




Euler Denklemi Tabanlı Bir HAD Modelinin Rotor Deneyi Sonuçları ile Karşılaştırılması

Ahmet Yasin KARAHANCI¹  Ayşe Nur GÖK^{2*}  Mustafa KAYA³ 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 10.06.2025
Kabul Tarihi: 21.08.2025
Yayın Tarihi: 31.12.2025

Keywords:

HAD,
Euler,
Caradonna-Tung,
Rotor Validasyonu.

ÖZET

Bu çalışmada, bir lisans öğrenci grubu araştırma projesinin iş paketlerinden biri olarak Euler Denklemleri tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözümü doğrulanmıştır. Projenin ana teması eş-eksenli bir dron olup bu dronun rotor pallerinin aerodinamik incelemesi kapsamında mevcut HAD çözücüsünün değerlendirilmesi gerekmiştir. Bu amaç doğrultusunda, dronun rotor pallerinin muhtemel dönme hızına yakın olması sebebiyle literatürde yaygın olarak referans gösterilen Caradonna-Tung rotor deneyinin sonuçları üzerinden doğrulama yapılmıştır. Caradonna-Tung rotor palı dikdörtgen bir geometriye sahip olup profili NACA0012 kanat kesitidir. 1750 RPM dönme hızı ve 8° yunuslama açısı koşulu incelenmiştir. Farklı pal açıklığı konumlarında hesaplanan basınç katsayısı dağılımları ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya göre sayısal sonuçlar ile deneysel veriler yüksek uyum göstermektedir. Çalışmanın bulguları, Euler çözümlerinin tasarımın kavramsal aşamasında düşük maliyetli, hızlı ve güvenilir bir çözüm alternatifi sunduğunu ortaya koymuştur.

Validation of a CFD Model Based on the Euler Equations Against Rotor Test Results

Article Info

Received: 10.06.2025
Accepted: 21.08.2025
Published: 31.12.2025

Keywords:

CFD,
Euler,
Caradonna-Tung,
Rotor Validation.

ABSTRACT

In this study, an Euler Equations based Computational Fluid Dynamics solution was validated as one of the work packages of an undergraduate student group research project. The main theme of the project is a coaxial drone and the aerodynamic investigation of its rotor blades required the evaluation of the existing CFD solver. For this purpose, validation was carried out on the results of the Caradonna-Tung rotor experiment, which is widely referenced in the literature as it is close to the possible rotational speed of the drone's rotor blades. The Caradonna-Tung rotor blade has a rectangular geometry and its profile is the NACA0012 blade section. A rotational speed of 1750 RPM and pitch angle of 8° were investigated. The calculated pressure coefficient distributions at different blade span positions were compared with the experimental data. According to the comparison, numerical results and experimental data show high agreement. The findings of the study show that Euler solutions offer a low-cost, fast and reliable solution alternative at the conceptual stage of the design.

To cite this article:

Karahancı, A. Y., & Gök, A. N., & Kaya, M. (2025). Euler Denklemi Tabanlı HAD Modelinin Caradonna-Tung Rotor Deneyi Kapsamında Doğrulanması. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 4(2), 144-152.

