scalability and adaptability of CS-CNN across a wider range of sensors and environmental conditions to further validate its robustness. Incorporating additional spectral bands and experimenting with hybrid models combining MLP and CS-CNN could enhance performance in specific scenarios. Researchers and practitioners in remote sensing are encouraged to leverage CS-CNN for cloud detection tasks, particularly in applications requiring high accuracy and spatial context integration, such as climate monitoring, weather forecasting, and environmental analysis.

Numerical and Analytical Free Vibration Analysis of Composite Plate with Auxetic Core Layer and Functionally Graded Surface Layers

Kerim Gökhan AKTAŞ¹  Mehmet Ali GÜVENÇ^{2*} 

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

² İskenderun Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

Article Info

Received: 27.11.2024

Accepted: 16.12.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

FG plate,
Auxetic core,
Finite element method,
Navier method,
Si₃N₄-Ni.

ABSTRACT

In this study, the free vibration behavior of a sandwich plate with a re-entrant auxetic core layer placed between two functionally graded (FG) composite surface layers are analyzed. Both analytical and numerical methods are employed under various boundary conditions to investigate the free vibration response of the three-layer sandwich structure. The FG layers are modeled using a silicon nitride (Si₃N₄)-nickel (Ni) ceramic-metal matrix, selected for its superior thermal and mechanical properties. The material properties of the re-entrant auxetic core and FG surface plates are considered temperature-dependent, allowing for a realistic representation of environmental effects. The effective material properties of the FG plates are defined using a power-law distribution, enabling a gradual variation in composition through the plate's thickness. Hamilton's principle is applied to derive the governing equations of motion for the sandwich plate, ensuring an accurate theoretical foundation. To analyze the free vibration response, the Finite Element Method (FEM) and Navier method are utilized. FEM offers flexibility for various boundary conditions (BCs), while the Navier method provides a precise analytical solution for plates with uniform conditions. Simulations explore the effects of temperature changes, the power-law index, and the auxetic core's geometric parameters on the plate's vibration behavior. The results from the analytical and numerical methods show excellent agreement, confirming the validity of the approaches used. The findings reveal that temperature variations significantly influence the natural frequencies due to changes in material stiffness. Additionally, the power-law index impacts the stiffness distribution, while the auxetic core geometry, such as cell angles and dimensions, plays a key role in modifying the plate's rigidity and free vibration response. This study concludes that by optimizing these parameters, the vibration performance of sandwich plates can be enhanced for specific operating conditions. The findings are expected to provide valuable insights for designing advanced structures in areas such as aerospace, automotive and marine industries.

Auxetik Çekirdek Katmanına ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Yüzey Katmanlarına Sahip Kompozit Plakanın Sayısal ve Analitik Serbest Titreşim Analizi

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 27.11.2024

Kabul Tarihi: 16.12.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

FG plakası,
Auxetic çekirdek,
Sonlu elemanlar yöntemi,
Navier yöntemi, Si₃N₄-Ni.

ÖZET

Bu çalışmada, iki fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) plaka arasına sandviç edilmiş auxetik çekirdek katmanlı bir sandviç plakanın serbest titreşim analizi, çeşitli sınır koşulları altında hem analitik hem de nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FD plakalar, silikon nitrür (Si₃N₄)-nikel (Ni) seramik-metal matrisli olarak tasarlanmış ve sandviç yapıdaki malzeme kombinasyonu, mekanik ve termal performansın optimize edilmesi amacıyla tercih edilmiştir. Sandviç yapının malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği varsayılmıştır. Bu bağlamda, auxetik çekirdek katman ve FD yüzey plakalarının sıcaklığa duyarlılığı, dinamik analizlerde dikkate alınmıştır. Yüzey plakalarının efektif malzeme özellikleri, kuvvet yasası dağılımı ile tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, malzeme özelliklerinin konuma bağlı olarak değiştiği gerçekçi bir modelleme sağlamaktadır. Sandviç plakanın hareket denklemleri Hamilton prensibi kullanılarak elde edilmiş, serbest titreşim analizinde ise sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve Navier yöntemi kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları, sandviç plakanın serbest titreşim davranışını etkileyen önemli parametreleri detaylı bir şekilde incelemiştir. Sıcaklık değişiminin plakanın malzeme özelliklerini ve titreşim frekanslarını etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüzey plakalarının kuvvet yasası indeksiindeki değişimlerin, titreşim davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. Auxetik çekirdek katmanının geometrik parametreleri (örneğin, hücre boyutu ve duvar açıları), plakanın genel rijitliğini ve titreşim modlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Analitik ve nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve birbirini doğrular nitelikte bulunmuştur. Bu durum, kullanılan yöntemlerin geçerliliğini ve doğruluğunu ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, sıcaklık değişimi, kuvvet yasası parametreleri ve auxetik çekirdek katman geometrisinin plakanın serbest titreşim davranışını önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Özellikle, plakanın kullanılacağı ortam koşullarına göre bu parametrelerin optimize edilmesiyle, daha verimli ve güvenilir tasarımların gerçekleştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma, auxetik çekirdek katmanlı ve FD yüzey katmanlı sandviç plakalara ilişkin kapsamlı bir titreşim analizi sunarak, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir temel sağlamaktadır. Analizlerin doğruluğu ve yöntemlerin uyumu, sandviç yapıların farklı uygulama alanlarında kullanılabilirliğini artıracak yeni tasarımlar geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Elde edilen bulguların, havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrileri gibi alanlarda gelişmiş yapıların tasarlanması için değerli bilgiler sağlayacağı düşünülmektedir.

To cite this article:

Aktaş, K. A., & Guvenc, M. A. (2024). Numerical and analytical free vibration analysis of composite plate with auxetic core layer and functionally graded surface layers. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 158-174. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.6>

*Corresponding Author: Kerim Gökhan AKTAŞ, kerimgokhanaktas@karabuk.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

INTRODUCTION

Auxetic materials, characterized by a negative Poisson's ratio, have gained great interest in recent years due to their unique mechanical properties and potential applications in various areas. The key feature of auxetic materials is their ability to expand laterally when stretched and contract laterally when compressed, which contrasts with conventional materials that exhibit the opposite behavior. This unusual deformation mechanism is due to specific microstructural configurations, such as reentrant geometries or hierarchical structures, which can be designed to optimize performance for desired applications (Critchley et al., 2013; Fan et al., 2018; Gatt et al., 2015). Auxetic core plates exhibit improved mechanical properties, making them appropriate for applications demanding lightweight but stiff materials. Gatt et al. (Gatt et al., 2015) discuss the advantages of hierarchical auxetic mechanical metamaterials that can significantly reduce density while maintaining structural integrity. This property is particularly beneficial in industries such as aerospace and automotive where weight reduction is critical to improve fuel efficiency and performance. Furthermore, Lim's (Lim, 2014) research on auxetic plates on auxetic foundations shows that these materials can effectively damp vibrations and improve wave propagation properties, making them ideal for use in dynamic environments. The unique properties of auxetic materials also extend to their thermal and acoustic behavior. Lim's studies (Lim, 2013b) on thermal stresses in thin auxetic plates show that replacing conventional materials with auxetic solids can significantly reduce thermal stresses, which is advantageous in applications subject to temperature fluctuations. Furthermore, as discussed by Lim (Lim, 2013a), the ability of auxetic structures to control stress wave transmission and reflection demonstrates their potential in applications requiring effective vibration isolation and noise reduction. These properties make auxetic core plates not only mechanically robust but also versatile in various environmental conditions. The study of auxetic materials is not limited to traditional applications; they are also being explored for innovative uses in emerging technologies. For example, the integration of auxetic structures into sensors has been proposed, as their unique deformation properties can improve sensitivity and adaptability in various sensing applications (Dong & Hu, 2023).

Recent studies have shown that auxetic honeycomb structures exhibit improved vibration characteristics compared to their conventional counterparts. For example, Cong et al. (Aktaş, 2024b; Cong et al., 2021) investigated the nonlinear dynamic response of auxetic honeycomb plates subjected to blast loads and highlighted the importance of lattice reinforcements in influencing the vibration behavior. Their findings indicate that the incorporation of auxetic cores can significantly enhance the energy absorption and vibration damping capabilities of sandwich structures. Similarly, Nguyen and Pham Nguyen (Nguyen & Pham, 2016) presented a comprehensive analysis of the nonlinear dynamic response of sandwich composite plates with auxetic honeycombs and emphasized the role of negative Poisson's ratio in enhancing the vibration performance of these materials. Free vibration analysis of auxetic core plates has also been addressed through various computational and experimental methodologies. Tran et al. (T. T. Tran et al., 2020) used a full analytical approach to study the dynamic behavior of sandwich auxetic honeycomb plates on elastic foundations, revealing the complex interaction between core geometry and vibrational properties. Their work underlines the importance of accurately modeling the mechanical properties of auxetic materials to effectively predict their dynamic response. In a complementary study, Stręk et al. (Stręk et al., 2015) focused on the dynamic response of sandwich panels with auxetic cores, providing a detailed investigation of shear deformation and bending stiffness, which are crucial for understanding the vibrational behavior of these structures. Furthermore, the influence of core density and configuration on the dynamic properties of auxetic structures has been the focus of recent research. Essassi et al. (Essassi et al., 2019) performed experimental and numerical analyses to evaluate the dynamic behavior of bio-based sandwich structures with auxetic cores and showed that changes in core density significantly affect the damping properties and vibration

transmission. This finding is in agreement with the observations made by Zhang et al. (Xinchun Zhang et al., 2014) who investigated the dynamic crushing behavior of auxetic honeycombs and highlighted the dependence of in-plane dynamic performance on cell-wall angles and configurations. The integration of advanced modeling techniques such as finite element analysis (FEA) has further improved the understanding of the dynamic response of auxetic core plates. Alavi (Akhavan Alavi & Ghajar, 2024) used modified strain gradient theory to analyze the transient nonlinear response of microcellular auxetic core sandwich plates under impact loads, providing insights into the vibrational properties of these materials under dynamic conditions. The application of FEA in the study of auxetic structures has been validated by numerous researchers, including Zhang and Yang (Xiangwen Zhang & Yang, 2016), who conducted both numerical and experimental studies on auxetic cellular vibration isolation bases, revealing the critical role of Poisson's ratio and relative density in determining the vibration performance. In addition to theoretical and computational approaches, experimental research has also been crucial in verifying the dynamic behavior of auxetic core plates. For example, Zhang et al. (M. Zhang et al., 2024) investigated the low-speed impact response of 3D carbon fiber reinforced polymer auxetic lattice structures and demonstrated the unique failure modes and energy absorption capabilities of auxetic materials. Their findings contribute to the growing body of evidence supporting the use of auxetic structures in applications requiring improved impact resistance and vibration isolation.

The mechanical behavior of auxetic materials is fundamentally different from that of conventional materials. The integration of functionally graded materials (FGMs) into the core structure further enhances the mechanical performance by allowing for tailored properties across the thickness of the sandwich plate, which can be optimized for specific loading conditions (Shi & Shimoda, 2015). For example, Mahesh (Mahesh, 2022) investigated the nonlinear damping properties of auxetic sandwich plates with functionally graded magneto-electro-elastic surfaces under multiphysics loads. The study emphasized the importance of material grading in improving the damping properties and overall structural integrity of sandwich plates. Similarly, Mukahal (Al Mukahal, 2023) investigated the static response of nanocomposite electromagnetic sandwich plates and revealed that the use of functionally graded materials can lead to improved load carrying capabilities and resistance to hygrothermal effects (Dağ, 2024). In addition to mechanical performance, the acoustic properties of functionally graded auxetic core sandwich plates have also been a topic of research. The unique cellular structure of auxetic materials can lead to enhanced sound insulation properties, making them suitable for applications in noise-sensitive environments. For example, Liu et al. (Liu et al., 2019) studied the sound insulation capabilities of pyramidal lattice sandwich structures, highlighting the potential of auxetic designs to contribute to improved acoustic performance in various applications. The fabrication processes of functionally graded auxetic core sandwich plates are also critical to their performance. Advances in additive manufacturing and composite fabrication techniques have enabled the production of complex geometries and specific material distributions required to realize the full potential of these innovative structures (Mastali et al., 2015; Xiong et al., 2016). The ability to control material composition and architecture at different scales allows optimization of mechanical properties and performance characteristics, leading to more efficient and effective designs (Aktaş, 2024a).

