

İki Pervanenin CFD Analizi (İki Dikey Eksenli Pervane)

Kutlu Akar* ve Tuna Deniz† ve Aleyna
Çamlıbel‡ ve Dr. Öğr. Üyesi İzzet Murat
Aksit§
İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir

ÖZET

Bu çalışmada, dikey iniş ve kalkış (VTOL) kabiliyetli bir hava aracında kullanılacak olan itki sisteminin yatay kalkış sırasındaki hava akış analizi yapılmıştır. Ağırlıklı olarak hava aracının aynı tarafında bulunan, biri önde biri arkada olan iki pervane üzerinde durulmuş ve bu pervaneler arasındaki etkileşimin gözlenmesi hedeflenmiştir. Bu pervanelerden önde olanı hava aracını çekecek (traktör) arkada olanı ise hava aracını itecek (pusher) şekilde yerleştirilmiştir. Kanatlar gibi engellerin ve pervaneler arasındaki mesafenin ana itiş gücünü nasıl etkilediğini anlamak zorunluluğu nedeniyle çalışma, literatürün kapsamlı bir değerlendirmesi ile birlikte İHA tasarımları ve CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) ile ilgili çalışmalar hakkında başlangıç araştırmasını içerir.

GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA), içinde insan bulunmayan ve doğrudan insan müdahalesi olmadan belirlenen görevleri otonom olarak gerçekleştiren ya da uzaktan kumanda ile işletilen hava araçları olarak tanımlanmaktadır [Akgül, 2010]. İHA'ların kullanımlarının yaygınlaşması, taleplerde ve bu taleplerin gereksinimlerinde artışa yol açmıştır. Bu proje kapsamında, belirtilen artışa yanıt olarak tasarlanacak olan VTOL kabiliyetli bir İHA için yenilikçi bir itki sistemi konseptinin akış analizlerini yapılacaktır. Projenin birincil amacı, pervanelerin birbirlerinin hava akışlarına etkilerini araştırmak, İHA'yi kaldırma kapasitelerini değerlendirmek ve İHA'ya yüklenen hava akımının olumsuz etkileri olup olmadığını incelemektir.

*Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: kutluakar2@gmail.com

†Havacılık ve Uzay Müh. sBöl., E-posta: tunadeniz2021@gmail.com

‡Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: aleyna.camlibel@std.ieu.edu.tr

§Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: izzet.aksit@ieu.edu.tr

Sorun Tanımı

Herhangi bir hava aracının tasarlandığı projelerde geliştirilen itki sistemlerinin yeterliliğinin testinin yapılması gerekmektedir. Günümüz şartlarında, tasarlanmak istenen İHA'da kullanılmak üzere olan pervane boyutları hakkında fazla veri bulunmamaktadır [Brandt, 2011]. Bu sebepten dolayı yenilikçi tasarımların ortaya çıkması ve teslerinin yapılması uzun süre almaktadır.

Motivasyon

Bu proje, VTOL kabiliyetli bir İHA'nın pervaneleri üzerinde CFD kullanarak itki testleri yapılacaktır. Analizlerden elde edilen veriler ile yapılar testler karşılaştırılarak CFD analizinin doğruluğu belirlenecektir. CFD analizlerinin gerçeğe yakın olması durumunda, tasarlanan itki sistemleri gerçek boyutlu, pahalı prototipleme işlemine girmeden hızlı bir şekilde test edilip gelişimi sağlanabilecektir.

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.CFD Analysis on Propeller at Varying Propeller Disc Angle and Advance Ratio [Hang, 2022]:

Özellikle APC 6X4E ve 9X6E pervanelerine odaklanan bu makalenin araştırmasında ANSYS FLUENT yazılımı kullanılmıştır. Ana amaç, CFD analizinin pervane performansını rüzgar tüneli testinden daha doğru bir şekilde tahmin edip edemeyeceğini belirlemektir. Rapor, literatür incelemesi bölümünde farklı pervane diski açılarında Düşük Reynolds sayılı pervanelere ilişkin bir araştırma boşluğu olduğunu ve CFD analizini kullanan az sayıda çalışmanın bulunduğunu belirtiyor. Düşük Reynolds Sayılı pervaneler için CFD analizinin özellikle çeşitli pervane diski açılarında uygulanmasını doğrulayan bu çalışma, bu boşluğu kapatmayı amaçlamaktadır. Akan bir hava akımında dönen pervaneyi modellemek için Çoklu Referans Çerçevesi (MRF) modeli ve FLUENT ayarları için SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılmaktadır. Mesh yakınsama testleri de dahil olmak üzere Mesh oluşturma yöntemi, güvenilir sonuçlara ulaşmak için hassas Mesh oluşturmalarının önemine odaklanılarak açıklanmaktadır. Sonuçlar rüzgar tüneli testlerinden elde edilen verilerle karşılaştırıldığında, eğilimler birbiriyle yakından örtüşüyor. Çalışma, ölçüm ekipmanındaki boşluklar ve kanat profili verileri gibi CFD modellerinin hassasiyetini etkileyen hata kaynaklarını tespit ediyor. Çalışmanın sonucu, sonuçların altını çiziyor ve düşük Reynolds sayılarına sahip pervaneler için CFD analizinin doğrulanmasının etkinliğini vurguluyor. Çalışma, bazı kısıtlamalara ve hata kaynaklarına rağmen, CFD modellerinin pervanelerin aerodinamik özelliklerini çeşitli pervane diski açılarında tahmin edilebildiğini doğrulamaktadır.