*Corresponding Author: Ayşe Nur GÖK, aysenurgok007077@gmail.com



GİRİŞ

Eş eksenli dronların aerodinamik zorluğu, tek rotorlu sistemlere kıyasla daha fazladır. Tek rotorlu sistemlerde, itki ve kaldırma kuvvetinin büyük bir kısmı tek bir rotor tarafından sağlanırken; eş eksenli sistemlerde, iki karşılıklı dönen rotorun etkileşimi kullanılarak itki verimliliği optimize edilir ve tüm sistemin boyutu ile karmaşıklığı azaltılır (Leishman, 2006). Eş eksenli rotor konfigürasyonları, daha iyi aerodinamik performans sağlamaları nedeniyle İHA (insansız hava aracı) tasarımlarında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Lei, Y., Ji, Y. ve Wang, C., 2018). Ancak, bu kadar karmaşık rotor sistemlerine yönelik Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) tahminlerinin doğruluğunun onaylanması, tasarım öngörülerinin güvenilirliğini sağlamak açısından son derece önemlidir. Bu çalışma, eş eksenli dron pervanelerinin analizinde uygun CFD yönteminin seçilmesini amaçlayan kapsamlı bir ön incelemedir. İlk aşamada yapılan bu tür bir araştırma, hem simülasyonlarda doğru yöntemin belirlenmesi hem de analizlerin geçerliliğinin kontrolü açısından oldukça kritiktir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, rotor aerodinamiğinin analizinde değerli bir araçtır; çünkü rotor kanatları etrafındaki hava akımı, basınç dağılımları ve itki üretimi gibi parametreleri incelemeye olanak tanır. Bu çalışmada, viskoz olmayan akışları temsil eden Euler denklemleri kullanılarak, ilk aerodinamik hesaplamalar için basit fakat etkili bir model uygulanmıştır. Euler tabanlı çözümler genellikle rotor analizlerinin başlangıç aşamalarında kullanılır çünkü bu yöntemler hesaplama açısından hızlıdır ve hızlı bir öngörü sağlar; dolayısıyla rotor performansının ön değerlendirmesi için tercih edilir (Kim, J. W., Park, S. H., & Yu, Y. H., 2009). Bu yöntem verimliliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir; ancak ileride yapılacak simülasyonlarda viskoz etkilerin ve türbülans modellerinin dahil edilmesi, rotor dinamiğinin daha gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlayacaktır (Yoon, S., Chaderjian, N. M., Pulliam, T. H., & Holst, T. L., 2015).

Bu çalışmada, lisans araştırma grubu öğrencileri tarafından yürütülen bir projenin iş paketlerinden birisi olarak proje çalışmasına yakın bir problem üzerinden Euler tabanlı CFD modelinin doğrulaması yapılmıştır. Bu problem, literatürde kabul görmüş bir referans olan Caradonna ve Tung rotor deneyinde incelenen durumlardan birisidir. Caradonna ve Tung'un araştırması, rotor aerodinamiğinde öncü çalışmalardan biri olarak kabul edilmekte ve rotor analizi için geliştirilen CFD yöntemlerinin doğrulanmasında temel bir referans olarak kullanılmaktadır. Rotor performansına dair itki ve tork tahminleri gibi konulara odaklanan bu çalışma, özellikle eş eksenli konfigürasyonlardaki karşılıklı dönen rotorlar arasındaki aerodinamik etkileşimin performans üzerindeki belirleyici etkisinin anlaşılması açısından önem taşımaktadır (Caradonna & Tung, 1981).

Ayrıca, daha yakın tarihli çalışmalar da karmaşık aerodinamik etkileşimlerin daha doğru modellenmesi için CFD ile birlikte girdap-parçacık tabanlı hibrit yaklaşımların kullanımını önermektedir. Örneğin, Rajmohan, Zhao ve He bu tür yöntemlerin eş eksenli rotor geometrilerinin simülasyonunda kullanılmasının doğruluk açısından önemli katkılar sağladığını ifade etmiştir (Rajmohan, Zhao ve He (2014)). Benzer şekilde, Srinivasan ve Baeder tarafından geliştirilen serbest wake Euler ve Navier-Stokes CFD tekniği de hem ileri uçuş hem de sabit noktada süzülme koşullarındaki rotor performans analizlerinde etkili olmuştur. (Srinivasan ve Baeder (1993))

Bahsi geçen deneysel veriler ile bu çalışma kapsamında elde edilen CFD çıktılarının karşılaştırılması, Euler Denklemlerinin kavramsal tasarım aşamasında kullanılmasını onaylamaktadır. Bu karşılaştırmalar ışığında, eş eksenli rotorların aerodinamik dinamiğini kavramsal tasarım seviyesinde başarılı şekilde temsil edebileceği değerlendirilmiştir.

YÖNTEM

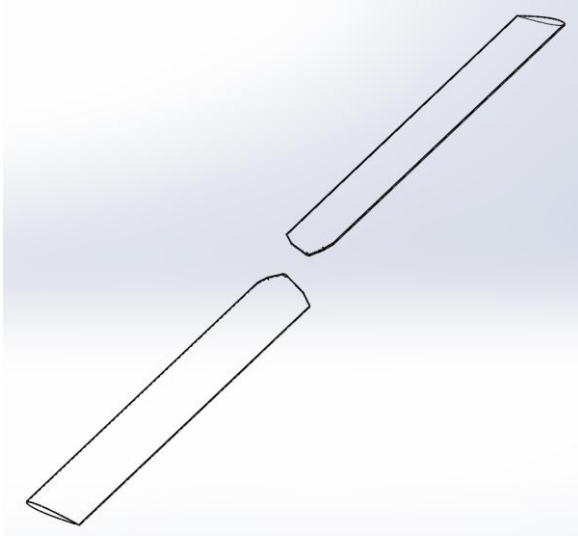
Bu çalışmada akış alanı, viskoz kayma gerilmelerinin ihmal edildiği **Euler denklemleri** ile modellenmiştir. Viskoz olmayan akış için Euler'in hareket denklemleri, kütle, momentum ve enerji korunumu esas alınarak korunum formunda

$$\partial U / \partial t + \nabla \cdot F(U) = 0, \quad U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E]^T$$