The free vibration analysis of composite sandwich plates with metamaterial auxetic core and metal-ceramic FG surface layers has not been analyzed both analytically and numerically with temperature dependent parameters. It is expected that the proposed sandwich structure will make a significant contribution to various application areas such as automotive, aerospace and marine with its high strength-to-weight ratio, high energy absorption capacity, impact resistance, as well as its ability to adapt to thermal and corrosive environments.

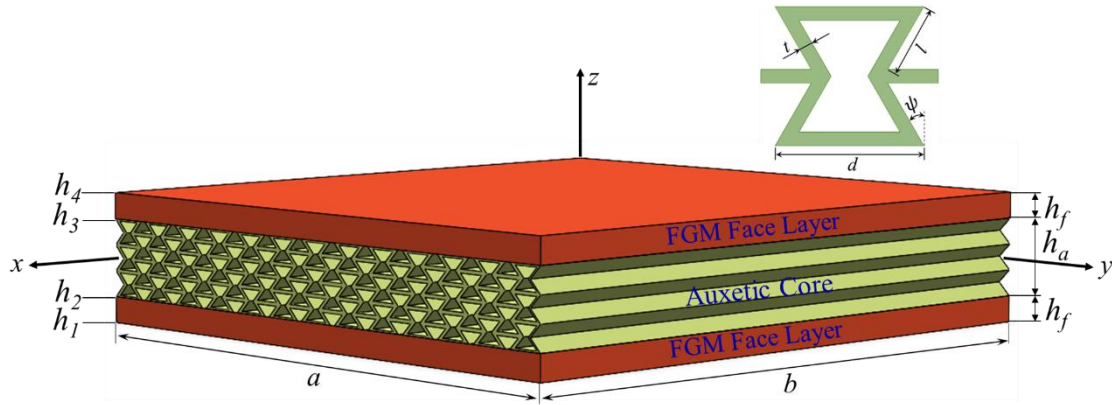
THEORETICAL FORMULATION

Model Description

The re-entrant hexagonal structure is a remarkable example of auxetic metamaterials. As shown in Figure 1, a re-entrant auxetic core structure bonded between two FGM surface layers is considered for the temperature dependent free vibration analysis of the mathematical sandwich structure. Figure 1 also illustrates the unit cell geometry of the re-entrant hexagonal structure. h_a indicates the thickness of the re-entrant auxetic core, while h_f indicates the thickness of the surface layers, which are relatively thinner than the core layer. It is assumed that a thermal load is applied to the sandwich plate in the thickness direction and the temperature propagates nonlinearly through the plate. The re-entrant auxetic core is composed of pure Ni , while the FGM surface plates are composed of Ni/Si_3N_4 matrices where the effective material properties are determined by the power law distribution.

Figure 1

The schematic representation of the proposed auxetic core sandwich plate.



Re-entrant Auxetic Core Configuration

In order to construct the reentrant core layer, auxetic cells are organized in a particular configuration that is determined by inclination angle (ψ), horizontal wall length (d), wall thickness (t) and inclined wall length (l) components. It is possible to compute the mechanical and thermal properties of the auxetic core using the following formula (Li & Yuan, 2022; Nouraei & Zamani, 2023):

$$E_{11}^A = E_{Ni} \left[\frac{(\gamma - \sin \psi) \Lambda^3}{[(\gamma \sec^2(\psi) + \tan^2(\psi)) \Lambda^2 + 1] \cos^3(\psi)} \right] \quad (1)$$

$$E_{22}^A = E_{Ni} \left[\frac{\Lambda^3}{(\Lambda^2 + \tan^2(\psi)) (\cos(\psi) \gamma - \cos(\theta) \sin(\psi))} \right] \quad (2)$$

$$G_{12}^A = G_{Ni} \left[\frac{\Lambda^3}{(2\gamma^2 + \gamma) \cos \psi} \right] \quad (3)$$

$$G_{13}^A = G_{Ni} \left[\frac{2\sin^2(\psi) + Y}{2(Y - \sin(\psi))} + \frac{-\sin(\psi) + Y}{2Y + 1} \right] \frac{\Lambda}{2 \cos(\psi)} \quad (4)$$

$$G_{23}^A = G_{Ni} \left[\frac{\Lambda \cos(\psi)}{Y - \sin(\psi)} \right] \quad (5)$$

$$\rho^A = \rho_{Ni} \left[\frac{(2 + Y)\Lambda}{2(Y - \sin(\psi)) \cos(\psi)} \right] \quad (6)$$

$$v_{12}^C = \frac{(\sin(\psi) - Y)(\sin(\psi))(1 - \beta_3^2)}{\cos^2(\psi) [\Lambda^2 (Y \sec^2(\psi) + \tan^2(\psi)) + 1]} \quad (7)$$

$$v_{21}^C = \frac{(\Lambda^2 - 1) \sin(\psi)}{(Y - \sin(\psi))(\Lambda^2 + \tan^2(\psi))} \quad (8)$$

$$\alpha_{11}^C = \alpha_{Ni} \frac{\Lambda \cos(\psi)}{Y + \sin(\psi)} \quad (9)$$

$$\alpha_{22}^C = \alpha_{Ni} \frac{\Lambda(Y + \sin(\psi))}{(2Y + 1) \cos(\psi)} \quad (10)$$

in which $Y = d/l$ and $\Lambda = t/l$.

FGM Surface Layers Effective Properties

The re-entrant core layer is bonded between Ni/Si_3N_4 FGM layers. In this way, the structure is ensured to be lightened without losing its stiffness properties. The top and bottom FGM layers are symmetrical. In other words, the lower surface of the top FGM plate is Ni rich, while the upper surface is Si_3N_4 rich. On the contrary, while the upper surface of the bottom FGM plate is Ni rich, the lower surface is Si_3N_4 rich. Under the influence of the power law exponent, the mechanical and thermal variables of the surface plates exhibit a consistent variation along the thickness direction. In order to determine the functional mechanical and thermal properties of the FGM face plates, the following formula can be utilized (Amini et al., 2015):

$$E_{eff} = E_{Si_3N_4} + (E_{Ni} - E_{Si_3N_4})V^{U,L} \quad (11)$$

$$v_{eff} = v_{Si_3N_4} + (v_{Ni} - v_{Si_3N_4})V^{U,L} \quad (12)$$

$$\rho_{eff} = \rho_{Si_3N_4} + (\rho_{Ni} - \rho_{Si_3N_4})V^{U,L} \quad (13)$$

$$\alpha_{eff} = \alpha_{Si_3N_4} + (\alpha_{Ni} - \alpha_{Si_3N_4})V^{U,L} \quad (14)$$

$$\kappa_{eff} = \kappa_{Si_3N_4} + (\kappa_{Ni} - \kappa_{Si_3N_4})V^{U,L} \quad (15)$$

where the subscripts *eff* represents the effective material characteristics of FGM surface layers. Using the power-law exponent, the volume fraction, represented by $V^{U,L}$, can be found using the following method (Nouraei & Zamani, 2023; Thai & Choi, 2013):

$$\begin{aligned} V^L &= \left(\frac{1}{2} + \frac{2z + h_a + h_f}{2h_f} \right)^n \quad (-h_a/2 - h_f \leq z \leq -h_a/2) \\ V^U &= \left(\frac{1}{2} - \frac{2z - h_a - h_f}{2h_f} \right)^n \quad (h_a/2 \leq z \leq h_a/2 + h_f) \end{aligned} \quad (16)$$

where n denotes the power-law parameter (for $n = 0$, $E_{eff} = E_{Ni}$ and for $n = \infty$, $E_{eff} = E_{Si_3N_4}$). $V^{U,L}$ represents the ratio of *Ni* in the FGM structure. The power-law exponent provides an indicator of the *Ni* content. The volume fraction of metal and ceramic components can be calculated by integrating the distribution over the area. The volume fractions of ceramic and metal components in the FGM surface plates for different power law parameters are illustrated in Table 1.

Table 1

Volume fractions of *Ni* and *Si₃N₄*.

Power-law parameter (n)	V_{Ni}	$V_{Si_3N_4}$
0	1.0	0.0
0,5	0.6667	0.3333
1	0.5000	0.5000
2	0.3333	0.6667
5	0.1667	0.8333
10	0.0909	0.9091
20	0.0476	0.9524
100	0.0099	0.9901

In response to changes in temperature, the FGM composite plate exhibits a variety of different mechanical and thermal properties. In order to provide a description of the thermal and mechanical properties, a nonlinear temperature solution can be applied in this way (Reddy & Chin, 1998; Touloukian, 1967; Touloukian YS, 1966):

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (17)$$

where $T = T_0 + \Delta T$ and $T_0 = 300$ K. P_0 , P_{-1} , P_1 , P_2 , and P_3 refer to the temperature-dependent material constants. The top and bottom layer temperatures (T_U and T_L) of the plate can be determined as follows: (D. G. Zhang, 2014).

$$-\frac{d}{dz} \left[\kappa(z, T) \frac{dT}{dz} \right] = 0, \quad T \left(\frac{h_a}{2} + h_f \right) = T_U, \quad T \left(-\frac{h_a}{2} - h_f \right) = T_L \quad (18)$$

The temperature of a desired point in the z -axis of the plate can be calculated as follows (Ebrahimi & Barati, 2016):

$$T(z) = T_b + \frac{(T_t - T_b) \int_{-\frac{h}{2}}^z \frac{1}{\kappa(z, T)} dz}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{\kappa(z, T)} dz} \quad (19)$$

Governing Equations

Strain and Displacement

Based on the FSDT, the displacement field (u , v , and w) at any point of the plate element in local axis (x , y , z) can be defined as (V. K. Tran et al., 2020):

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\theta_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\theta_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (20)$$

where u , v and w are the displacements of any point in the x , y , and z directions. u_0 , v_0 , w_0 , θ_x and θ_y are the displacements of mid-plane and rotation angles of the transverse normal around the y -axis and x -axis, respectively.

From Eq. (20), the normal (ε) and shear strains (γ) can be written as:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \theta_y \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \theta_x \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + z \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Constitutive equations

In the classical elasticity theory, stress can be written as follows:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^{C,U,L} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - \alpha T \\ \varepsilon_{yy} - \alpha T \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (22)$$

where C , U and L represents the auxetic core and surface layers, respectively. Also, Q_{ii} are the stiffness coefficients which can be defined as below (Nouraei et al., 2024):

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}^2}; Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}^2}; Q_{12} = \nu_{12} Q_{22}; \quad (23)$$

$$Q_{44}(z) = G_{23}; Q_{55} = G_{13}; Q_{66} = G_{12};$$

It is assumed in the current investigation that $G_{13}=G_{12}$ and $G_{23}=1.2G_{12}$ (Natarajan et al., 2014).

Hamilton's Principle for Free Vibrational Equations

The free vibrational equations of the sandwich plate can be obtained using the Hamilton's principle as follows:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta K - \delta U + \delta W) dt = 0 \quad (24)$$

where δK , δU and δW indicate the first variation of the kinetic energy, strain energy, and the work done by the external load, respectively.

The strain energy, denoted by $\delta \mathcal{U}$, is obtained by:

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{U} = & \int_{\Omega} \left[\int_{h_1}^{h_2} (\sigma_{xx}^L \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^L \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^L \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^L \delta \gamma_{xz} + \sigma_{xy}^L \delta \gamma_{xz}) dz \right. \\ & + \int_{h_2}^{h_3} (\sigma_{xx}^C \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^C \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^C \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^C \delta \gamma_{xz} + \sigma_{xy}^C \delta \gamma_{xz}) dz \\ & \left. + \int_{h_3}^{h_4} (\sigma_{xx}^U \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^U \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{yz}^U \delta \gamma_{yz} + \sigma_{xz}^U \delta \gamma_{xz} + \sigma_{xy}^U \delta \gamma_{xz}) dz \right] dx dy \end{aligned} \quad (25)$$

where $h_1 = -h_a/2 - h_f$, $h_2 = -h_a/2$, $h_3 = h_a/2$ and $h_4 = h_a/2 + h_f$.