2. A Literature Review on Determination of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles Propeller Thrust and Power Coefficients [Eraslan, 2020]:

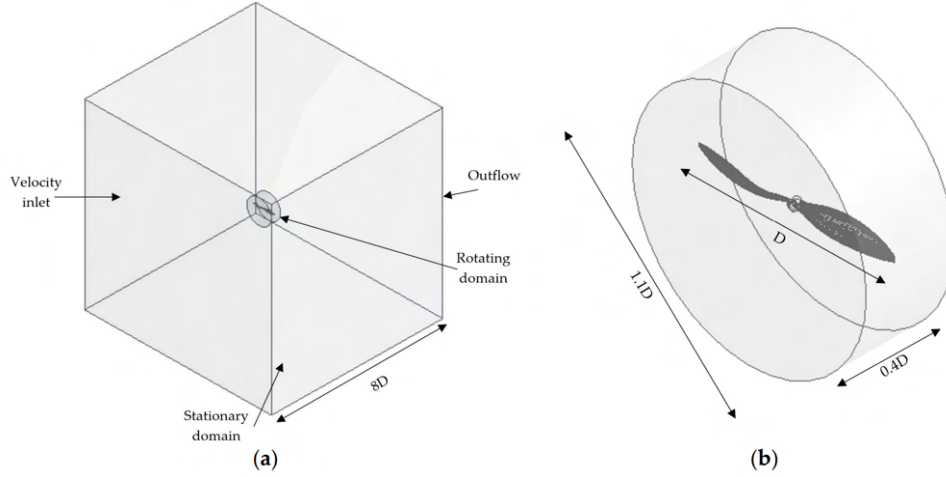
Kuadkopterler için itme ve güç katsayılarının tahmini bu araştırmanın konusunu oluşturmaktadır. Kuadkopter pervanelerinin aerodinamik performansının analizinde itme ve güç katsayılarını önemli faktörler olarak görüyor. Çalışma, CFD analizi ve stereo parçacık görüntülü hız ölçümü gibi deneysel teknikleri içermektedir. Rüzgar tüneli testleri, analitik modeller ve kuadkopter itme kuvveti belirleme çalışmaları ile ilgili araştırmalar kapsamaktadır. Analiz, İHA boyutunda pervane performansını belirlemek için CFD analizlerinin verimliliğine ilişkin bir araştırma ihtiyacını vurgulamaktadır. Ayrıca altı serbestlik dereceli test platformları, örtülü pervane tasarımları ve düzlemsel olmayan dört rotorlu motorlar üzerine yapılan çalışmalar da yer alıyor. Araştırma, kuadkopter aerodinamiği üzerindeki rotor etkileşimlerinin önemini ve CFD simülasyonlarında türbülans modellerinin kullanımını vurgulamaktadır. Her şey göz önünde bulundurulduğunda, çalışma literatürün kapsamlı bir özetini sunmakta

ve etkin kuadkopter pervane performansı değerlendirmesi için CFD analizlerinin potansiyelini vurgulamaktadır.

3D CFD simulation and experimental validation of small APC(Advanced Precision Composites) slow flyer propeller blade [Kutty, 2017]:

Bu makale, İHA pervanelerinin nispeten küçük boyutları nedeniyle karşılaştıkları düşük Reynolds sayısı durumlarını araştırmayı amaçlamıştır. Bu örnekte kullanılan pervane 3008 RPM'de dönünce Reynolds sayısı 50804 olarak hesaplandı.

Mesh atma:



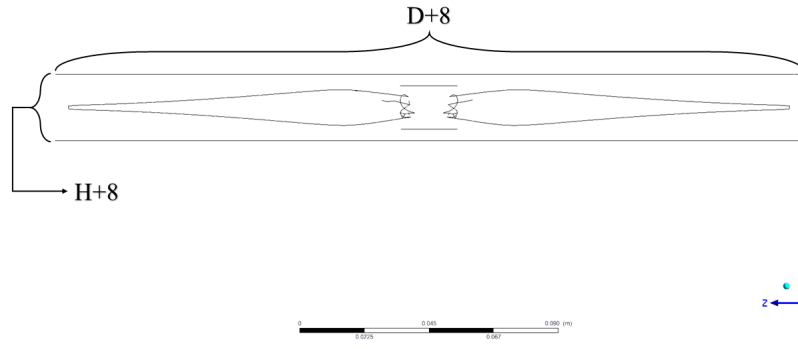
Şekil 1: Mesh boyutları [Kutty, 2017]

Akış gelişiminin simülasyon bulguları üzerinde hiçbir etkisinin olmamasını sağlamak için, akış alanı sınırının mesafesi bilinçli olarak bu boyutlarda ayarlanmıştır. Hem sabit hem de dönen alanlar için yapısız tetrahedral mesh kullanılır. Hava tüneli araştırmalarına göre, giriş türbülans yoğunluğu %0.1 olarak alınmıştır [Deters, 2014; Brandt, 2013; Brandt, 2016]. Düşük ilerleme oranı (advance ratio) durumlarında, tahmin edilenin altında değerler, daha büyük ilerleme oranlarında ise tahmin edilenin üstünde olmasına rağmen, burada kullanılan yaklaşımlar, düşük hızlarda ve düşük Reynolds sayılarında çalışan pervanelerin performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilecek sonuçlar üretme potansiyeline sahiptir.