şeklinde ifade edilir. Burada ρ akışkan yoğunluğu u, v, w hız bileşenleri ve E toplam enerji terimidir. Bu formülasyon, akışkanın viskoz etkilerinin ihmal edilebildiği durumlarda basınç ve hız dağılımlarının hesaplanmasını mümkün kılar (Ferziger & Perić, 2020; Versteeg & Malalasekera, 2007).

Çalışmada kullanılan Caradonna–Tung rotor konfigürasyonu iki pallı, sabit veterli ve NACA0012 kesit profiline sahip dikdörtgen planform bir geometriye sahiptir. Rotor çapı 1.143 m, sabit veter uzunluğu ise 0.1905 m'dir. HAD analizi, (Elfarrar, M., & Kaya, M. (2018))'daki literatürde belirtilen 1750 RPM rotor hızı ve 8 derece yunuslama açısı ile gerçekleştirilmiştir. Bu dönme hızı yaklaşık 183 rad/s değerine karşılık gelmekte olup, rotor yarıçapı 0.5715 m dikkate alındığında uç hızı yaklaşık 105 m/s olarak bulunur. Deniz seviyesi atmosfer koşullarında (hava yoğunluğu 1.225 kg/m³, dinamik viskozite 1.8×10⁻⁵ Pa·s) Reynolds sayısı yaklaşık 1.3×10⁶ değerine ulaşmaktadır. Aynı koşullarda ses hızı yaklaşık 343 m/s olduğundan Mach sayısı 0.3 mertebesindedir. Dolayısıyla akış yüksek Reynolds sayılı, subsonik rejimde gerçekleşmekte olup, Euler denklemlerinin kullanımı kavramsal tasarım seviyesinde uygun ve geçerli bir yaklaşım sunmaktadır.

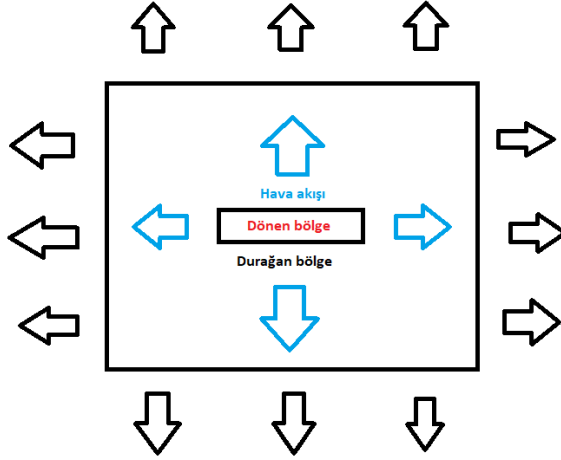
Şekil 1
Geometri



Hesaplama daimi-hal akış varsayımı altında yürütülmüş, yakınsama kriteri ise denklem kalıntılarında 8 merteye düşüş olarak belirlenmiştir. Rotor yüzeyleri için kayma sınır koşulu uygulanmış, dış sınırlar için ise 1 atm'lik sabit atmosfer basıncı tanımlanmıştır. Geometri ve ağ yapısı hazırlanırken, Şekil 2'deki gibi iki bölge oluşturulmuş olup büyük bölge hareketsizdir. Küçük bölge ise rotoru içermekte olup rotorla beraber dönen ağ içermektedir. Ağın ızgara yapısı, rotora yakın çevrede yüksek çözünürlüğe sahiptir. Böylelikle, rotor etrafındaki basınç değişiminin yüksek doğrulukla hesaplanması amaçlanmıştır. Bölgelere göre ağ yapısı istatistikleri Tablo 1, kalite değerleri ise Tablo 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2

CFD Akış Alanı ve Sınır Koşulları Şeması



CFD analizi, Şekil 2'de gösterildiği gibi havada asılı durma pozisyonu için yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda 5 adet pal açıklık konumunda ($r/R = 0.5, 0.68, 0.8, 0.89, 0.96$) basınç katsayısı dağılımları elde edilmiştir. Burada, R , pal açıklık çapı olup, r , ise konumu göstermektedir. Her bir konumdaki dağılım, (Caradonna, F. X., & Tung, C. (1981)) deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır.