δK can be written as:

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{K} = & \int_{\Omega} \left[\int_{h_1}^{h_2} \rho^L (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz + \int_{h_2}^{h_3} \rho^C (z) (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz \right. \\ & \left. + \int_{h_3}^{h_4} \rho^U (z) (\dot{u} \delta \dot{u} + \dot{v} \delta \dot{v} + \dot{w} \delta \dot{w}) dz \right] dx dy \end{aligned} \quad (26)$$

The virtual work can be obtained by:

$$\delta W = \int_{\Omega} \left[N_x^T \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} + N_y^T \frac{\partial w_b}{\partial x} \frac{\partial \delta w_0}{\partial x} \right] dx dy \quad (27)$$

Temperature effects N_x^T and N_y^T are defined by:

$$N_x^T = b \left[\int_{h_1}^{h_2} Q_{11}^L \alpha_L \Delta T dz + \int_{h_2}^{h_3} Q_{11}^C \alpha_C \Delta T dz + \int_{h_3}^{h_4} Q_{11}^U \alpha_U \Delta T dz \right] \quad (28)$$

$$N_y^T = a \left[\int_{h_1}^{h_2} Q_{11}^L \alpha_L \Delta T dz + \int_{h_2}^{h_3} Q_{11}^S \alpha_C \Delta T dz + \int_{h_3}^{h_4} Q_{11}^P \alpha_U \Delta T dz \right] \quad (29)$$

The differential equations that describe the recommended sandwich structure can be obtained by substituting the $\delta\mathcal{U}$, $\delta\mathcal{K}$, and $\delta\mathcal{W}$ from equations (25-27) into equation (24).

Solution Procedures

In this study, two different solution methods, analytical and numerical, are employed to solve the equations of motion of a sandwich plate and compared with each other. In order to analyze the natural frequency of the sandwich plate, Navier's method is preferred as the analytical method and finite element method is preferred as the numerical method. ANSYS software is used for finite element analysis of the sandwich plate. The boundary conditions of the presented sandwich plate with simply supported (S), clamped (C) or free (F) edges can be written as follows:

For simply supported (S):

$$v_0 = w_0 = \theta_y = N_{xx} = M_{xx} = 0 \text{ at } x = 0, a \quad (30)$$

$$u_0 = w_0 = \theta_x = N_{yy} = M_{yy} = 0 \text{ at } y = 0, b$$

For clamped (C):

$$u_0 = v_0 = w_0 = \theta_x = \theta_y = 0 \text{ at } x = 0, a; y = 0, b \quad (31)$$

For free (F):

$$M_{xx} = M_{xy} = Q_{xz} = 0 \text{ at } x = 0, a \quad (32)$$

$$M_{yy} = M_{xy} = Q_{yz} = 0 \text{ at } y = 0, b$$

Using the Navier approach, the displacement components can be written as follows considering various boundary conditions (Esen & Özmen, 2022; Sobhy, 2013):

$$\begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \theta_x \\ \theta_y \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \begin{pmatrix} U_{mn} \frac{\partial X_m(x)}{\partial x} Y_n(y) e^{i\lambda t} \\ V_{mn} X_m(x) \frac{\partial Y_n(y)}{\partial y} e^{i\lambda t} \\ W_{mn} X_m(x) Y_n(y) e^{i\lambda t} \\ \theta_{xmn} \frac{\partial X_m(x)}{\partial x} Y_n(y) e^{i\lambda t} \\ \theta_{ymn} X_m(x) \frac{\partial Y_n(y)}{\partial y} e^{i\lambda t} \end{pmatrix}, \quad \alpha = \frac{m\pi}{a}, \beta = \frac{n\pi}{b} \quad (33)$$

where U_{mn} , V_{mn} , W_{mn} , θ_{xmn} and θ_{ymn} define the coefficients of the displacement. Additionally, λ denotes the natural frequency. X_m and Y_n functions are given in Table 2 for different BCs.

Table 2*X_m and Y_n functions for the different BCs.*

	BCs		<i>X_m</i> and <i>Y_n</i> functions	
	<i>x</i> = 0, <i>a</i>	<i>y</i> = 0, <i>b</i>	<i>X_m</i>	<i>Y_n</i>
SSSS	<i>X_m</i> (0) = <i>X_m</i> ''(0) = 0	<i>Y_n</i> (0) = <i>Y_n</i> ''(0) = 0	<i>sin</i> (<i>αx</i>)	<i>sin</i> (<i>βy</i>)
	<i>X_m</i> (<i>a</i>) = <i>X_m</i> ''(<i>a</i>) = 0	<i>Y_n</i> (<i>b</i>) = <i>Y_n</i> ''(<i>b</i>) = 0		
SSCC	<i>X_m</i> (0) = <i>X_m</i> ''(0) = 0	<i>Y_n</i> (0) = <i>Y_n</i> ''(0) = 0	<i>sin</i> (<i>αx</i>)	<i>sin</i> ² (<i>βy</i>)
	<i>X_m</i> (<i>a</i>) = <i>X_m</i> '(<i>a</i>) = 0	<i>Y_n</i> (<i>b</i>) = <i>Y_n</i> '(<i>b</i>) = 0		
CCCC	<i>X_m</i> (0) = <i>X_m</i> ''(0) = 0	<i>Y_n</i> (0) = <i>Y_n</i> ''(0) = 0	<i>sin</i> ² (<i>αx</i>)	<i>sin</i> ² (<i>βy</i>)
	<i>X_m</i> (<i>a</i>) = <i>X_m</i> '(<i>a</i>) = 0	<i>Y_n</i> (<i>b</i>) = <i>Y_n</i> '(<i>b</i>) = 0		
CSCS	<i>X_m</i> (0) = <i>X_m</i> '(0) = 0	<i>Y_n</i> (0) = <i>Y_n</i> '(0) = 0	<i>sin</i> (<i>αx</i>)[<i>cos</i> (<i>αx</i>) − 1]	<i>sin</i> (<i>βy</i>)[<i>cos</i> (<i>βy</i>) − 1]
	<i>X_m</i> (<i>a</i>) = <i>X_m</i> ''(<i>a</i>) = 0	<i>Y_n</i> (<i>b</i>) = <i>Y_n</i> ''(<i>b</i>) = 0		

The variables can be written as follows:

$$\{\Delta\} = [U_{mn} \quad V_{mn} \quad W_{mn} \quad \theta_{xmn} \quad \theta_{ymn}]^T \quad (34)$$

The governing equations for the sandwich structure are derived as given below:

$$\{[K] - \lambda_{mn}^2[M]\}\{\Delta\} = 0 \quad (35)$$

where $[K]$ and $[M]$ define the stiffness and mass matrix, respectively.

NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

In this work, the free vibration analysis of the sandwich plate is carried out numerically in ANSYS FEA software and analytically in MATLAB software using Navier method. The effects of temperature rise, power law index and geometrical parameters of the auxetic structure on the free vibration of the plate are investigated and verified by two different methods. The simulations are based on the following fundamental variables: $a = b = 0.5$ m, $h = a/10$, $h_a = 0.6h$ and $h_f = 0.2h$ ($h = h_a + 2h_f$). The temperature dependent properties of Si_3N_4 and Ni ceramic-metal matrix are listed in Table 3.

Table 3*Mechanical and thermal constants of Ni and Si₃N₄ (Reddy & Chin, 1998; Touloukian, 1967).*

Material	Properties	<i>P</i> _{−1}	<i>P</i> ₀	<i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂	<i>P</i> ₃
<i>Ni</i>	<i>E</i> (Pa)	0	223.95x10 ⁹	−2.794x10 ^{−4}	3.998x10 ^{−9}	0
	<i>ν</i>	0	0.31	0	0	0
	<i>α</i> (1K ^{−1})	0	9.9209x10 ^{−6}	8.7050x10 ^{−4}	0	0
	<i>κ</i> (W/mK)	0	58.754	−4.614x10 ^{−4}	6.670x10 ^{−7}	−1.523x10 ^{−10}
	<i>ρ</i> (kg/m ³)	0	8908	0	0	0
<i>Si₃N₄</i>	<i>E</i> (Pa)	0	348.43x10 ⁹	−3.070x10 ^{−4}	2.160x10 ^{−7}	−8.946x10 ^{−11}
	<i>ν</i>	0	0.24	0	0	0
	<i>α</i> (1K ^{−1})	0	5.8723x10 ^{−6}	9.095x10 ^{−4}	0	0
	<i>κ</i> (W/mK)	0	13.723	−1.032x10 ^{−3}	5.466x10 ^{−7}	−7.876x10 ^{−11}
	<i>ρ</i> (kg/m ³)	0	2370	0	0	0

Verification of the Proposed Approach

In this section, a validation study is carried out to prove the accuracy of the proposed method. The results of the dimensionless free vibration analysis of the FG plate with Al/Al_2O_3 metal-ceramic matrix are compared with the results of Baferani et al (Hasani Baferani et al., 2011). In the validation study, the values of Modulus of Elasticity, density and Poisson's ratio of Al are considered as $E_m=70$ GPa, $\rho_m=2707$ Kg/m³ and $\nu_m=0.3$ respectively, while the values of Al_2O_3 are considered as $E_c=380$ GPa, $\rho_c=3800$ Kg/m³ and $\nu_c=0.3$. The non-dimensional natural frequency is defined by $\bar{\omega} = \omega h \sqrt{\rho_m/E_m}$. The results of the comparison study for different boundary conditions, power law parameters, and thickness-length ratios are presented in Table 4. As shown in the table, there is a high degree of agreement between the results.

Table 4

Comparison of the dimensionless natural frequency of the FG plate.

BCs	h/a	$n=0.5$		$n=1$		$n=2$	
		Ref.	Present	Ref.	Present	Ref.	Present
SSSS	0.05	0.0249	0.0245	0.0227	0.0222	0.0209	0.0201
	0.1	0.0975	0.0962	0.0891	0.0879	0.0819	0.0802
SFSF	0.05	0.0121	0.0113	0.0109	0.0102	0.0099	0.0088
	0.1	0.0479	0.0479	0.0432	0.0423	0.0393	0.0379
SCSC	0.05	0.0359	0.0356	0.0324	0.0318	0.0295	0.0288
	0.1	0.1366	0.1358	0.1239	0.1231	0.1125	0.1114

Free Vibration Analysis of FG Sandwich Plate

In this subsection, variation of natural frequency (λ) of sandwich FG auxetic core plate with respect to temperature rise (ΔT), power law distribution (n) and auxetic geometrical parameters (Y, Λ and ψ) are investigated in the range of 0-500 K. Analytical and numerical examinations are performed for four distinct power law constants ($n=0, 2, 5$, and 10). While FG surface plates exhibit completely Ni properties at $n=0$, the plate properties approach Si_3N_4 with increasing n . The analyses are carried out by considering the thickness-to-length of the inclined cell rib ratio $\Lambda = 0.1, 0.2$ and 0.3 , length of the horizontal cell rib-to-length of the inclined cell rib ratio $Y = 2$ and inclination angle $\psi = 30^\circ, 45^\circ$ and 60° .

Table 5 presents the variation of the natural frequency of the sandwich plate with respect to ψ and BCs. In the analysis, four different boundary conditions (CCCC, CCCS, CSCS and SSSS) and three different angle values ($\psi = 30^\circ, 45^\circ$ and 60°) are evaluated. The first three natural frequencies of the sandwich plate are obtained by FEA and Navier method and compared. As shown in the table, the first three natural frequencies of the sandwich plate decrease significantly with increasing theta. It is also found that the natural frequency is significantly affected by varying boundary conditions. The highest natural frequency values are obtained with CCCC while the lowest values are obtained with SSSS boundary conditions. In addition, when the values obtained by numerical and analytical methods are compared, it is seen that the results are quite close.

Table 5Variation of the natural frequency λ (Hz) with respect to ψ and BCs.

BCs	ψ	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
		FE	Navier	FE	Navier	FE	Navier
CCCC	30	348.57	350.47	365.24	368.44	383.34	387.44
	45	310.50	312.82	350.17	353.87	365.08	369.38
	60	284.43	288.56	322.12	325.57	335.56	340.55
CCCS	30	337.94	339.24	346.76	349.12	368.22	371.66
	45	297.20	298.66	328.12	330.88	347.35	352.14
	60	264.04	266.37	296.15	300.03	312.71	317.04
CSCS	30	293.64	295.91	317.32	320.21	329.27	333.83
	45	262.35	264.81	301.23	303.66	312.86	317.96
	60	231.06	232.46	268.24	270.80	279.8	284.92
SSSS	30	192.68	195.78	226.80	230.66	256.12	260.78
	45	169.22	172.65	211.40	214.72	228.91	233.35
	60	148.76	149.86	190.34	193.77	208.78	313.45

The variation of the natural frequency λ of the sandwich plate with respect to parameters ΔT , n and BCs is given in Table 6. As shown in the table, increasing ΔT and n have a decreasing effect on the natural frequency of the plate. The reason for these decreases is that the stiffness of the plate decreases with increasing temperature. The other reason is that with increasing power law index, the material properties of the top and bottom plates approach Si_3N_4 . From Table 3, it is seen that Si_3N_4 is more dominant when Si_3N_4 and Ni modulus of elasticity values are compared. When the boundary conditions are compared, it is found that higher natural frequency values are obtained at CCCC boundary conditions and the difference between Navier and FEA results is smaller.

