

RÜZGAR TÜNELİNDEKİ KANAT PROFİLİNİN DİKEY HAREKETİNİN MODELLENMESİ

Cem ONAT, Şaban ÇETİN
Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, pervane kanatlarına etkiyen kaldırma kuvvetinden yararlanılarak rüzgardan faydalı enerji elde edilir. Bunun için kanat profiline etkiyen kaldırma kuvvetinin analizi, gerek elde edilebilecek verimin belirlenmesinde ve gerekse de yatay eksenli rüzgar türbinlerinde devir sayısının aktif kontrolünde fevkalade önem taşımaktadır. Bu çalışmada, önce rüzgar tünelindeki bir kanat profilinin dikey hareketinin matematik modeli oluşturulmuştur. Daha sonra da elde edilen diferansiyel denklem Matlab programı kullanılarak 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi ile çözülüp, kanat profilinin dikey hareketi analiz edilmiştir. Ayrıca oluşturulan modelde farklı hücum açıları girilerek bir parametre çalışması yapılmıştır. Sonuçta sistemin sabit ve farklı frekanslardaki rüzgara verdiği cevap ortaya konmuştur. Kanadın anlık değişen rüzgara (dalgalanan rüzgara) verdiği cevap başlangıçta kendi doğal frekansında titreşmeye çalışması yönünde olmuştur. Fakat sonunda hem kendi doğal frekansından hem de dalgalanan rüzgarın frekansından daha küçük bir frekansta set olmuştur.

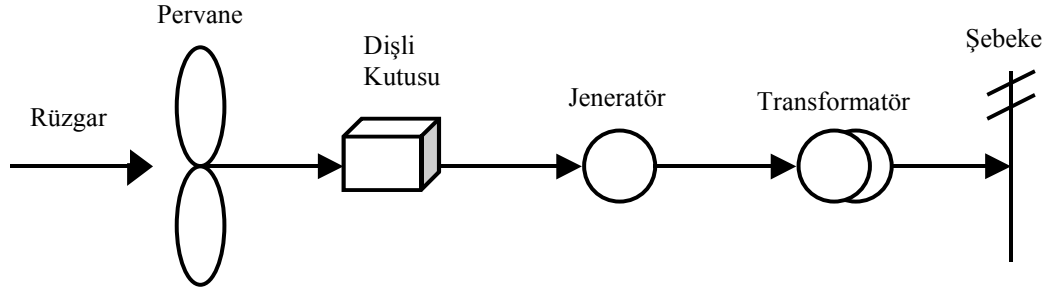
Anahtar sözcükler : Rüzgar, kanat, matlab

In the horizontal axis wind turbine, useful energy is gotten from the wind using lift force which affect propeller blade. Therefore analysis of the lift force which affect propeller blade is very important for both obtaining the efficiency and active control of revolution speed. In this study, the mathematic model of vertical motion of the blade profile was first found. After that obtained differential equation was solved using Matlab with fourth order Runge Kutta method and the vertical motion of blade profile is analyzed. Lastly a parameter work is done by changing the attack angle. Finally, the system results at constant and different wind frequency are obtained. Initially, blade vibrated with the natural frequency at the variable wind speed. But eventually, the system set at a lower frequency than both natural frequency and wind frequency.

Keywords: Wind, blade, matlab

GİRİŞ

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesinde, enerji dönüşüm zincirinin ilk halkası olan rüzgar pervanesi önemli bir rol oynar (Şekil 1). Rüzgardaki kinetik enerjinin pervane miline olabildiğince kayıpsız alınması elde edilecek enerjiyi etkileyen en önemli konudur. Bunun için rüzgar türbini pervanesinin rüzgardan maksimum enerjiyi elde edebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir [1]. Bunun için akım içerisindeki pervane kanadına etkiyen kaldırma kuvvetinin analizi gerek elde edilebilecek enerjinin belirlenmesinde ve gerekse de rüzgar türbinlerinde devir sayısının aktif kontrolünde fevkalade önem taşımaktadır. Jeneratör gücü nominal jeneratör güç değerinin üzerine çıktığı durumlarda, kanada etkiyen kaldırma kuvvetini azaltmak için, rotor kanatlarının kendi eksenlerinde döndürülmesiyle pitch açısının değişmesi sağlanır [2].