BULGULAR

Doğrulama çalışması, yunuslama açısının 8 derece ve dönme hızının 1750 RPM olduğu deneyin ölçüm verileri ile yapılmıştır. $r/R = 0.5, 0.68, 0.8, 0.89, 0.96$ pal açıklığı konumlarında hesaplanan basınç katsayısı değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil, deneysel sonuçlarla olan karşılaştırmaları da göstermektedir.

Tablo 1

Ağ Yapısı Eleman İstatistikleri

Akış Alanı Hacmi	Hücre Sayısı	Düğüm Sayısı
Küçük bölge	234742	273912
Büyük bölge	189237	220083

Şekil 3'ten de görülebileceği üzere, hesaplanan basınç katsayısı dağılımları, tüm konumlarda deneysel sonuçlarla bir uyum içerisindedir. Özellikle basınç eğrilerinin genel trendi ve veter boyunca değişimi deney sonuçları ile iyi derecede örtüşmektedir. Hücum kenarı yakınındaki basınç düşüşü yüksek hücum açılarına bağlı emiş etkisi nedeniyle sayısal çözümde net biçimde gözlemlenmiştir; ancak deneysel verilere kıyasla tepe değeri biraz daha düşük çıkmıştır.

Tablo 2

Ağ Yapısı Kalite Ölçümleri

Akış Alanı Hacmi	Minimum Ortogonalite	Eğrilik
Küçük bölge	0.13669	0.00021–0.92873
Büyük bölge	0.29111	0.00000–0.81342

Orta açıklık konumlarında ($r/R = 0.5$ ve 0.68), HAD sonuçları, arka kenara doğru gözlenen basınç toparlanma eğilimini doğru şekilde yansıtmaktadır. Minimum basınç noktasının konumu da deneysel

verilerle oldukça uyumludur. Hücum kenarındaki emiş tepe değerindeki sapmalar ise Euler denklemlerinin viskoz etkileri ve sınır tabaka oluşumunu ihmal etmesinden kaynaklanmaktadır.

Açıklık konumunda ilerledikçe ($r/R=0.80,0.89,0.96$), yani pal ucuna doğru yaklaşıldıkça, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyum daha da artmaktadır. Bunun sebebini açıklamaya ve anlamaya yönelik değerlendirmeler devam etmektedir.

Genel olarak, Euler Denklemleri tabanlı HAD simülasyonu, pal boyunca basınç dağılımını trendini doğru şekilde tahmin edebilmiş ve rotorun aerodinamik davranışını çözümlemede etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, kullanılan yöntemin tasarımların kavramsal aşamaları için hızlı ve uygulanabilir bir çözüm yöntemi olduğunu ortaya koymuştur.

TARTIŞMA

Bu çalışmada, Caradonna-Tung rotor konfigürasyonu için Euler denklemleri ile elde edilen sayısal çözümler, literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmış ve genel anlamda yüksek derecede bir uyum sağlanmıştır. Özellikle palin ucuna ($r/R = 0.80, 0.89, 0.96$) doğru yaklaşıldıkça, basınç katsayısı dağılımlarının deneysel sonuçlarla olan örtüşmesi daha belirgin hale gelmiştir.