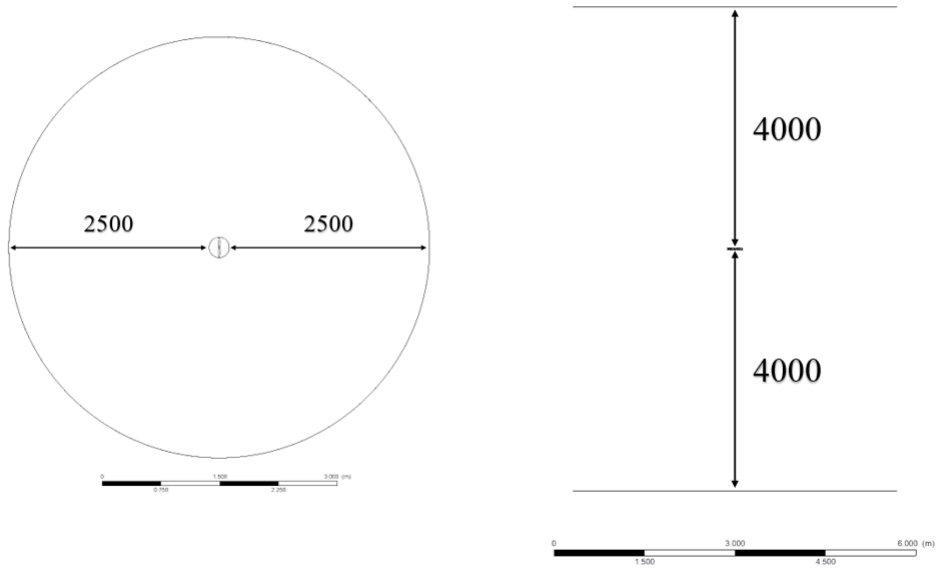
YÖNTEM

İlk adım olarak pervane genel bir 10x5.5 pervane olarak seçilmiştir. İki pervanenin simülasyonunun yapılabilmesi için [Hang, 2022] kaynağında da belirtilen MRF yönteminin kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu araştırmada, statik alan ve dönen alan olarak bahsedilecek iki alan bulunmaktadır. Dönen alanın amacı, pervaneyi döndürmektense pervanenin içinde bulunduğu havanın dönmesini sağlamaktır. Böylece pervanenin dönüşünün hava akışında yaratacağı etki gözlemlenecektir. Statik alan ise dönen alanın etrafında ortam hava akışını simüle etmektir.

Öncelikle tek bir pervanenin itkisi, CFD ile ölçülecektir. Bunun için dönen ve statik alanın boyutları Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Görsellerde seçilen pervanenin çapı 'D' ve yüksekliği 'H' ile belirtilmiştir. Verilen boyutlar mm cinsindedir.

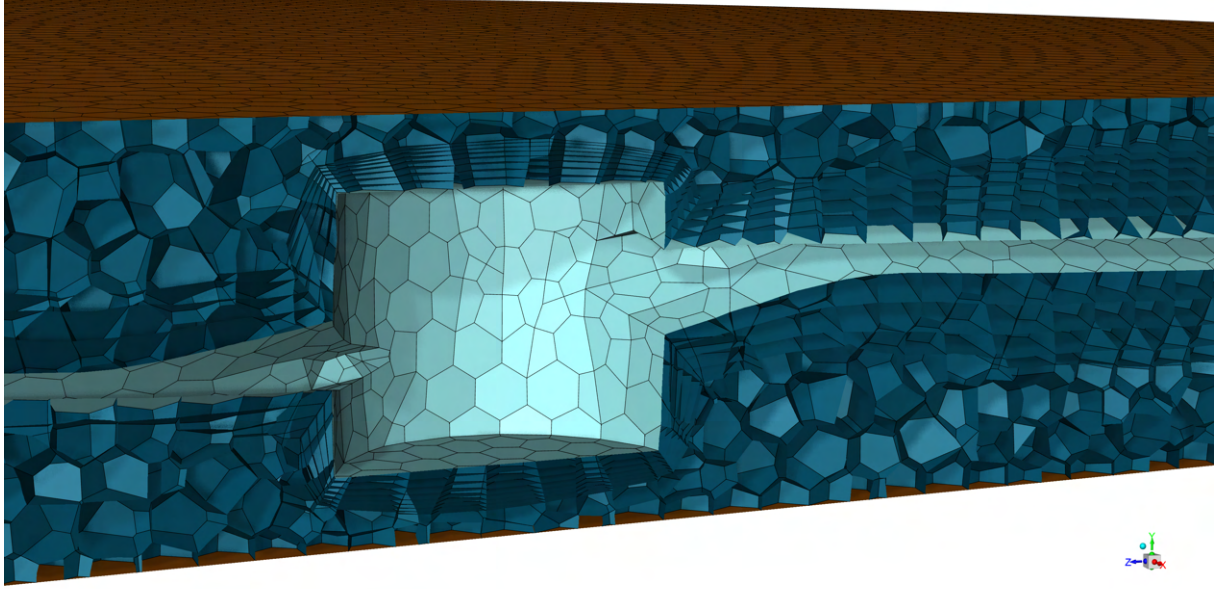


Şekil 2: Tek pervane için dönen alan boyutları



Şekil 3: Tek pervane için statik alan boyutları

Bu adımın ardından mesh oluşturulmuştur. Mesh 'Fluent Meshing' ile oluşturulmuştur. Pervanenin sınır tabakasında mesh oluşturulurken 'last-ratio' metodu kullanılmıştır. Böylece sınır tabakasındaki mesh detayı arttırılarak itkinin büyük kısmının olduğu bölgedeki analizin doğruluğu arttırılmıştır.



Şekil 4: Pervane sınır tabakası mesh görseli

Mesh kalitesi değerleri tablo 1'de verilmiştir.