Şekil 1. Rüzgar Enerjisi Tesisi Prensip Şeması [1]

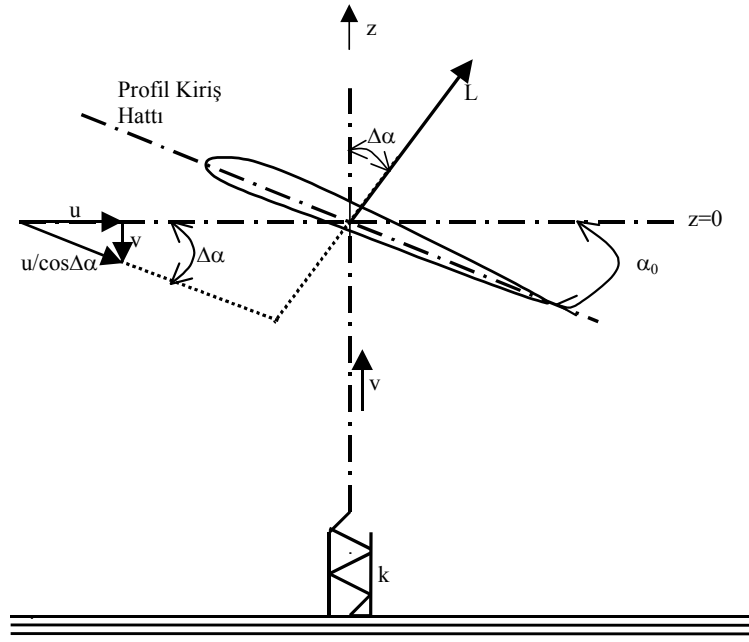
Rüzgar tüneline bir kanat profilinin dikey hareketinin modelinin kurulması konusunda yapılan bu çalışmada kanat profilinin dikey olarak hareketinin simülasyonu ile söz konusu kanat profilinin dikey hareketi irdelenecek ve farklı kanat konumlandırma açıları girilerek Matlab bilgisayar programı kullanılarak bir parametrik çalışma yapılacaktır.

PROBLEM

Şekil 2'de gösterildiği gibi bir k yay sabitine sahip yayla sadece dikey yönde hareketine izin verilecek şekilde, tek serbestlik dereceli olarak rüzgar tüneline bağlanmış bir kanat profilinin farklı rüzgar hızlarında ve farklı hücum açılarında dikey yöndeki yer değiştirmesi ve dikey yöndeki hızın zamana bağlı olarak analizi yapılacaktır.

TEORİ

Şekil 2'deki gibi bir akış içindeki kanada, akış yönüne dik olarak bir L kaldırma kuvveti etki eder. Şekilde ifade edilen, v , kanadın dikey doğrultudaki hızı; z , kanadın dikey doğrultudaki yer değiştirmesi; α , yatay eksen (rüzgar doğrultusu) ile kanadın relatif hız vektörü arasındaki açı olmak üzere; hücum açısı (α) ve kaldırma kuvveti (L) aşağıdaki gibi ifade edilir.



Şekil 2. Rüzgar Tünelindeki Kanat Profiline Dikey Hareketi

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha = \alpha_0 - \tan^{-1}(v/u) \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot (u^2 + v^2) \cdot S \cdot c_l \quad (2)$$

Buradaki, α_0 , kanat profil kiriş hattının yatay ile yaptığı açısı; u , rüzgar hızı; ρ_1 , havanın yoğunluğu; S , akım içindeki karakteristik alan ve c_l ise kaldırma kuvveti katsayısıdır. c_l katsayısı belirli bir kanat formu (kanat geometrisi) için Reynold sayısı ve pürüzlülüğün birer fonksiyonu olarak, c_D direnç kuvveti katsayısı ile birlikte kanat profil kataloglarında verilmektedirler [3]. Şekil 3'de bazı kanat profilleri verilmiştir[4].

Şekil 3'de gösterilen bu kanat profillerinden, NACA 4415 ve LS-1 profillerine ait kaldırma kuvveti katsayılarının hücum açıları ile nasıl değiştiği Tablo 1'de verilmektedir [5].

Tablo 1. Farklı Hücum Açılarında NACA 4415 ve LS-1 Profillerine Ait Kaldırma Kuvveti Katsayıları

Kanat Profili	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 5^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 15^\circ$
NACA 4415	0.4	0.875	1.225	1.2
LS-1	0.375	0.4	1.5	2

Bu çalışmada c_1 kaldırma kuvveti katsayısını, akışın Reynold sayısından ve kanat profili geometrisinden bağımsız olarak, $-18^\circ < \alpha < +18^\circ$ aralığında, sadece $c_1 = 2p$ a fonksiyonu ile ifade edilebildiği kabulü yapılarak lineerleştirme yapılmıştır.