Table 6Variation of the natural frequency λ (Hz) with respect to ΔT , n and BCs.

BCs	n	$\Delta T = 100$		$\Delta T = 200$		$\Delta T = 500$	
		FE	Navier	FE	Navier	FE	Navier
CCCC	0	275.48	276.81	257.05	259.26	217.78	220.38
	2	270.12	272.43	253.12	255.38	211.46	213.67
	5	232.50	235.08	216.33	219.22	183.06	186.34
	10	189.78	192.98	176.77	178.89	142.61	146.28
CSCS	0	230.11	232.45	210.22	211.93	167.23	169.38
	2	226.67	229.71	205.43	207.18	162.07	164.87
	5	188.23	193.02	169.27	172.74	127.62	130.69
	10	150.52	153.32	134.92	138.51	109.82	114.23

Table 7 indicates the variations of the natural frequency of the sandwich plate with respect to parameters BCs and Λ . As demonstrated in table, the natural frequency of the sandwich plate increases significantly with increasing Λ . The reason for this increase is that the stiffness of the core plate increases

with increasing thickness. Increasing ΔT and n have an increasing effect on the effective α coefficient of the sandwich plate. The reason for this increase is attributed to the softening tendency of the plate with rising ΔT and the increase in the Si_3N_4 ratio in the surface plates with increasing n .

Table 7

Variation of the natural frequency λ (Hz) with respect to BCs and Λ .

BCs	Λ	Mode 1		Mode 2		Mode 3	
		FE	Navier	FE	Navier	FE	Navier
CCCC	0.1	310.50	313.98	350.17	353.87	365.08	369.38
	0.2	370.38	374.26	415.44	418.21	408.81	411.22
	0.3	450.12	455.32	498.33	502.54	493.32	496.27

CONCLUSIONS

In this paper, the variation of the natural frequency of sandwich structure with auxetic core plate and ceramic-metal matrix FGM surface plates are investigated with respect to variables such as temperature rise, power law index and geometrical parameters of auxetic core cells. To determine the effective equivalent material characteristics of the sandwich plate, power law equations are employed for FG surface plates. According to the parametric analyses, some important outcomes are obtained. When the effect of ΔT , n , ψ , Λ and BCs parameters on the natural frequency of the sandwich plate is examined, it is determined that λ decreases with increasing ΔT , ψ and n , whereas it increases with increasing Λ . Furthermore, it has been found that the parameter providing the greatest influence on the natural frequency of the sandwich plate is the ΔT , whereas the parameter with the least impact is ψ . In addition, when the percentage increases and decreases of the λ of the sandwich structure are examined, it is determined that auxetic cell parameters are more dominant than the other parameters. When the effect of different boundary conditions on the natural frequency of the plate is analyzed, it is found that the highest natural frequency values are obtained with CCCC, and the lowest natural frequency values are obtained with SSSS. The thermomechanical characteristics of sandwich plates including a honeycomb core can be improved via selection of materials and structural design, enabling efficient thermal and mechanical management in high-temperature, noise, and corrosion environments. The results are expected to contribute to the gap in the literature on the current research topic.

Ethical Committee Approval

This study did not use human or animal subjects that require ethics committee approval. The research was conducted on publicly available data sets, literature reviews or theoretical analyses. In accordance with ethical rules, academic integrity and scientific ethics were fully complied with at every stage of the research process. Therefore, ethics committee approval was not required.

Author Contributions

Research Design (CRediT 1) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Data Collection (CRediT 2) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Research - Data Analysis - Validation (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Writing of the Article (CRediT 12-13) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Text Revision and Improvement (CRediT 14) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Funding

There is no financial support for the study.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest.

Sustainable Development Goals (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERENCES

- Akhavan Alavi, S. M., & Ghajar, R. (2024). Transient Nonlinear Responses of a Sandwich Plate With Micro-Cellular Auxetic Core Based on Modified Strain Gradient Theory Under Impact Loads. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 26(5), 679–702. <https://doi.org/10.1177/10996362241226981>
- Aktaş, K. G. (2024a). 3D wave dispersion analysis of graphene platelet-reinforced ultra-stiff double functionally graded nanocomposite sandwich plates with metamaterial honeycomb core layer. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 28(3), 1873–1908. <https://doi.org/10.1007/s11043-024-09726-z>
- Aktaş, K. G. (2024b). Three-dimensional thermomechanical wave propagation analysis of sandwich nanoplate with graphene-reinforced foam core and magneto-electro-elastic face layers using nonlocal strain gradient elasticity theory. *Acta Mechanica*, 235(9), 5587–5619. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04001-1>
- Al Mukahal, F. H. H. (2023). Static Response of Nanocomposite Electromagnetic Sandwich Plates with Honeycomb Core via a Quasi 3-D Plate Theory. *Mathematics*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/math11092046>
- Amini, Y., Emdad, H., & Farid, M. (2015). Finite element modeling of functionally graded piezoelectric harvesters. *Composite Structures*, 129, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.011>
- Cong, P. H., Quyet, P. K., & Duc, N. D. (2021). Effects of Lattice Stiffeners and Blast Load on Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Auxetic Honeycomb Plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 7192–7211. <https://doi.org/10.1177/0954406221992797>
- Critchley, R., Corni, I., Wharton, J. A., Walsh, F. C., Wood, R. J. K., & Stokes, K. R. (2013). A Review of the Manufacture, Mechanical Properties and Potential Applications of Auxetic Foams. *Physica Status Solidi (B)*, 250(10), 1963–1982. <https://doi.org/10.1002/pssb.201248550>
- Dağ, T., Güvenç, M. A., & Uyaner, M. (2024). Low Velocity Impact Behavior of Curved Composite Panels Reinforced with Different Types of Stiffeners Used in Air Vehicle. *Journal of Materials and Mechatronics: A*.
- Dong, S., & Hu, H. (2023). Sensors Based on Auxetic Materials and Structures: A Review. *Materials*, 16(9), 3603. <https://doi.org/10.3390/ma16093603>
- Ebrahimi, F., & Barati, M. R. (2016). Electromechanical buckling behavior of smart piezoelectrically actuated higher-order size-dependent graded nanoscale beams in thermal environment. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 7(2), 69–90. <https://doi.org/10.1080/19475411.2016.1191556>
- Esen, I., & Özmen, R. (2022). Free and forced thermomechanical vibration and buckling responses of functionally graded magneto-electro-elastic porous nanoplates. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 0(0), 1–38. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2152045>
- Essassi, K., Rebière, J.-L., Mahi, A. El, Souf, M. A. Ben, Bouguecha, A., & Haddar, M. (2019). Experimental and Numerical Analysis of the Dynamic Behavior of a Bio-Based Sandwich With an Auxetic Core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(3), 1058–1077. <https://doi.org/10.1177/1099636219851547>

- Fan, D., Li, M., Qiu, J., Xing, H., Jiang, Z., & Tang, T. (2018). Novel Method for Preparing Auxetic Foam From Closed-Cell Polymer Foam Based on the Steam Penetration and Condensation Process. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 10(26), 22669–22677. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b02332>
- Gatt, R., Mizzi, L., Azzopardi, J. I., Azzopardi, K. M., Attard, D., Casha, A., Briffa, J. E., & Grima, J. N. (2015). Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep08395>
- Hasani Baferani, A., Saidi, A. R., & Ehteshami, H. (2011). Accurate solution for free vibration analysis of functionally graded thick rectangular plates resting on elastic foundation. *Composite Structures*, 93(7), 1842–1853. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.01.020>
- Li, F., & Yuan, W. (2022). Free vibration and sound insulation of functionally graded honeycomb sandwich plates. <https://doi.org/10.1177/10996362211020440>
- Lim, T. (2013a). Stress Wave Transmission and Reflection Through Auxetic Solids. *Smart Materials and Structures*, 22(8), 84002. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/8/084002>
- Lim, T. (2013b). Thermal Stresses in Thin Auxetic Plates. *Journal of Thermal Stresses*, 36(11), 1131–1140. <https://doi.org/10.1080/01495739.2013.818896>
- Lim, T. (2014). Auxetic Plates on Auxetic Foundation. *Advanced Materials Research*, 974, 398–401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.974.398>
- Liu, J., Chen, T., Zhang, Y., Wen, G., Qing, Q., Wang, H., Sedaghati, R., & Xie, Y. M. (2019). On Sound Insulation of Pyramidal Lattice Sandwich Structure. *Composite Structures*, 208, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.013>
- Mahesh, V. (2022). Nonlinear damping of auxetic sandwich plates with functionally graded magneto-electro-elastic facings under multiphysics loads and electromagnetic circuits. *Composite Structures*, 290(March), 115523. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115523>
- Mastali, M., Valente, I., Barros, J. A. O., & Gonçalves, D. (2015). Development of Innovative Hybrid Sandwich Panel Slabs: Experimental Results. *Composite Structures*, 133, 476–498. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.114>
- Natarajan, S., Haboussi, M., & Manickam, G. (2014). Application of higher-order structural theory to bending and free vibration analysis of sandwich plates with CNT reinforced composite facesheets. *Composite Structures*, 113, 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.03.007>
- Nguyen, D. C., & Pham, C. H. (2016). Nonlinear Dynamic Response and Vibration of Sandwich Composite Plates With Negative Poisson's Ratio in Auxetic Honeycombs. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 20(6), 692–717. <https://doi.org/10.1177/1099636216674729>
- Nouraei, M., Haghi, P., & Ebrahimi, F. (2024). Modeling dynamic characteristics of the thermally affected embedded laminated nanocomposite beam containing multi-scale hybrid reinforcement. *Waves in Random and Complex Media*, 34(5), 4122–4151. <https://doi.org/10.1080/17455030.2021.1988758>
- Nouraei, M., & Zamani, V. (2023). Vibration of smart sandwich plate with an auxetic core and dual-FG nanocomposite layers integrated with piezoceramic actuators. 315(February). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117014>
- Reddy, J. N., & Chin, C. D. (1998). Thermomechanical analysis of functionally graded cylinders and

- plates. *Journal of Thermal Stresses*, 21(6), 593–626.
<https://doi.org/10.1080/01495739808956165>
- Shi, J.-X., & Shimoda, M. (2015). Interface Shape Optimization of Designing Functionally Graded Sandwich Structures. *Composite Structures*, 125, 88–95.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.045>
- Sobhy, M. (2013). Buckling and free vibration of exponentially graded sandwich plates resting on elastic foundations under various boundary conditions. *Composite Structures*, 99, 76–87.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.018>
- Stręk, T., Jopek, H., & Nienartowicz, M. (2015). Dynamic Response of Sandwich Panels With Auxetic Cores. *Physica Status Solidi (B)*, 252(7), 1540–1550.
<https://doi.org/10.1002/pssb.201552024>
- Thai, H. T., & Choi, D. H. (2013). A simple first-order shear deformation theory for the bending and free vibration analysis of functionally graded plates. *Composite Structures*, 101, 332–340.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.019>
- Touloukian, Y. S. (1967). *Thermophysical properties of high temperature solid materials*. Macmillan.
- Touloukian YS. (1966). (1966) *Thermophysical properties of high temperature solid materials. Volume 4. Oxides and their solutions and mixtures. Part 1, vol 1*. Macmillan.
- Tran, T. T., Pham, Q. H., Nguyen-Thoi, T., & Tran, T.-V. (2020). Dynamic Analysis of Sandwich Auxetic Honeycomb Plates Subjected to Moving Oscillator Load on Elastic Foundation. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2020/6309130>
- Tran, V. K., Tran, T. T., Phung, M. Van, Pham, Q. H., & Nguyen-Thoi, T. (2020). A Finite Element Formulation and Nonlocal Theory for the Static and Free Vibration Analysis of the Sandwich Functionally Graded Nanoplates Resting on Elastic Foundation. *Journal of Nanomaterials*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8786373>
- Xiong, J., Feng, L., Ghosh, R., Wu, H., Wu, L., Ma, L., & Vaziri, A. (2016). Fabrication and Mechanical Behavior of Carbon Fiber Composite Sandwich Cylindrical Shells With Corrugated Cores. *Composite Structures*, 156, 307–319. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.009>
- Zhang, D. G. (2014). Thermal post-buckling and nonlinear vibration analysis of FGM beams based on physical neutral surface and high order shear deformation theory. *Meccanica*, 49(2), 283–293.
<https://doi.org/10.1007/s11012-013-9793-9>
- Zhang, M., Li, K., Ho, M. M. P., Etemadi, E., & Hu, H. (2024). Low-velocity Impact Response of <sc>3D Carbon Fiber Reinforced Polymer</Sc> Auxetic Lattice Structures. *Polymer Composites*, 45(8), 7191–7204. <https://doi.org/10.1002/pc.28259>
- Zhang, Xiangwen, & Yang, D. (2016). Numerical and Experimental Studies of a Light-Weight Auxetic Cellular Vibration Isolation Base. *Shock and Vibration*, 2016, 1–16.
<https://doi.org/10.1155/2016/4017534>
- Zhang, Xinchun, Ding, H. M., An, L. Q., & Wang, X. L. (2014). Numerical Investigation on Dynamic Crushing Behavior of Auxetic Honeycombs With Various Cell-Wall Angles. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.1155/2014/679678>