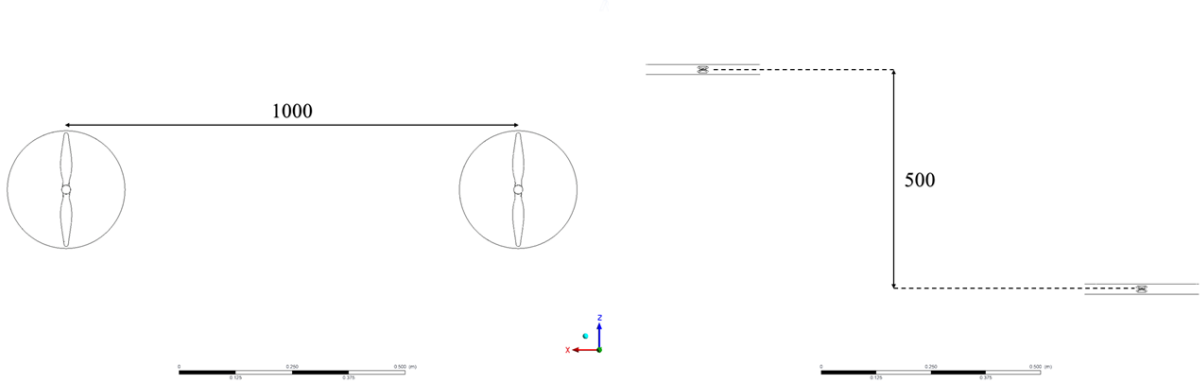
Tablo 1: Mesh kalitesi değerleri

Mesh Özelliği	Değeri
Skewness	0.6481
Orthogonal Quality	0.3518

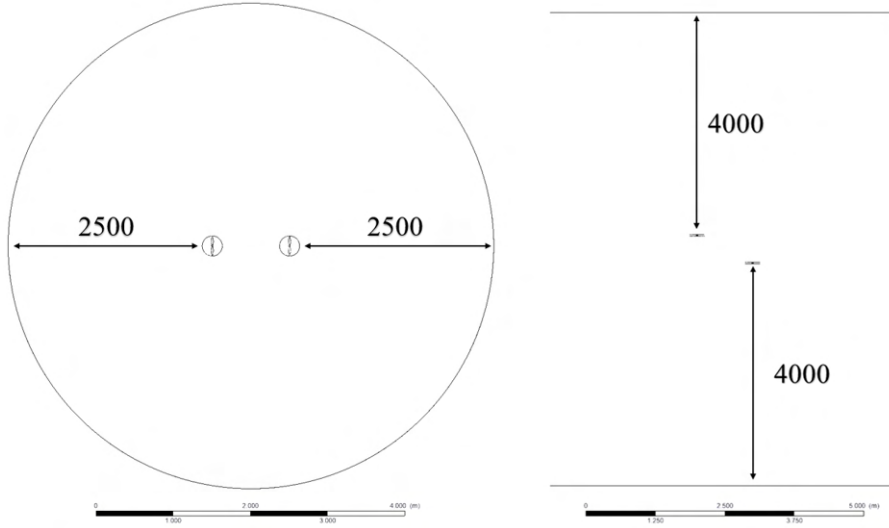
Mesh yapımının ardından ortam değişkenleri ve sınır koşulları gibi değişkenlerin belirlendiği 'setup' kısmına geçilmiştir. Burada literattür araştırması sonucu SST $k-\omega$ akış modeli kullanılması kararlaştırılmıştır [Oktay, 2020; Loureiro, 2021]. Dönen alanda, dönüşün simüle edilebilmesi için 'frame motion' methodu kullanılmıştır. Frame motion içinde havanın dönüş hızı 890 rad/s (8499 RPM) olarak belirlenmiştir. Hava ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Sınır koşulları belirlenirken, statik alanın üst ve alt yüzeyleri 'pressure-outlet' yan yüzeyi ise 'symmetry' olarak belirlenmiştir. Çözüm kontrolleri kısmında basınç 0.3'den 0.5'e çıkarılmıştır. 2000 iterasyon belirlenmiş ve sonuç 791. iteryonda yakınsanmıştır.

Tek pervanenin analizi sonucunda itkisi bulunmuştur. Ardından iki pervanenin analizine geçilmiştir. İki pervane arasındaki mesafeler 1 ve 1.5 metre olacak şekilde iki farklı analiz yapılmıştır. Aynı zamanda her iki analiz için de pervanler arasında 500 mm'lik yükseklik farkı bulunmaktadır. Burada tek pervanenin analizinde olduğu gibi önce dönen ve statik alanlar belirlenmiş, mesh oluşturulmuş ve analiz yapılmıştır. İki pervane ve tek pervanenin analizleri arasındaki tek fark mesh kaliteleri ve statik alanların boyutlarıdır. Bunun haricinde yukarıda bahsedilen dönen alan boyutları, 'setup' kısmında belirlenen değişkenler üç analiz için de aynıdır.

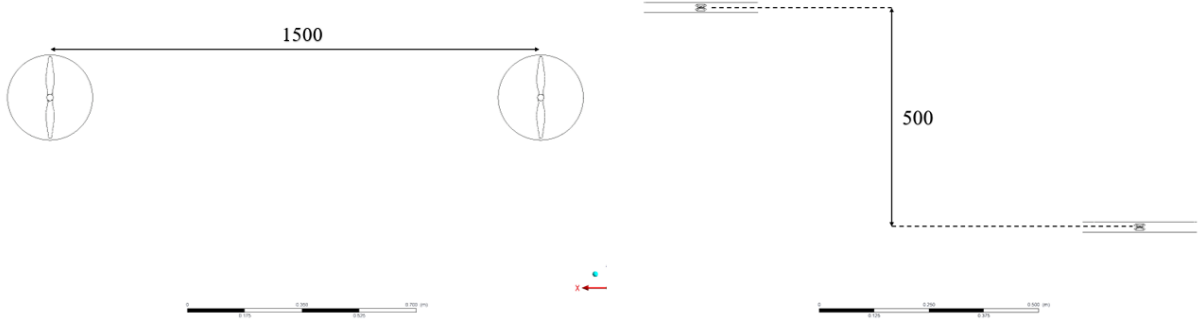
Aşağıda aralarında 1 ve 1.5 metre mesafe olan pervaneler için statik alan ölçüleri ve mesh kalitesi değerleri verilmiştir.