Hücum kenarı bölgesindeki emiş değerlerinde gözlemlenen uyumsuzlukların ise Euler çözümünün viskoz etkileri ve sınır tabaka gelişiminden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Euler denklemlerinin kavramsal tasarım için yeterli doğruluğu sağlayabileceğini göstermiştir. Farklı yunuslama açıları rotor üzerindeki yük dağılımını ve basınç katsayısı değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada 8° seçilmesinin nedeni deneysel (Caradonna ve Tung, 1981) verilerle karşılaştırmaya uygunluk sağlamasıdır; daha düşük açılar daha düşük emiş bölgeleri oluştururken, daha yüksek açılarda sınır tabaka ayrılması ve kayıplar daha belirgin hale gelmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, Caradonna-Tung rotor palinin aerodinamik analizi, Euler denklemleri tabanlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözüm sonuçları, bu yaklaşımın doğruluğunu değerlendirmek için literatürde sıkça referans verilen deneysel verisi ile karşılaştırılmıştır. Farklı pal açıklığı konumlarında ($r/R = 0.5, 0.68, 0.8, 0.89, 0.96$) hesaplanan basınç katsayısı dağılımları, deneysel verilerle oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Özellikle veter boyunca gözlenen basınç değişimi, Euler Denklemleri tabanlı çözüm yöntemiyle yeterli kabul edilebilecek bir seviyede yakalanmıştır. Hücum kenarındaki negatif tepe değerlerinde gözlemlenen küçük sapmaların ise Euler denklemlerinin viskoz etkileri ve sınır tabaka gelişimini içermemesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın bulguları, Euler Denklemleri tabanlı akış çözümlerinin kavramsal tasarım çalışmalarında hesaplama açısından verimli ve güvenilir bir alternatif olabileceğini doğrulamaktadır. Bu durum, Wang ve arkadaşlarının Caradonna-Tung konfigürasyonu üzerine yaptıkları çalışmayla da tutarlıdır; söz konusu çalışmada Euler çözümleri ile deneysel veriler arasında yüksek bir korelasyon gözlemlenmiştir. (Wang ve arkadaşlarının (2018)) Benzer şekilde, Steijl, Barakos ve Badcock tarafından geliştirilen çok bloklu CFD yöntemi, Euler denklemlerini kullanarak rotor aerodinamiğinin dinamik performansını doğru şekilde simüle etmiş ve Caradonna-Tung deneysel verileriyle yüksek düzeyde uyum sağlamıştır (Steijl, Barakos ve Badcock (2006)).

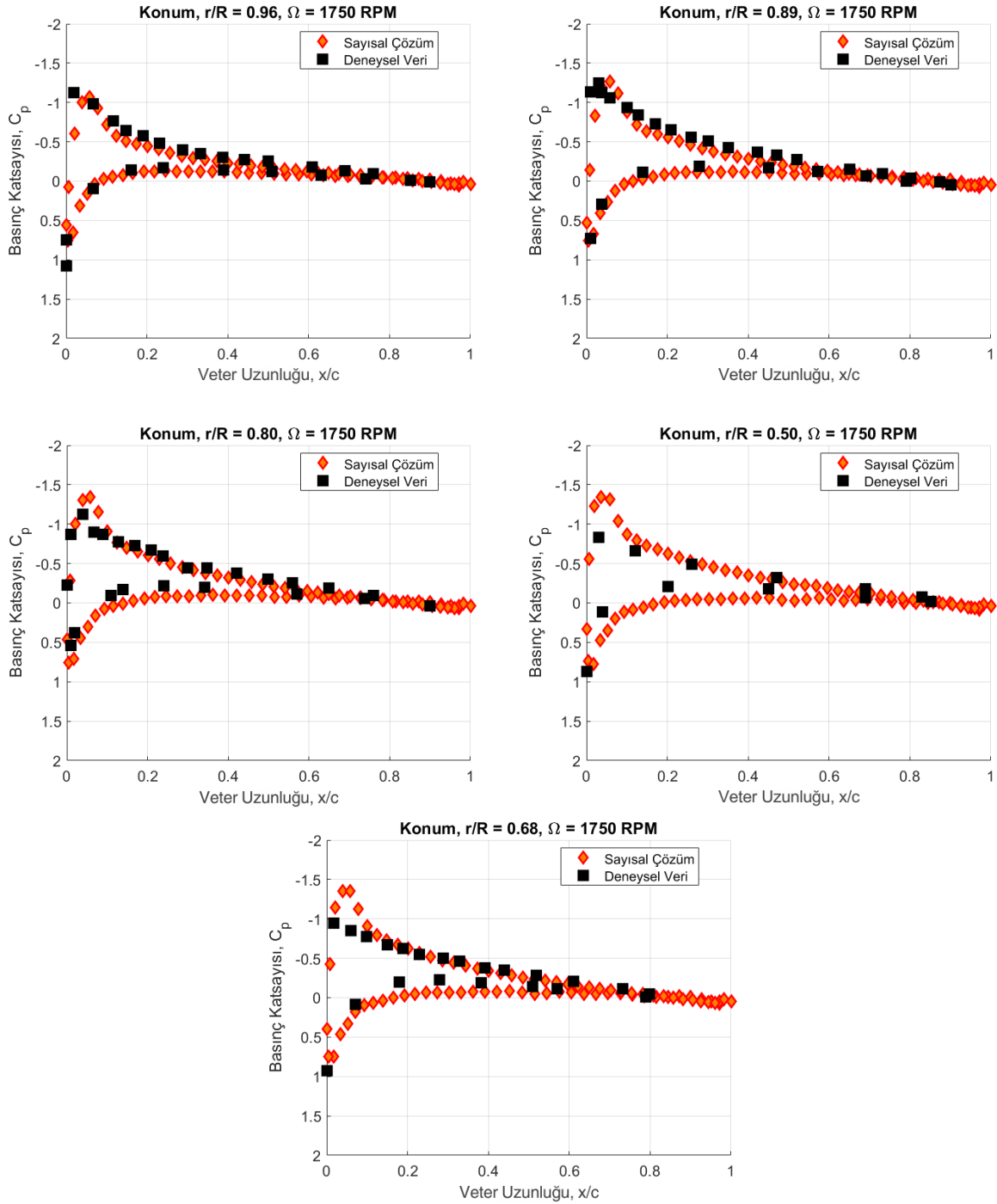
Bunun yanında, Elferra ve Kaya'nın viskozluk ve türbülans etkilerini içeren Navier-Stokes tabanlı çözüm yöntemi, hücum kenarındaki emiş tepe noktalarının tahmininde daha yüksek bir doğruluk