CoCrFeNi Bazlı Yüksek Entropili Alaşımlarda Molibden Katkısının Mikroyapı ve Nanosertlik Üzerindeki Rolü

Veysel Murat BOSTANCI¹  Tuğba Selcen ATALAY KALSEN^{2*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 30.11.2024

Kabul Tarihi: 12.12.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Yüksek entropi alaşımları,
Mekanik özellikler,
Nanoindentasyon.

ÖZET

Yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), günümüzde yenilikçi mühendislik malzemeleri arasında öne çıkan bir sınıftır ve birçok endüstriyel alanda artan bir ilgi görmektedir. Havacılık sektöründe, bu alaşımlar hem dayanım hem de hafiflik gereksinimlerini karşılamaları nedeniyle eşsiz bir potansiyele sahiptir. Geleneksel alaşımlara kıyasla daha üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sunan YEA'lar, bu nedenle modern havacılık uygulamaları için umut vaat eden malzemeler olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, CoCrFeNiMo_x (x=0, 0.2, 0.4 % at.) YEA'ları vakumlu ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen YEA'ların, X-Işınları Diffraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), vickers sertlik testi, basma testi ve nanoindentasyon testi ile yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı matris oluşmakta ve Mo ilavesi ile kafes parametresi artmaktadır. Atomikçe %2 Mo ilavesinin bile mikroyapıda önemli değişikliklere sebep olduğu, dendritik yapının oluşmasına yol açtığı mikroyapısal incelemelerle tespit edilmiştir. Mo ilavesinin %4'e çıkarılması ile dendritler arası bölgede Mo-Cr zengin bölgeler oluşmaktadır. Yapıda Mo içeriği %0, %2 ve %4 (% at.) için sertlik değerleri 184 HV, 195 HV, 214 HV olarak elde edilirken, basma testinden elde edilen akma dayanımı ise 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak ölçülmüştür. Nanoindentasyon testleri ile, Cr-Mo zengin bölgelerde yüksek sertlik değerleri (~7.9 GPa) tespit edilmiş, bu durum Mo'nun katı çözelti sertleşmesi ve segregasyon mekanizmalarıyla alaşımı güçlendirdiğini doğrulamıştır. Elde edilen bulgular, CoCrFeNi alaşımına Mo ilavesinin yapıdaki süneklik özelliğinin korunarak katı çözelti sertleşmesi ve minör düzeyde ikincil faz çökelmeleri ile dayanımın artırdığını göstermektedir. Bulgular, YEA'ların mekanik dayanım ve mikroyapısal özelliklerin kritik olduğu havacılık uygulamaları için güçlü adaylar olduğunu ortaya koymaktadır.

The Role of Molybdenum Addition on the Microstructure and Nanohardness of CoCrFeNi-Based High Entropy Alloys

Article Info

Received: 30.11.2024

Accepted: 12.12.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

Satellite data,
Convolutional neural network,
Multilayer perceptron,
Cloud mask,
Cloud detection,
Visible and infrared bands.

ABSTRACT

High entropy alloys (HEAs) have emerged as a prominent class of innovative engineering materials and are attracting increasing interest across various industries. In the aerospace industry, these alloys possess unique potential due to their ability to meet both strength and lightweight requirements. Offering superior mechanical, thermal, and chemical properties compared to conventional alloys, HEAs are therefore considered promising materials for modern aerospace applications. In this study, CoCrFeNiMo_x (x=0, 0.2, 0.4 at. %) HEA were produced using the vacuum arc melting method. The structural and mechanical properties of the produced HEAs were characterized using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Vickers hardness test, compression test, and nanoindentation test. According to the results, a face centered cubic (FCC) matrix structure forms, and the lattice parameter increases with Mo addition. Microstructural investigations revealed that even the addition of 2 at. % Mo causes significant changes in the microstructure, leading to the formation of a dendritic structure. When Mo addition is increased to 4 at. %, Mo-Cr-rich regions were observed in the interdendritic regions. The hardness values were determined as 184 HV, 195 HV, and 214 HV for Mo contents of 0, 2, and 4 at. %, respectively, while the yield strengths obtained from compression tests were measured as 206 MPa, 254 MPa, and 287 MPa. Nanoindentation tests identified high hardness values (~7.9 GPa) in Cr-Mo rich regions, confirming that Mo enhances the strength of alloy through solid solution hardening and segregation mechanisms. The findings demonstrate that the addition of Mo to CoCrFeNi alloy increases strength while maintaining the ductility of the structure through solid solution strengthening and minor secondary phase precipitations. These results highlight that HEAs are strong candidates for aerospace applications, where mechanical strength and microstructural properties are critically important.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Bostancı, V. M., & Atalay Kalsen, T. S. (2024). CoCrFeNi bazlı yüksek entropili alaşımlarda molibden katkısının mikroyapı ve nanosertlik üzerindeki rolü. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 175-187. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.7>

*Sorumlu Yazar: Tuğba Selcen ATALAY KALSEN, tsatalay@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Atomik konsantrasyonları %5 ile %35 arasında değişen beş veya daha fazla temel element içeren alaşımlar, yüksek entropili alaşımlar (YEA) olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde dört element ve üzeri elemente sahip alaşımlar da YEA olarak isimlendirilebilmektedir (Zhou vd., 2019). YEA'lar, yüksek karışım entropisi, kafes bozulmaları, yavaş atomik difüzyon ve kokteyl etkisi gibi özellikler sayesinde geleneksel alaşımlara kıyasla üstün mekanik ve kimyasal özellikler sergilerler. Çok bileşenli yapıları sayesinde yüksek entropiye sahip ve genellikle tek fazlı katı çözeltiler oluşturabilen YEA'lar, farklı kombinasyon ve kompozisyonlarda üretilebilme esnekliği ile mühendislik, havacılık ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Miracle & Senkov, 2017; Ranganathan, 2003; Yeh, 2013).

Araştırmalar, YEA'ların farklı elementel bileşimlerinin, belirli uygulamalara yönelik modifiye edilebileceğini ve bu sayede aşınma direnci ve yorulma dayanımı gibi özelliklerin optimize edilebileceğini göstermektedir (Yalcın & Talaş, 2024). Bu özellikler, YEA'ları geleceğin havacılık malzemeleri için umut verici adaylar haline getirmekte, daha hafif ve dayanıklı uçak yapıları ve bileşenlerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Tsai & Yeh, 2014; Wang & Zhang, 2023). Örneğin, AlCoCrFeNi YEA'sı, kriyojenik koşullarda bile yüksek çekme mukavemeti ve süneklik sergilemektedir (Geantă & Voiculescu, 2020; Qiao vd., 2011). Aynı zamanda, YEA'lar uçak motor malzemelerinde, entegre uçak bileşenlerinde ve birçok diğer parçaya alternatif olarak büyük potansiyel taşımaktadır. YEA'ların, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyileştirilmiş soğuk şekillendirilebilirlik, yüksek çevrimli yorulma dayanıklılığı, iyi süneklik ve mükemmel kırılma tokluğu gibi özellikleri, geniş bir uçak uygulaması yelpazesi için alternatif sunmaktadır (Livatyalı & Caudill, 2023; Uyaner vd., 2024). Son zamanlarda, YEA'ların türbin kanatları, kanatlar, statorlar, rotorlar, yanma odaları, egzoz nozülleri ve gaz türbini kasaları gibi uçak motoru bileşenlerinde kullanım için umut verici olduğu belirtilmektedir (Sonar vd., 2024). Aynı zamanda kara-hava mobilite mekanizmasının önemli bir parçası olan iniş takımlarında (Boeing 777) kullanım potansiyeli taşımaktadır (Afolabi vd., 2020; Kocamer vd., 2022; Krishna vd., 2024). Uçak motor malzemeleri arasında çelikler, titanyum alaşımları, nikel bazlı süper alaşımlar, alüminyum alaşımlarının yanında, son dönemde YEA'lardan sıklıkla bahsedilmektedir (Afolabi vd., 2020; Krishna vd., 2024; Sonar vd., 2024).

Kriyojenik ortamlarda yüksek mukavemeti, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci ile dikkat çeken YEA'lardan biri de Cantor alaşımı olarak bilinen CoCrMnFeNi alaşımıdır (Cantor, 2021). Mn içermeyen Cantor alaşımının (CoCrFeNi) ise daha yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip olması bazı araştırmacılarca belirtilmiş ve umut verici olduğu vurgulanmıştır (Salishchev vd., 2014; Tang & Li, 2021). Buna ek olarak, Ta, W, Nb ve Mo gibi alaşım elementlerinin eklenmesi ile CoCrFeNi YEA'sına ait mekanik ve yapısal özellikler iyileştirilebilmektedir (Jiang vd., 2018; Liu vd., 2015; Niu vd., 2019; Shun vd., 2012; Yang & Zhong, 2021). Özellikle yüksek erime noktası, mukavemeti, aşınma ve korozyon direnci ile bilinen molibdenin (Mo), CoCrFeNi YEA'sının basma ve akma dayancını arttırdığına dair literatürde çalışmalar mevcuttur (Shun vd., 2012). Örneğin, Dai vd. (2020) CoCrFeNi yüksek entropili alaşımlarında Mo içeriğinin mikroyapı ve korozyon direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Düşük Mo içeriği (FeCoCrNiMo_{0,1}), pasif filmde Cr₂O₃/Cr(OH)₃ oluşturarak korozyon direncini artırmıştır. Ancak, yüksek Mo içeriği (CoCrFeNiMo_{0,6}), çökeltiler nedeniyle Cr ve Mo zengin bölgelerde korozyona neden olmuştur (Dai vd., 2020). Zhang vd. (2018), CoCrFeNiMo Fe_{24,1}Co_{24,1}Cr_{24,1}Ni_{24,1}Mo_{3,6} (at. %) YEA'sını toz metalurjisi yöntemiyle üreterek elmas kesim takım uygulamaları için değerlendirmiştir. YMK kristal yapısına sahip alaşımların sertlik ile aşınma direnci, ticari metal matrislerden 2-4 kat daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışma aynı zamanda bu alaşımların elmas kesici takımların performansını artırabilecek yeni nesil malzemeler için umut vaat ettiğini göstermektedir (M. Zhang vd., 2018). Liu vd. (2016) CoCrFeNi YEA'sına Mo eklenmesinin, sert intermetalik fazların çökmesi yoluyla alaşımın mukavemetini artırdığını göstermiştir. Mo_{0,3} alaşımı,

1,2 GPa çekme mukavemeti ve %19 uzama ile yüksek mukavemet ve iyi süneklik özellikleri sergilemiştir. Sert σ ve μ fazları, matris içinde homojen şekilde dağılarak alaşımı güçlendirmiş ancak kırılma mekanizması (Liu vd., 2016). Li vd. (2018), toz metalurjisiyle üretilen CoCrFeNiMo_{0,2} yüksek entropili alaşımın kırılma mekanizmalarını in-situ SEM kullanarak detaylı bir şekilde incelemiştir. Alaşım, 781MPa çekme mukavemeti ve %55,6 uzama kapasitesiyle dikkat çekmiş, yüksek süneklik ve dayanım özellikleri sayesinde çatlak ilerlemesine karşı üstün direnç göstermiştir. Aynı zamanda bu çalışma, mikro boşlukların oluşumu, büyümesi ve birleşimiyle karakterize edilen sünek kırılma mekanizmasının, YMK matrisin deformasyon kabiliyetiyle desteklendiğini ortaya koymuştur (Li vd., 2018).