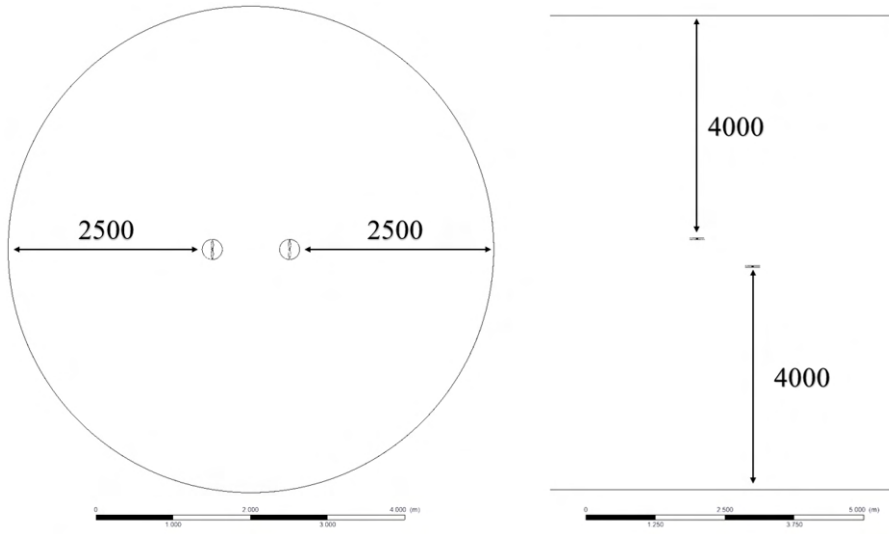
Şekil 5: Aralarında 1 metre olan iki pervane için dönen alanlar arası mesafe



Şekil 6: Aralarında 1 metre olan iki pervane için statik alan boyutları



Şekil 7: Aralarında 1.5 metre olan iki pervane için dönen alanlar arası mesafe

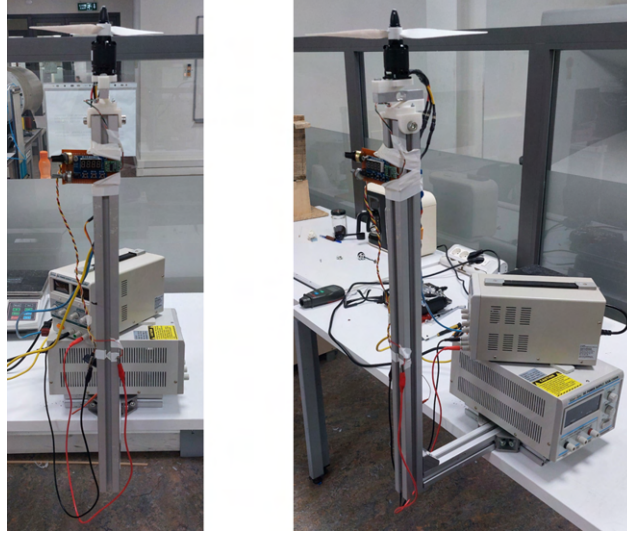


Şekil 8: Aralarında 1.5 metre olan iki pervane için statik alan boyutları

Tablo 2: İki pervane mesh kalitesi değerleri

Pervaneler Arası Mesafe	Mesh Özelliği	Değeri
1 metre	Skewness	0.6893
	Orthogonal Quality	0.3107
1.5 metre	Skewness	0.5998
	Orthogonal Quality	0.4001

CFD ile yapılan analizlerin sonuçlarının gerçek ile uyuşup uyuşmadığı kontrol edilmelidir. Bu sebeple kullanılan 10x5.5 pervanenin etkisinin ölçüleceği bir test düzeneği oluşturulmuştur.

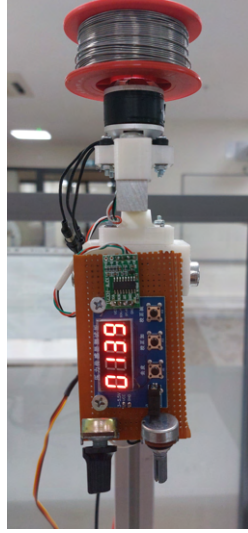


Şekil 9: Test düzeneği önden(sağ) yandan(sol)

Test düzeneği profil demirlerden tasarlanmıştır. Yer etkisinin itki ölçümüne etkisini azaltmak için düzeneğin yerden 1.75 metre yukarıda olacak şekilde tasarlanmıştır. Seçilen pervane 3D yazıcıdan basılmıştır. Motor olarak SunnySky X2820 fırçasız motor kullanılmıştır. Bu motorun seçilmesinin sebebi istenilen RPM'de (8300) çalışabilmesidir. İtkinin ölçümü için HX-711 gerilim ölçme sensörü kullanılmıştır. Bu sensör motor braketinin altına yerleştirilmiştir. Gerilim sensöründen alınan ağırlık verisi, motor montajının hemen altında bulunan ekrana yansıtılarak okunmuştur. Gerilim sensörünün kalibrasyonu için ağırlığı bilinen bir parça, her test öncesinde sensörün üzerine konarak kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 10: Kalibrasyon ağırlığı