Profilin hareket denklemini, k , profili rüzgar tüneline kanadı bağladığımız yayın yay katsayısı olmak üzere;

$$\frac{dz}{dt} = v \quad \text{ve} \quad m \cdot \frac{dv}{dt} = -k \cdot z + L \cdot \cos(\Delta\alpha) \quad (3)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada $\cos(\Delta\alpha) = u / \sqrt{u^2 + v^2}$ ve denklem (2) deki L ifadesi yerine konursa;

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -k \cdot z + \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot S \cdot c_1 \cdot u \cdot \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad (4)$$

elde ederiz. m kütle ve g yerçekimi ivmesi olmak üzere ve

$$T = t / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{m/k}), \quad Z = z / (m \cdot g / k)$$

$$U = \frac{u}{\frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}}, \quad V = \frac{v}{\frac{g}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}} \quad (5)$$

olacak şekilde; t , z , u , v değişkenlerini boyutsuz T , Z , U , V değişkenlerine atayarak boyutsuzlaştırma işlemi yapılırsa,

$$\beta = \rho_1 \cdot g \cdot S / 2 \cdot k \quad (6)$$

olmak üzere, yeni ifademiz:

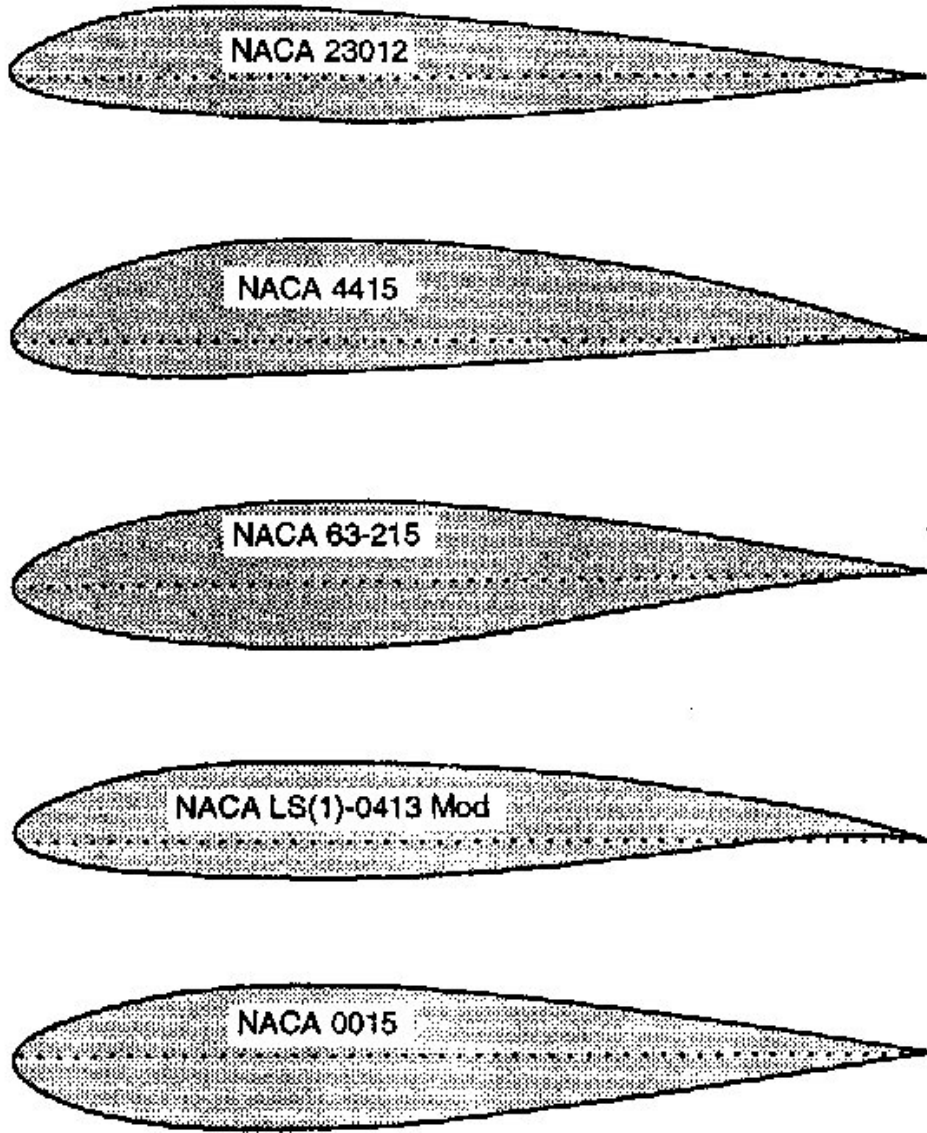
$$\frac{dZ}{dT} = V \quad \text{ve}$$

$$\frac{dV}{dT} = -(2 \cdot \pi)^2 \cdot Z + \beta \cdot c_1 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

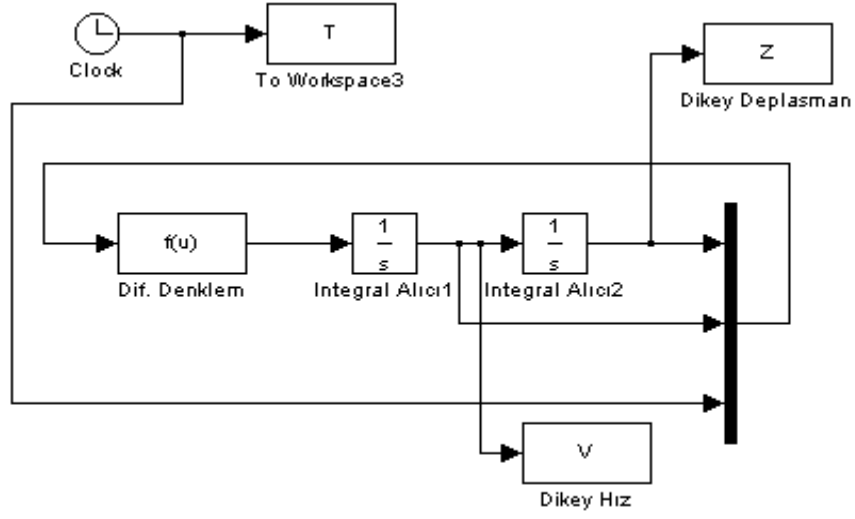
şeklinde bir diferansiyel denklem sistemi haline gelir[6]. Bu denklem sistemini,

$$\frac{d^2 Z}{dT^2} = -(2 \cdot \pi)^2 \cdot Z + \beta \cdot c_1 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \quad (8)$$

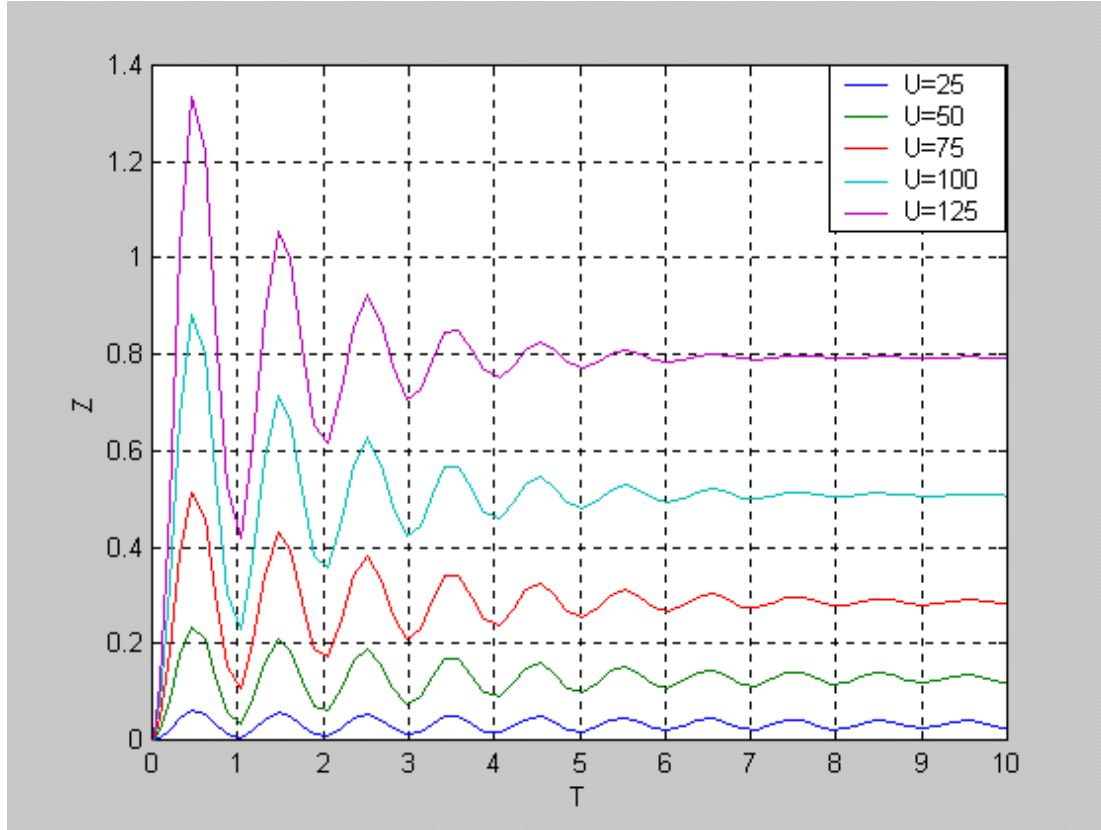
biçiminde de yazabiliriz.