Bu çalışmada, CoCrFeNiMo_x (x=0, 2, 4 % at.) YEA'sına minör alaşım elementi olarak Mo eklenerek, mekanik ve yapısal özelliklere etkisi incelenmiştir. Farklı oranlardaki Mo içeriğine sahip YEA'ların mekanik özellikleri sertlik ve basma testleri ile tespit edilirken, Mo'nun mikroyapıda oluşturduğu değişiklikler ve bu değişikliklerle ilişkili mikromekanik özellikler yüksek hızda gerçekleştirilen nanoindentasyon haritaları ile ortaya koyulmuştur.

YÖNTEM

Çalışma kapsamında, temel alaşım olarak CoCrFeNi, ve bu alaşıma sırasıyla %2 ve %4 Mo eklenmesi ile (CoCrFeNi)₉₈Mo₂ ve CoCrFeNi₉₆Mo₄ (% at.) YEA'ları argon atmosferi altında vakum ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Numuneler sırası ile Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 olarak kodlanmış ve nominal bileşimleri

Tablo 1'de verilmiştir. Her bir bileşim için, %99,9'dan yüksek saflığa sahip Co, Cr, Fe, Ni ve Mo element parçaları hassas bir şekilde tartılarak toplam 2,2 gramlık metal karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, bakır haznelere sahip vakum ark eritme cihazında (Optosense, Türkiye) 140 amper (A) ile eritilerek homojen bir karışım elde edilmesi amacıyla en az dört kez çevrilmiştir. Elde edilen homojen alaşımlar, su soğutmalı silindirik 3 mm çapa sahip bakır kalıba emişli döküm yöntemi ile dökülmüştür.

Tablo 1

YEA'ların Nominal Kompozisyonları

YEA	Kompozisyon (% at.)				
	Co	Cr	Fe	Ni	Mo
Mo-0	25	25	25	25	-
Mo-2	24,5	24,5	24,5	24,5	2
Mo-4	24	24	24	24	4

Dökülen YEA'ların faz analizi, X-ışını difraktometresi (XRD, PANalytical EMPYREAN) ile Cu-K α radyasyonu kullanılarak, 10-100 derece aralığında, 0.01 derecelik adımlarla ve dakikada 1° tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Polyester bazlı reçine içerisine yerleştirilen YEA'lar geleneksel metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi için kral suyu (3HCl:1HNO₃) hazırlanmış, 10-15s tutularak gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış ve dağlanmış YEA'lara ait mikroyapısal analizler, taramalı elektron mikroskobu (SEM, HITACHI SU1510) ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS, Oxford Instruments X-act) yardımıyla 20kV hızlandırma voltajı kullanılarak yapılmıştır.

Alaşımlara ait mikromekanik özellikler nanoindentasyon cihazı ile entegre iNano® sistemi (KLA Instruments, Milpitas, CA, ABD) kullanılarak tespit edilmiştir. Birbirine yakın izlerin deformasyon alanının belirlenmesi amacıyla numune yüzeyinde farklı kuvvetlerde (5mN, 10mN) ölçüm yapılmıştır. Ön ölçümler neticesinde 5mN yük kullanılarak, her bir ölçüm arasında 3 μ m boşluk olacak şekilde 45x45 μ m alan taranmıştır. Toplamda 225 noktadan ölçüm alınan alaşımlardan sertlik haritaları elde

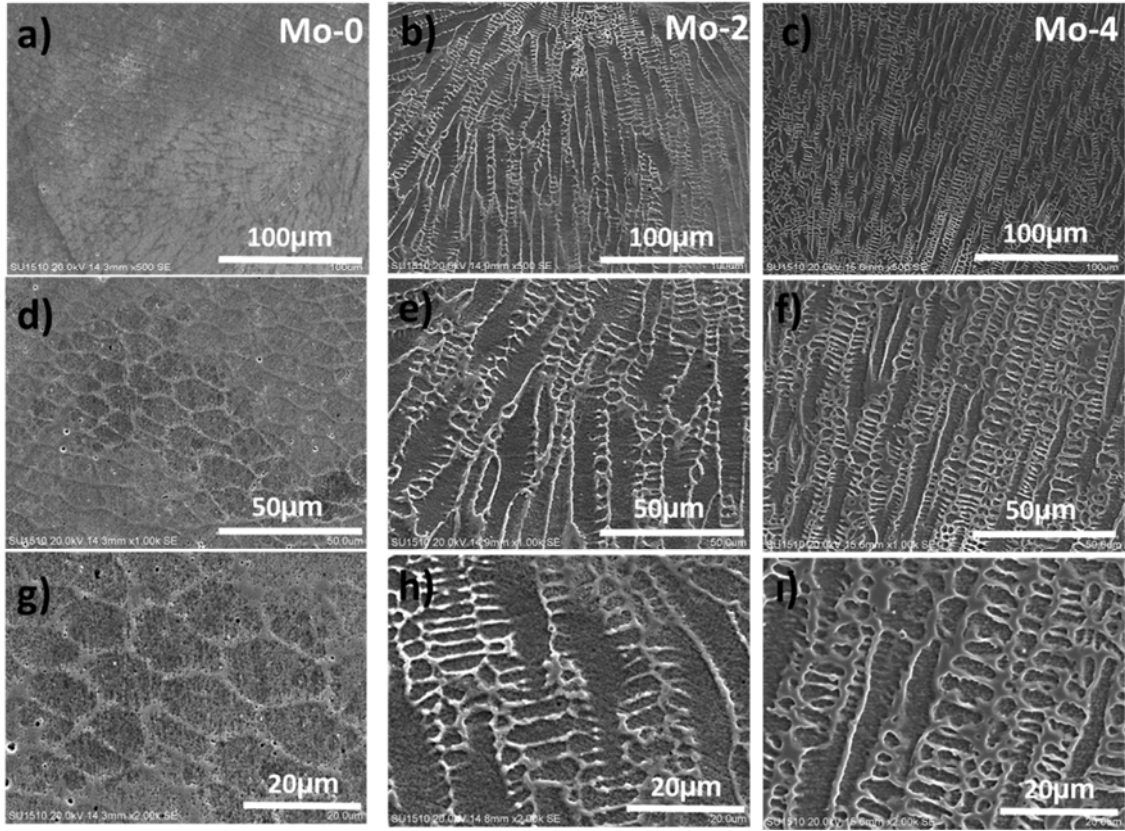
edilerek, izlere denk gelen bölgelerin kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Üretilen YEA'ların sertlik değerleri, 0,1 kgf yük ile Vickers mikrosertlik testi (Emcotest, Durascan G5) ile en az 3 noktadan ölçüm alınacak şekilde elde edilmiştir. YEA'lara ait makro mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla basma testi (Shimadzu AGS-X), sabit gerinim hızında (10^{-4} s^{-1}) ASTM E9-09 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı bileşimlere sahip YEA'ların akma dayanımları, test sonrasında elde edilen %0,2'lik kayma noktası değerleri temel alınarak belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

YEA'larda Mo içeriğindeki artışın mikroyapı üzerinde etkisini incelemek amacıyla dağlanmış numuneler elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 2'de Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait farklı büyütmelerde (500x, 1000x, 2000x) mikroyapıları verilmiştir. Şekil 2'den görüleceği üzere Mo ilavesiz CoCrFeNi alaşımında (Mo-0) homojen bir yapı gözlemlenirken, sırası ile %2 ve %4 (% at.) Mo ilavesi ile dendritik yapı oluşmuştur. Atomikçe %4 Mo ilavesi ile dendritler arası bölgelerin kalınlaştığı ve segregasyon benzeri bir ayrışmanın belirginleştiği tespit edilmiştir. Dendritler ve dendritler arasındaki bölgede elementel dağılımın saptanması amacıyla EDS çizgi analizi yapılmış ve analiz sonucu Şekil 2'te verilmiştir. Şekil 2'ten görüleceği üzere açık kontrasta sahip dendritler arası bölgede belirginleşen segregasyonların, Cr-Mo zengin bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Cr-Mo konsantrasyon farklılığı Şekil 2'de bulunan Mo-4 YEA'sında açıkça görülmektedir. Dendritik (D) ve dendritler arası (DA) bölgelerde kimyasal kompozisyonun belirlenmesi amacıyla Şekil 2 üzerinde bulunan D ve DA bölgelerinden EDS spektrum alınmış olup Tablo 2'te verilmiştir. Mo'nun nispeten yüksek atomik çapı, Mo difüzyonunu yavaşlatmış ve bu durum, katılaşma sırasında sıvı bölgede Mo bakımından zengin segregasyonların oluşmasına yol açmış olduğu görülmektedir. Tablo 2'ten görüleceği üzere, Mo-4 YEA'sına ait dendrit bölgelerinde atomikçe %23,86 Cr ve %3,75 Mo elde edilirken, dendritler arası bölgede Cr ve Mo oranları sırası ile %26,09 ve %6,76 olarak elde edilmiştir. Bu durum, katılaşma sırasında Cr-Mo zengin fazların yapıdan ayrıştığı ve belli bölgelerde segrege olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir. Örneğini, Shun vd., CoCrFeNiMox ($x=0, 0,3, 0,5, \text{ ve } 0,85$ molar) inceledikleri çalışmada artan Mo içeriği ile Cr-Mo zengin σ fazları oluştuğunu ve YMK matriksine yerleştiğini belirtmektedir (Shun vd., 2012). Literatürde Dai vd, FeCoCrNiMox ($x = 0, 0.1, 0.3, 0.6$ molar) YEA'larında Mo içermeyen ve Mo0.1 içeren YEA'da tek faz elde ettiklerini ancak Mo içermeyen malzemede daha homojen bir mikroyapı elde edildiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Mo içeriğinin artması ile dendritler arası bölgelerde Mo-Cr'ca zengin segregasyonların oluştuğunu ve ikincil fazların çökmesine sebep olduğunu bildirmişlerdir (Dai vd., 2020). Bu çalışmada aynı zamanda artan Mo oranı ile alaşım içerisinde oluşan çökeltilerin hacim fraksiyonunun arttığı da belirtilmiştir. Şekil 1'de verilmiş olan Mo-2 ve Mo-4 YEA'lara ait mikroyapılarda artan Mo içeriği ile birlikte bu segregasyonun daha belirgin hale geldiği açıkça görülmektedir. Bu çalışmanın kapsamında minör Mo alaşımlama %2 ve %4 oranında (% at.) Mo alaşımlaması söz konusudur. Bu sebeple ikincil faz çökelmeleri XRD paternlerinde tespit edilememiş (Polat vd., 2022), bölgelerden alınmış EDS spektrum ve çizgi analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, CoCrFeNi YEA'sına eklenen Mo içeriğinin önemli olduğu, az miktarda Mo eklenmesinin bile yapıda önemli değişikliklere sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