sunmuştur (Elferra ve Kaya'nın (2018)). Ancak genel basınç dağılımı eğilimleri açısından bakıldığında, bu çalışmada elde edilen Euler tabanlı çözümler, viskoz çözüm sonuçlarıyla da büyük oranda benzerlik göstermiştir.

Şekil 3

Sayısal ve Deneysel Çözümlerin (Caradonna ve Tung, 1981) Basınç Katsayısı Dağılımlarının Karşılaştırılması

Grafikler sırasıyla (a) $r/R = 0.96$, (b) $r/R = 0.89$, (c) $r/R = 0.80$, (d) $r/R = 0.68$ ve (e) $r/R = 0.50$ konumlarını göstermektedir.



Sonuç olarak, bu çalışma, Euler tabanlı CFD analizlerinin rotor profillerinin aerodinamik davranışlarını kavramsal tasarım kapsamı için yeterli seviyede ön görebildiğini ortaya koymuştur. Kavramsal tasarımın yanı sıra hızlı değerlendirme gerektiren ve optimizasyon içeren mühendislik çalışmalarında da önerilen bu yöntemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, lisans araştırma grubu öğrencileri tarafından yürütülen ve ana teması bir eş eksenli dron tasarımı olan projenin kavramsal tasarımı için proje ekibine ışık tutmuş ve pervane seçimine yönelik konseptlerin değerlendirilmesi sürecinde hız kazandırmıştır.

ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen bulgular, dron rotorları için aerodinamik analizlerin gerektiği kavramsal tasarım aşamasında Euler Denklemi tabanlı HAD çözümlerinin kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Çünkü, böylelikle, hızlı ve verimli sonuçlar alınabilecektir. Ancak, daha yüksek doğruluğa sahip sonuçlara ulaşmak için viskoz etkilerin ve hatta türbülansın modellendiği Navier–Stokes çözümleri önerilmektedir. Ayrıca, zamandan bağımsız yani daimi-hal çözümleri yerine zamana göre değişen akış analizleri kullanılarak rotor pallerinin aerodinamik davranışı, daha kapsamlı biçimde elde edilebilir. Havada asılı kalma koşuluna ek olarak; ileri uçuş ve manevra senaryolarını içeren farklı görev esnasında yapılacak analizler, bu modelin daha geniş uygulama alanlarında geçerliliğini test etme fırsatı sunacaktır

Etik Beyan

Bu makale, HAVÖS 2025 Sempozyumu'nda sözlü olarak sunulan ancak tam metni yayımlanmayan "Eş Eksenli Dron Tasarımı ve Aerodinamik Analizi" adlı bildirinin içeriği geliştirilerek ve kısmen değiştirilerek üretilmiştir.