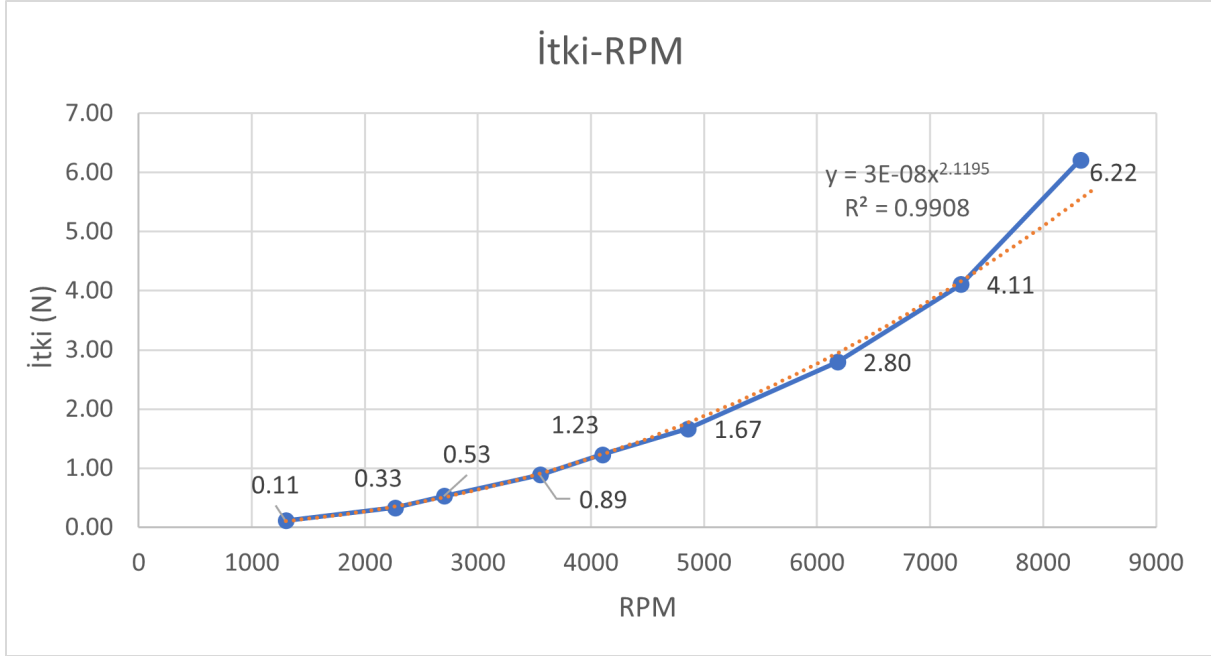


Şekil 11: Kalibrasyon ağırlığının gerilim sensörü ölçümü

RPM ölçümleri takometre ile yapılmıştır. Sahip olunan takometre, sadece yakın mesafelerden ölçüm yapabilmektedir. Bu RPM ölçümü sırasında ölçüm yapan kişi ve pervane bütünlüğü için tehlike arz etmektedir. Bu sebeple takometre ile sadece üç defa ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında motorun çektiği akım not alınmıştır. Böylece istenen RPM'in, takometre ile ölçülmeden güvenli bir şekilde akım miktarı gözetlenerek RPM-akım kalibrasyonu elde edilmesi sağlanmıştır. Bu yöntem ile belirlenen RPM değerleri için toplamda 30 ölçüm yapılmıştır. Her deney sırasında çeşitli sebeplerden kaynaklanacak olan rastgele hatanın en aza indirgenmesi önemli bir husustur. Bu sebeple her test sırasında her RPM değerinde itki ölçülmüş daha sonra motor kapatılıp bir sonraki test için kalibrasyonu tekrar yapılmıştır. Bu şekilde ortaya çıkabilecek olan raslantısal hatalar en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Elde edilen veriler "Sonuçlar ve Değerlendirme" başlığı altında verilecektir.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Tek pervanenin CFD analizi sonucunda itkisi 6.094 N olarak bulunmuştur. Yapılan testler sonucunda üssel tahminleme yapılmıştır. 8500 RPM'deki itki 6.390 N olarak bulunmuştur. Aşağıda yapılan testlerin grafiği verilmiştir.