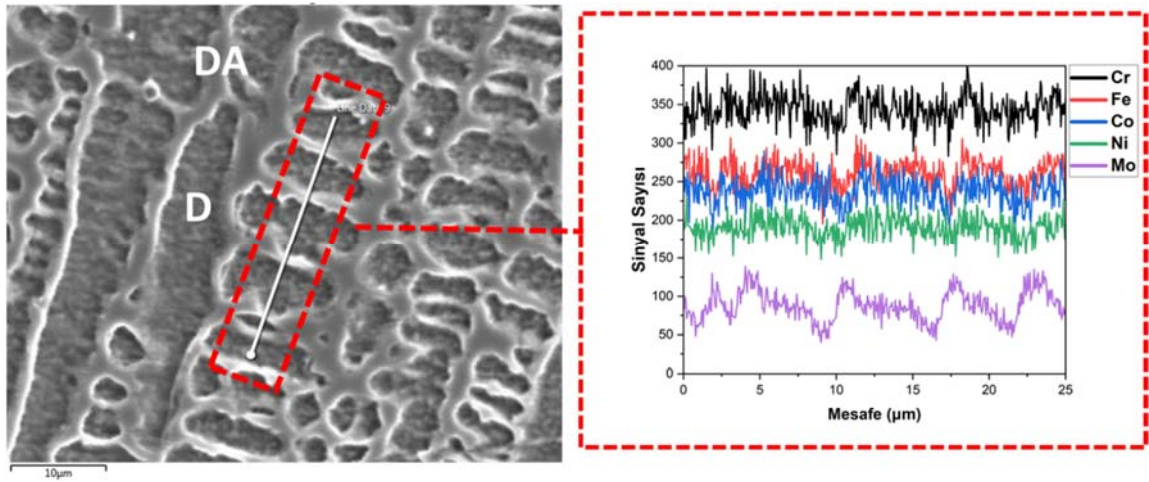
Şekil 1

Numunelere ait mikroyapı görüntüleri a)Mo-0 b)Mo-2 c)Mo-4 (500x), d)Mo-0 e)Mo-2 f)Mo-4 (1000x) g)Mo-0 h)Mo-2 ı)Mo-4 (2000x)



Şekil 2

Mo-4 YEA'sına ait EDS çizgi analizi

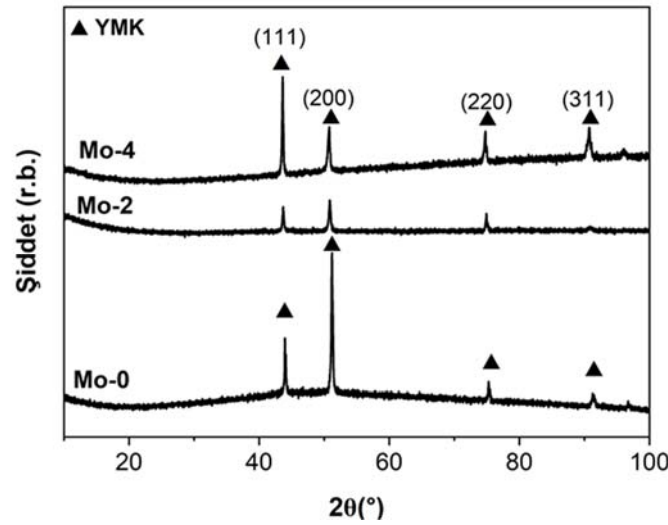


Tablo 2*Mo-4 numunesine ait dendrit ve dendritler arası bölgeden alınan EDS spektrumları*

Bölge	% Atomik				
	Cr	Fe	Co	Ni	Mo
D	23,86	24,00	25,10	23,78	3,75
DA	26,09	22,38	23,05	21,72	6,76

*D:Dendrit DA:Dendritlerarası

Tablo 1'de belirtilen nominal bileşimlere sahip Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 alaşımlarının XRD desenleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'e göre Mo eklenmemiş temel alaşımda (%0 Mo) ve %2 ve %4 Mo (% at.) eklenen alaşımların tümünde YMK fazına ait desen gözlemlenmiştir. Ancak, Mo ilavesiyle birlikte kırınım piklerinin konumları, düzenli bir şekilde sola kaymıştır. Düzlemler ve kırınım açıları dikkate alınarak hesaplanan kafes parametreleri Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 alaşımları için sırası ile 3,567 Å, 3,584 Å ve 3,589 Å olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Mo içeriği arttıkça temel alaşımda bulunan YMK yapıya ait kafes parametresi artmakta ve Mo ile katı çözelti oluşturmaktadır. Ayrıca Mo elementi sahip olduğu nispeten büyük atomik çap ile kafeste genişlemeye ve dolayısı ile kafes parametresinin artmasına sebep olmaktadır. Benzer şekilde Liu vd. artan Mo içeriğinin CoCrFeNiMo_x YEA'sında YMK matris içindeki çözünmesi ile kafes parametresinin artışına ve kafes gerinimi oluşmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir (Liu vd., 2016).

Şekil 3*Numunelere ait XRD Desenleri*

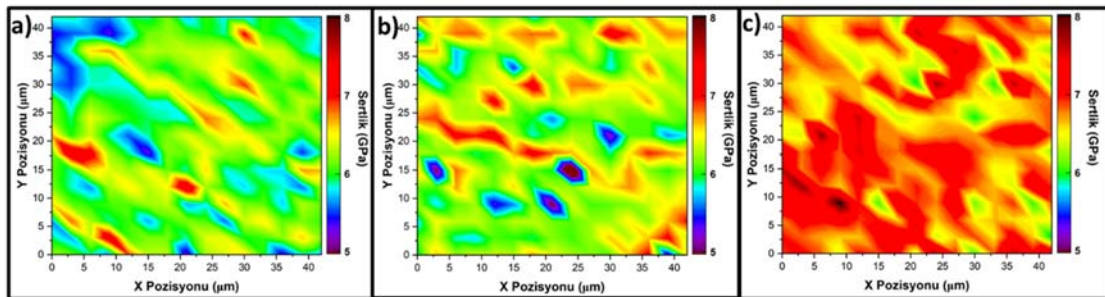
YEA'larda oluşan fazların ve yapısal faktörlerin belirlenmesinde karışım entalpisi ($\Delta H_{krş}$), değerlik elektron konsantrasyonu (DEK), atomik boyut farkı (δ), karışım entropisi $\Delta S_{krş}$ gibi termodinamik değerler önem arz etmektedir. Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 YEA'larına ait δ sırasıyla %0,3, %1,33 ve %1,84, $\Delta H_{krş}$ -3,75 kJ/mol, -3,88 kJ/mol ve -3,99 kJ/mol ve DEK değerleri ise sırasıyla 8,25, 8,21 ve 8,16 olarak hesaplanmıştır. Guo vd. (2011) DEK'in YEA'lardaki YMK fazının yüksek ($DEK \geq 8$), HMK fazının ise daha düşük DEK değerlerinde ($< 6,87$) kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum Şekil 3'te tespit edilmiş olan YMK fazını açıklamaktadır. Buna ek olarak, Yang vd. (2012), atomik boyut farkının (δ) YEA'larda tek faz kararlılığı ile ilişkili olduğu, katı çözelti oluşumu için $\delta < 6,6$ olması gerektiği belirtilmiştir. Benzer şekilde intermetalik oluşumunun engellenmesi ve YEA'larda katı çözelti oluşumu ve faz kararlılığının artması için karışım entalpisinin

$-20 \leq \Delta H_{krş} \leq 5$ kJ/mol değerleri arasında olması gerektiği literatürde belirtilmiştir (Kumar vd., 2023; Y. Zhang vd., 2008). Sonuç olarak, CoCrFeNi temel alaşımına (Mo-0) atomikçe %2 ve %4 Mo eklenmesi ile YMK yapılı katı çözeltili ve artan Mo içeriği ile kafes çarpımları oluşmaktadır.

Yapıda bulunan fazların ve elementel dağılımının mikro boyutta mekanik analizleri için nanoindentasyon testi kullanılmıştır. Mo içeriğine bağlı olarak nanoindentasyon sertlik haritaları çıkarılmış ve Şekil 4'te sunulmuştur. Öncelikle Mo içeriği arttıkça yapıya ait sertlik haritalarında yüksek nanoindentasyon sertlik değerlerini temsil eden kırmızı rengin arttığı görülmektedir. Mo-0'da ortalama nanoindentasyon sertliği 6 GPa iken, Mo-2'de ortalama 6,7 GPa değerlerine ulaşmıştır. %4 Mo ilave edilmiş Mo-4'te ise nanoindentasyon sertliği 7,5 GPa seviyelerine ulaşmıştır. Bu değerler analiz yapılan mikron boyuttaki bölgelerden alınmıştır. Mo miktarı arttıkça alaşımda bulunan fazlara ait sertlik değerleri değişkenlik göstermektedir. Özellikle Mo-4 YEA'sında dikkati çeken yaklaşık 7,9 GPa nano sertliğe sahip fazların Mo-Cr zengin kompozisyona sahip olduğu EDS spektrum analizleri ile tespit edilmiştir. Bölgeden alınan EDS spektrumunda Cr, Fe, Co, Ni ve Mo için sırası ile %25,53, %22,51, %23,33, %22,56, %6,07 (% at.) olarak elde edilmiştir. Mo-4 ve Mo-0 kıyaslandığında ise Mo eklenmesi, YMK yapıdaki matris fazının sertliğini de arttırmaktadır. Bu sonuç, daha önce belirtilmiş olan Mo alaşımlama ile YMK yapıdaki katı çözeltili sertleşmesini desteklemektedir (Şekil 3). YMK kafes yapısına nispeten daha büyük atomik çapta olan Mo elementinin katılması, kafes çarpılmasına yol açarak deformasyona karşı direnç oluşturmuştur. Sonuç olarak, Mo eklenmesi ile makro sertlik ve dayanım artışının temelinde katı çözeltili sertleşmesi ve Mo ve Cr elementlerinin bölgesel zenginleşmesi neticesinde oluşan segregasyonlar olmak üzere iki mekanizmaya dayandığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde Zhang vd. (2022), CoCrNi alaşımına Ta etkisini incelediği çalışmada nanoindentasyon haritalama ile yapıdaki sertlik haritasını incelemişlerdir. YEA'ya ait sertleşme mekanizmasının katı çözeltili oluşumu ve ikincil faz çökelmelerine dayanmakta olduğunu tespit etmişlerdir. CoCrNiMo_x (x=0,2, 0,4, 0,4, 0,8 % at.) alaşımında mikroyapı, bileşim ve mekanik özellikler arasındaki ilişki, nanoindentasyon ile ortaya koyulan bir başka çalışma ise Tong vd. (2021) tarafından bildirilmiştir. Tong vd. (2021), YMK matriste oluşan ve matrisin iki katı sertliğine sahip Laves fazları oluştuğunu ve artan Mo içeriğinin YMK matrisinde katı çözeltili sertleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, Mo içeriğinin artışının sadece katı çözeltili sertleşmesi yoluyla YMK matris fazının mekanik özelliklerini arttırdığını değil aynı zamanda Mo-Cr zengin segregasyonlar yoluyla yapının mukavemetinin artmasının sağlandığı ortaya konulmuştur. Nanoindentasyon haritaları, Mo eklenmesinin YEA'ların yerel mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini mikroyapısal düzeyde detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanımıştır.