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) Ahmet Yasin KARAHANCI (%35) – Ayşe Nur GÖK (%35)-Mustafa KAYA(%30)

Veri Toplama (CRediT 2) Ahmet Yasin Karahancı (%35) – Ayşe Nur GÖK (%35)-Mustafa KAYA(%30)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Ahmet Yasin Karahancı (%35) – Ayşe Nur GÖK (%35)-Mustafa KAYA(%30)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Ahmet Yasin Karahancı (%35) – Ayşe Nur GÖK (%35)-Mustafa KAYA(%30)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Ahmet Yasin Karahancı (%35) – Ayşe Nur GÖK (%35)-Mustafa KAYA(%30)

Finansman

Çalışma TUSAŞ ve TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Bu çalışmada bir çıkar çatışması yoktur.

REFERANSLAR

- Caradonna, F. X., & Tung, C. H. (1981). *Experimental and analytical studies of a model helicopter rotor in hover* (NASA Technical Memorandum 81232). NASA Ames Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19820004169>
- Elfarra, M., & Kaya, M. (2018). CFD analysis of the effect of parabolic taper distribution of an untwisted helicopter rotor blade. *Proceedings of Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Aerospace Sciences*, 59–70.
- Kim, J. W., Park, S. H., & Yu, Y. H. (2009). Euler and Navier-Stokes simulations of helicopter rotor blade in forward flight using an overlapped grid solver. *19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2009-4268>
- Lei, Y., Ji, Y., & Wang, C. (2018). Optimization of aerodynamic performance for co-axial rotors with different rotor spacings. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1177/1756829318804763>
- Leishman, J. G. (2006). *Principles of helicopter aerodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Mohd, N. A. R. N., & Barakos, G. (2012). Computational aerodynamics of hovering helicopter rotors. *Jurnal Mekanikal*, 34, 16–46.
- Rajmohan, N., Zhao, J., & He, C. (2014). A coupled vortex particle/CFD methodology for studying coaxial rotor configurations. In *Proceedings of the Fifth Decennial AHS Aeromechanics Specialists' Conference* (pp. 1–11). American Helicopter Society International.
- Srinivasan, G. R., & Baeder, J. D. (1993). TURNS: A free-wake Euler/Navier–Stokes numerical method for helicopter rotors. *AIAA Journal*, 31(5), 959–962. <https://doi.org/10.2514/3.49036>
- Steijl, R., Barakos, G. N., & Badcock, K. J. (2006). A framework for CFD analysis of helicopter rotors in hover. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 51(8), 819–847. <https://doi.org/10.1002/flid.1125>
- Wang, L., Xu, G., & Shi, Y. (2018). High-resolution simulation for rotorcraft aerodynamics in hovering and vertical descending flight using a hybrid method. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(5), 1053–1065. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.03.001>
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). *Computational methods for fluid dynamics* (4th ed.). Springer.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Rotor systems are important parts of drone and helicopter design. In this study, we use a simple CFD method that is based on Euler equations. The goal is to check if this method gives correct results by comparing it with a well-known experiment. The experiment is called the Caradonna-Tung rotor test, and it is used often in scientific studies. If the results are close to the experiment, then this CFD method can be used in the early design of drone rotors.

Method: The rotor has two blades with a NACA 0012 airfoil and rectangular shape. Its diameter is 1.143 meters and chord length is 0.1905 meters. The simulation is done at 1750 RPM and with 8° collective pitch angle. Euler equations are solved with steady-state condition. There is no viscosity or turbulence in this model. The mesh is created carefully and the rotor area has higher mesh density. Pressure coefficients are calculated at five positions ($r/R = 0.5, 0.68, 0.8, 0.89, 0.96$), and these are compared with experimental data.

Findings: These results show that Euler-based CFD can be used in the conceptual design phase. It gives fast results and saves time. In other studies like Wang et al. and Steijl et al., similar findings were obtained. However, for more accurate results with flow separation or turbulence, Navier–Stokes equations can be used later.

Discussion: The results are shown us that this CFD method can be useful in the early design steps. Because Euler solutions are fast, they can save time. Also, they give a general idea about the flow. But if we want to see detailed flow features, like turbulence or unsteady motion, we will need to use Navier-Stokes in future. When we look at other studies, like Steijl or Wang’s works, we see similar ideas.

Conclusion: This validation shows that the Euler CFD model is reliable for basic hover cases. It is useful in early rotor design stages, especially when time and resources are limited. In this project, it also helped the student group in selecting drone rotors and checking early performance.

Recommendation: In the future studies can use turbulence models and also work on forward flight cases. Also, the solver can be used to optimize rotor RPM and distance between rotors to make better drone designs.