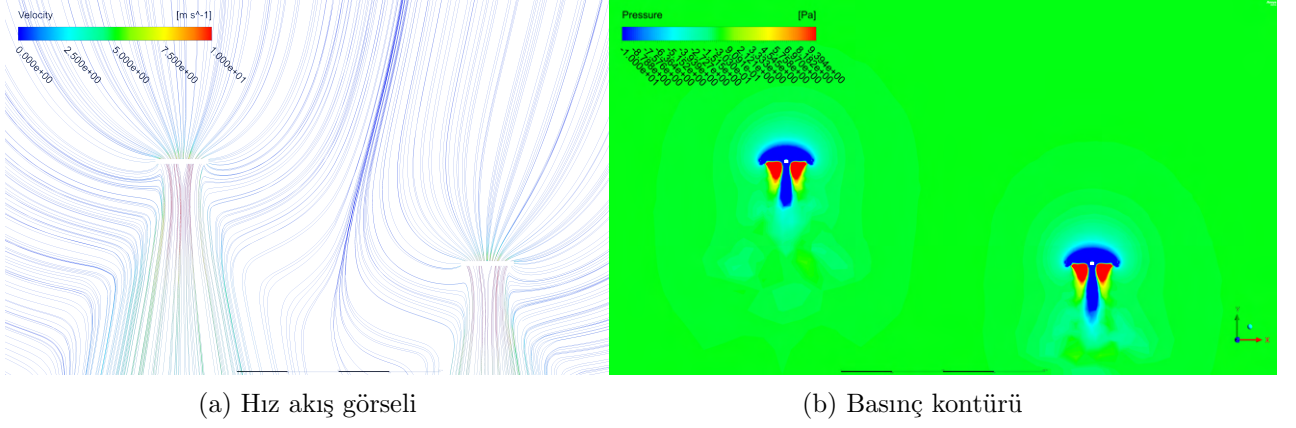
Şekil 12: Test sonucu İtki-RPM grafiği

İkili pervane testlerinde, pervaneler arası mesafe 1 metre iken üst pervanenin (traktör) itkisi 6.347 N, alt pervanenin (pusher) ise 6.365 N olarak bulunmuştur. Mesafe 0.5 metre artıldığında, pervaneler arası mesafe 1.5 metre olduğunda, üst pervanenin itkisi 6.352, alt pervanenin ise 6.404 N olarak bulunmuştur.

Tablo 3: İki pervane mesh kalitesi değerleri

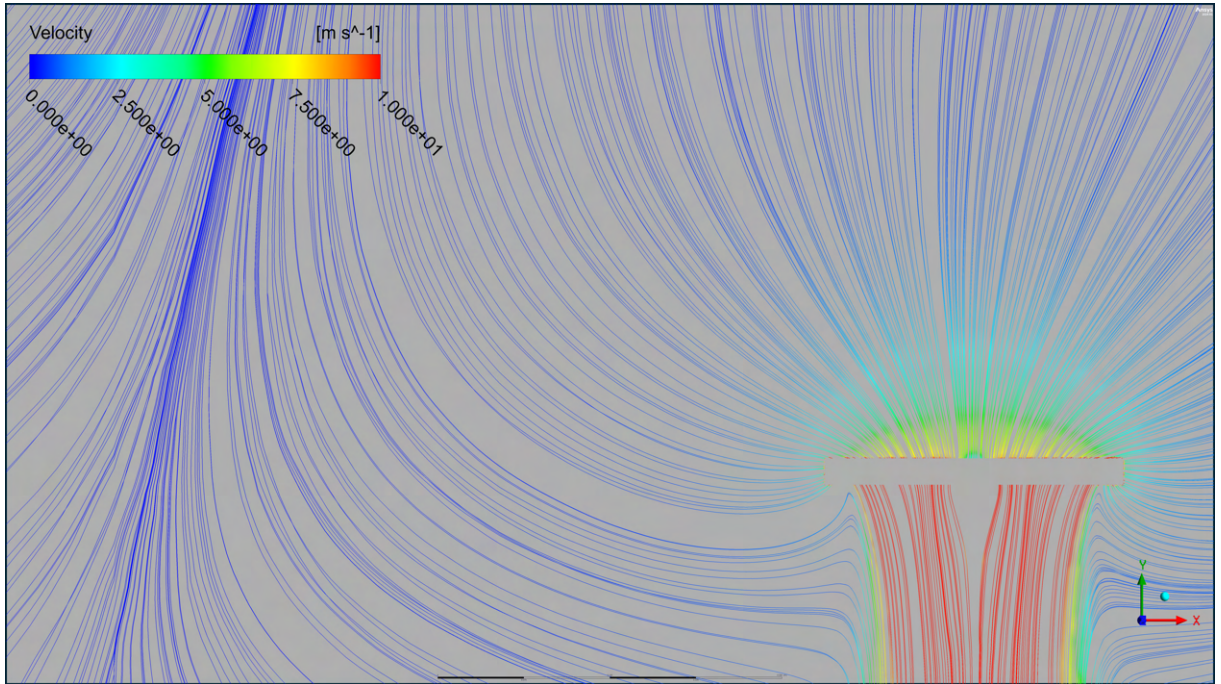
Pervaneler Arası Mesafe	Pervane	İtki Değeri (N)
1 metre	Üst pervane	6.347
	Alt pervane	6.365
1.5 metre	Üst pervane	6.352
	Alt pervane	6.404

Mesafe 1 metre iken üst ve alt pervane arasında 0.02 N fark açığa çıkmıştır. Mesafe 1.5 metre iken ise alt ve üst pervaneler arasında 0.05 N açığa çıkmıştır. Her iki mesafede de hem üst hem de alt pervaneler hesaplanan tek pervane itkisinden, 6.094 N, fazla itki üretmiştir. Bunun sebebi tahmini olarak aşağıda verilen hız akış görselinde de görülebileceği üzere bu itki artışının sebeplerinden birinin pervanelerin birbirinin hava akışlarını beslemesidir. Hava akışı arttıkça itki de artacaktır.