Şekil 4

YEA'ların Nanoindentasyon sertlik haritaları a)Mo-0, b)Mo-2, c)Mo-4

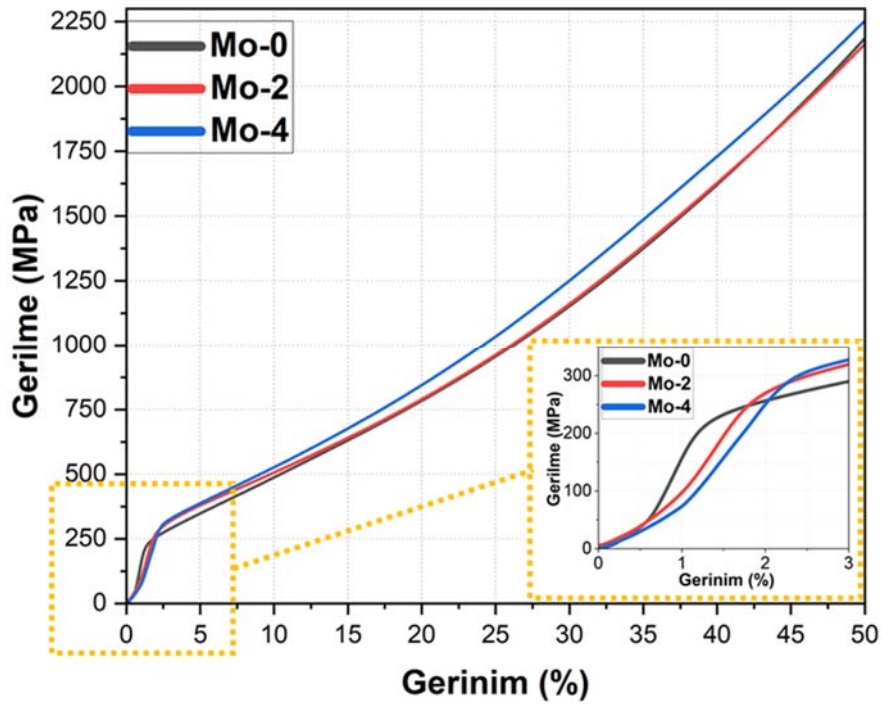


Mo içeriğinin YEA'larda makro mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla sertlik ve basma testi uygulanmıştır. Mo-0, Mo-2, Mo-4 numunelerine ait sertlik değerleri sırası ile 184 ± 4 HV, 195 ± 1 HV, 214 ± 3 HV olarak elde edilmiştir. Artan Mo içeriği ile birlikte YEA'lara ait sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. YEA'nın sertliğinin yükselmesi, Mo artışı ile YEA'daki kafes genişlemesi sonucunda oluşan kafes çarpımları (Şekil 3) ve Mo-Cr zengin bölgelerin oluşumu ile

mikroyapıda meydana gelen değişimler (Şekil 1 ve Şekil 2) ile ilişkili olduğu söylenebilmektedir. Mo içeriğinin akma dayancı, uzama gibi karakteristik mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla basma testi uygulanmıştır. Şekil 5'te Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait gerilme gerinim diyagramları verilmiştir. Şekil 5'e göre YEA Mo içeriği %0'dan %4'e çıkarıldığında, malzemenin basma dayanımı yükselmiş ve daha yüksek gerilmelerde kalıcı deformasyona uğramıştır. Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 YEA'larının akma dayancı sırası ile 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Bir diğer deyişle, %2 (% at.) Mo ilavesi CoCrFeNi YEA'sının akma dayancını %23 oranında arttırmıştır. %4 Mo ilavesi ile temel alaşımın basma dayancında yaklaşık %39'luk bir artış meydana gelmiştir. Mo ilavesi ile yapıya ait mikroyapı değişimi ve oluşan segregasyonlar, yapıda sadece makro sertlik artışına sebep olmamış, aynı zamanda yapının akma dayanımını da arttırmıştır. Ayrıca, alaşımsız ve minör alaşımlanmış YEA'ların tamamına ait matrisin YMK olması sebebiyle sünek davranış (>%50 uzama) göstermiştir. Literatürde Shun vd. (2012), ve Liu vd. (2016), majör Mo alaşımlama (0,5, 0,85, 1, 1,5 molar) ile CrCoFeNi YEA'sında oluşan σ ve μ fazları sebebiyle sünekliğinin önemli derecede düştüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışmada yapılan minör Mo ilavesi ile mekanik özelliklerinin değişimi ile uyumlu olarak Shun vd. (2012), artan Mo içeriği ile birlikte oluşan ikincil fazlar ve katı çözelti sertleşmesi sebebiyle YEA'ya ait makro sertlik değerlerinin ve basma dayanımının arttığını belirtmiştir.

Şekil 5

Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait gerilme gerinim diyagramları



SONUÇ

Bu çalışmada, CoCrFeNiMo_x (x=0, 0,2, 0,4 % at.) yüksek entropi alaşımları vakumlu ark ergitme yöntemi ile üretilmiş mikroyapısal ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, mikroyapı ve mekanik özellik ilişkisi yüksek verimli nanoindentasyon haritaları ile ortaya koyulmuş, sertleşme mekanizmaları belirlenmiştir. Yapısal analizler, mikroyapı görüntülemeleri, makro sertlik ve basma testleri, nanoindentasyon ölçümleri neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mo alaşımlama neticesinde CoCrFeNi YEA'sı dendritik katılaşma göstermiş, dendritler arası bölgelerde Mo-Cr zengin bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Mo içeriğinin %2'den %4'e artırılması ile segregasyon bölgeleri alansal olarak artmaktadır.

- Üretilen YEA’larda YMK kafes yapısı oluşmuş ancak Mo ilavesi ile kafes parametreleri artmıştır. %0 Mo ve %4 Mo içeren YEA için sırası ile kafes parametresi 3.567 Å ve 3.589 Å olarak elde edilmiştir.
- Nanoindentasyon sertlik haritaları, Cr-Mo zengin bölgelerde lokal sertlik artışını doğrulamıştır. Mo-0 alaşımında ortalama 6 GPa olan nanoindentasyon sertliği, Mo-4 alaşımında 7,5 GPa değerine ulaşmıştır. Lokal olarak en yüksek sertlik değerleri 7,9 GPa olarak %4 (% at.) Mo içeriğine sahip YEA’da ölçülmüştür.
- Mo içeriğinin artması ile alaşıma ait makro sertlik değerleri 184 HV’dan 214 HV’ye artmıştır. Yapıdaki sertlik artış, Mo alaşımlamaya bağlı mikroyapısal modifikasyonlarla ve kafes bozulmaları ile ilişkilendirilmiştir.
- Mo ilavesi, YMK matrisin akma dayanımını artırmış, %0, %2 ve %4 (% at.) Mo içeren YEA için sırası ile 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Bu artış ile, akma dayanımında %39’a varan bir iyileşme sağlarken alaşımların yüksek süneklik özellikleri korunmuştur.
- Yapıdaki makro sertlik artışı ve akma dayanımındaki artış, Mo ilavesiyle meydana gelen katı çözelti sertleşmesi ve Cr-Mo segregasyonları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, CoCrFeNi bazlı YMK yapıya sahip yüksek entropili alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için minör Mo alaşımlamanın etkili bir yöntem olduğunu ve bu alaşımların havacılık gibi dayanım ve mikroyapı kararlılığının kritik olduğu alanlarda umut vadeden malzemeler olduğunu göstermektedir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır.

Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür.

Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%40) – Yazar 2 (%60)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%40) – Yazar 2 (%60)

Finansman

Bu çalışmada herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmada bir çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor.

REFERANSLAR

- Afolabi, A. E., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. M. (2020). High entropy alloys: advance material for landing gear aerospace applications. *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, 1–27.
- Cantor, B. (2021). Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 120, 100754.
- Livatyalı, M. S., & Caudill, J. R. (2023). Solid-state vs. fusion-based metal additive manufacturing technologies. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 2(2), 128-138.
- Dai, C., Zhao, T., Du, C., Liu, Z., & Zhang, D. (2020). Effect of molybdenum content on the microstructure and corrosion behavior of FeCoCrNiMox high-entropy alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 46, 64–73.
- Geantă, V., & Voiculescu, I. (2020). *Characterization and Testing of High-Entropy Alloys From AlCrFeCoNi System for Military Applications*.
- Jiang, H., Han, K., Qiao, D., Lu, Y., Cao, Z., & Li, T. (2018). Effects of Ta Addition on the Microstructures and Mechanical Properties of CoCrFeNi High Entropy Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 43–48.
- Kocamer, A., Uzun, M., & Çoban, S. (2022). Static Analysis and Design of Fixed-Wing Tactical Unmanned Aerial Vehicle (TUAV) Retractable Main Landing Gear. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 1(2), 125-131.
- Krishna, S. A., Noble, N., Radhika, N., & Saleh, B. (2024). A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects. *Journal of Manufacturing Processes*, 109, 583–606.
- Kumar, A., Chandrakar, R., Dubey, V., & Michalska-Domańska, M. (2023). *High-Entropy Alloys: Processing, Alloying Element, Microstructure, and Properties*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Li, W. P., Wang, X. G., Liu, B., Fang, Q. H., & Jiang, C. (2018). Fracture mechanisms of a Mo alloyed CoCrFeNi high entropy alloy: In-situ SEM investigation. *Materials Science and Engineering: A*, 723, 79–88.
- Liu, W. H., He, J., Huang, H., Wang, H., Liu, X., & Liu, C. T. (2015). Effects of Nb Additions on the Microstructure and Mechanical Property of CoCrFeNi High-Entropy Alloys. *Intermetallics*, 60, 1–8.
- Liu, W. H., Lu, Z. P., He, J. Y., Luan, J. H., Wang, Z. J., Liu, B., Liu, Y., Chen, M. W., & Liu, C. T. (2016). Ductile CoCrFeNiMox high entropy alloys strengthened by hard intermetallic phases. *Acta Materialia*, 116, 332–342.
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.
- Niu, Z., Xu, J., Wang, T., Wang, N., Han, Z., & Wang, Y. (2019). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of CoCrFeNiW (X = 0, 0.2, 0.5) High Entropy Alloys. *Intermetallics*, 112, 106550.
- Polat, G., Tekin, M., & Kotan, H. (2022). Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 146, 107589.

- Qiao, J. W., Ma, S. G., Huang, E.-W., Chuang, C. P., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2011). Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures. *Materials Science Forum*, 688, 419–425.
- Ranganathan, S. (2003). Alloyed pleasures: Multimetallc cocktails. *Current science*, 85(5), 1404–1406.
- Salishchev, G. A., Tikhonovsky, M. A., Shaysultanov, D. G., Stepanov, N. D., Kuznetsov, A. V, Kolodiy, I. V, Tortika, A. S., & Senkov, O. N. (2014). Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system. *Journal of Alloys and Compounds*, 591, 11–21.
- Shun, T.-T., Chang, L.-Y., & Shiu, M.-H. (2012). Microstructure and Mechanical Properties of Multiprincipal Component CoCrFeNiMox Alloys. *Materials Characterization*, 70, 63–67.
- Sonar, T., Ivanov, M., Trofimov, E., Tingaev, A., & Suleymanova, I. (2024). An overview of microstructure, mechanical properties and processing of high entropy alloys and its future perspectives in aeroengine applications. *Materials Science for Energy Technologies*, 7, 35–60.
- Tang, Y., & Li, D. Y. (2021). Nano-tribological behavior of high-entropy alloys CrMnFeCoNi and CrFeCoNi under different conditions: A molecular dynamics study. *Wear*, 476, 203583.
- Tsai, M.-H., & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2(3), 107–123.
- Uyaner, M., Karadal, K., Merdan, T., & Acar, N. N. (2024). Havacılık Sektöründe Yeşil Kompozitler: NACA 4452 Rib Uygulaması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 272–288.
- Wang, Z., & Zhang, S. (2023). Research and application progress of high-entropy alloys. *Coatings*, 13(11), 1916.
- Yalcın, M. C., & Talaş, Ş. (2024). Investigation on Microstructural and Mechanical Properties of FeNiMnCrCoTi0. 1 High Entropy Alloy with B Addition. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 5(1), 195–213.
- Yang, S., & Zhong, Y. (2021). Ab Initio Modeling of fcc Fe-Co-Cr-Ni High Entropy Alloys with Full Composition Range. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 42(5), 656–672.
- Yeh, J.-W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*, 65, 1759–1771.
- Zhang, M., Zhang, W., Liu, Y., Liu, B., & Wang, J. (2018). FeCoCrNiMo high-entropy alloys prepared by powder metallurgy processing for diamond tool applications. *Powder Metallurgy*, 61(2), 123–130.
- Zhang, Y., Zhou, Y., Lin, J., Chen, G. L., & Liaw, P. K. (2008). Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 10(6), 534–538. <https://doi.org/10.1002/adem.200700240>
- Zhou, N., Jiang, S., Huang, T., Qin, M., Hu, T., & Luo, J. (2019). Single-phase high-entropy intermetallic compounds (HEICs): bridging high-entropy alloys and ceramics. *Science Bulletin*, 64(12), 856–864.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: High entropy alloys (HEAs) possess exceptional mechanical, thermal, and chemical properties for engineering applications. This study explores the effects of Mo additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi HEAs to address its microstructures, macro and micro mechanical properties.

Method: CoCrFeNi-based HEAs with 0, 2, and 4 (at. %) Mo were produced using vacuum arc melting. The structural, microstructural, and mechanical properties were analyzed using XRD, SEM, hardness testing, and nanoindentation mapping.

Findings: Mo additions led to the formation of a dendritic structure and increased lattice parameters in the FCC matrix. Mechanical properties improved, with hardness rising from 184 HV to 214 HV and yield strength increasing from 206 MPa to 287 MPa.

Discussion: The results indicate that Mo improves mechanical performance through solid solution strengthening and the segregation of Mo-Cr rich regions.

Conclusion: It has been concluded that adding a small amount of Mo significantly enhances the mechanical properties of FCC structured CoCrFeNi-based HEAs. These improved alloys show potential for applications where strength and microstructural stability are crucial, such as in the aerospace industry.