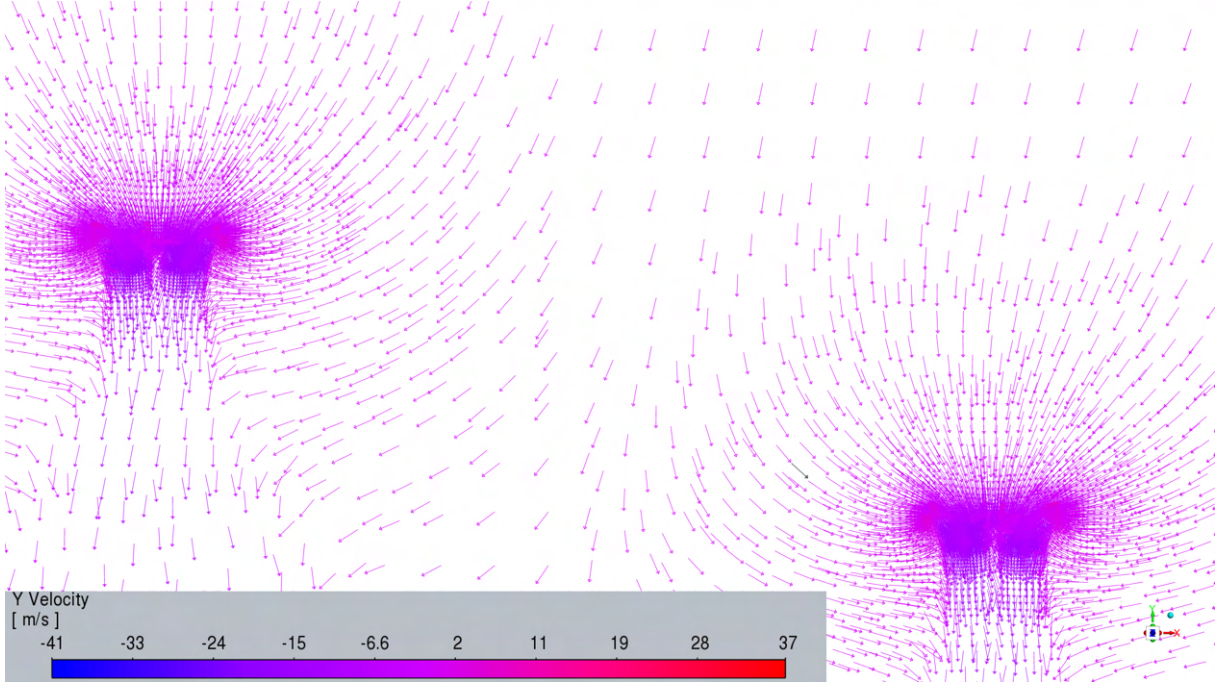
Şekil 13: CFD hız akış ve basınç kontürü görselleri

Şekil 13(a)'da ve (b)'de görülebileceği üzere, pervaneler birbirlerini besleyecek şekilde çalışmışlardır. Bu sebeple her iki pervanenin itkisi de tek pervane ölçümünden fazla çıkmıştır. Aynı zamanda üstte bulunan pervanenin çektiği havanın bir kısmı alttaki pervanenin hava debisini arttırmıştır. Bu da alt pervanenin itkisini üst pervaneye göre arttırmıştır.



Şekil 14: Alt pervane hız akış görseli

Yukarıda verilen görselde de gözüktüğü üzere üst pervanenin çektiği havanın bir kısmı pervaneler arasında kalan bölgeden alt pervaneye doğru yönelim göstermiştir. Ardından alt pervanenin yanından akışına katılıp itki artışına sebep olmuştur. Aşağıda verilen görselde hava akışının yönleri görülebilir.



Şekil 15: Y ekseninde vektörel hava akışı

Özet olarak, bu çalışmada CFD kullanarak yapılan testler ile sonucunda elde edilen itki ile aralarında %4.634 hata oranı bulunacak şekilde tek pervanenin itkisi simüle edilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak iki pervane için simülasyonlar yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda bu pervanelerin arasındaki mesafeler değiştirilerek öne sürülen birbirlerinin hava akışlarını besleme teorisine sayısal veri bulunabilir. Bunun yanı sıra tek pervane için yapılan deney iki pervane için de yapılarak ölçümlerin doğruluğu tamamıyla kanıtlanabilir.

Kaynaklar

- Akgül, M., Yurtseven, H., Demir, M., Akay, A., vd. (2016). İnsansız hava araçları ile yüksek hassasiyette sayısal yükseklik modeli üretimi ve ormancılıkta kullanım olanakları. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 66(1), 104-118. <https://doi.org/10.17099/jffiu.23976>
- Brandt, John & Selig, Michael. (2011). Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers. 10.2514/6.2011-1255.
- L. C. Hang, N. Athirah, N. Rosli, M. A. Wahid, and N. Othman, "CFD Analysis on Propeller at Varying Propeller Disc Angle and Advance Ratio," vol. 1, no. 1, pp. 82–95, 2022
- Y. Eraslan, E. Özen, and T. Oktay, "A Literature Review on Determination of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles Propeller Thrust and Power Coefficients," *Ejoms X – Int. Conf. Math. – Eng. – Nat. Med. Sci.*, no. 17-20 May, pp. 1–12, 2020.
- H. A. Kutty and P. Rajendran, "3D CFD simulation and experimental validation of small APC slow flyer propeller blade," *Aerospace*, vol. 4, no. 1, 2017, doi: 10.3390/aerospace4010010.
- Deters, R.W.; Krishnan, G.K.A.; Selig, M.S. Reynolds number effects on the performance of small-scale propellers. In *Proceedings of the 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Atlanta, GA, USA, 16–20 June 2014; pp. 1–43.
- Brandt, J.B.; Selig, M.S. Propeller Performance data at low reynolds numbers. In *Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Grapevine, TX, USA, 7–10 January 2013; pp. 1–18.
- Brandt, J.B.; Deters, R.W.; Ananda, G.K.; Selig, M.S. UIUC propeller data site. Available online: <http://mselig.ae.illinois.edu/props/propDB.html> (accessed on 1 November 2016).
- Oktay, T., & Eraslan, Y. (2020, November). Computational fluid dynamics (Cfd) investigation of a quadrotor UAV propeller. In *International Conference on Energy, Environment and Storage of Energy* (pp. 1-5).
- Loureiro, E. V., Oliveira, N. L., Hallak, P. H., de Souza Bastos, F., Rocha, L. M., Delmonte, R. G. P., & de Castro Lemonge, A. C. (2021). Evaluation of low fidelity and CFD methods for the aerodynamic performance of a small propeller. *Aerospace Science and Technology*, 108, 106402.