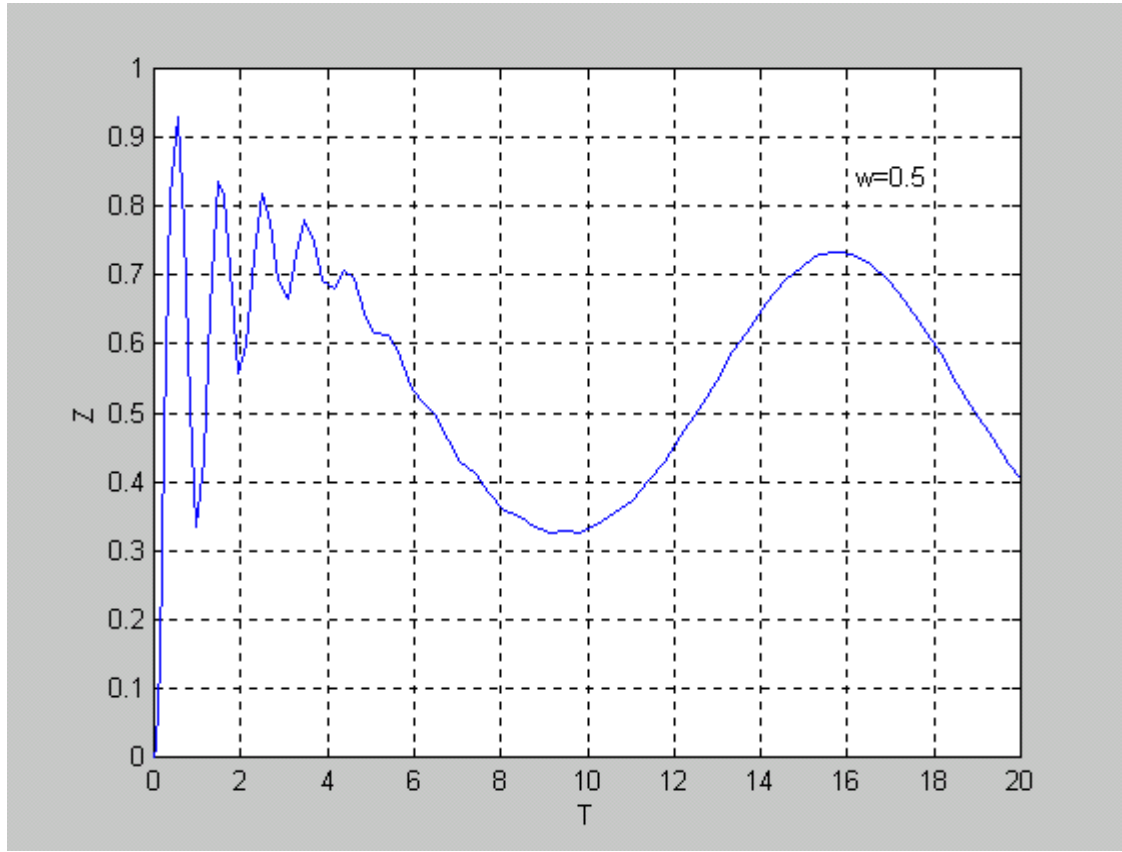
Şekil 3. Bazı Kanat Profilleri [4]



Şekil 4. Matlab-Simulink Blok Diyagramı.

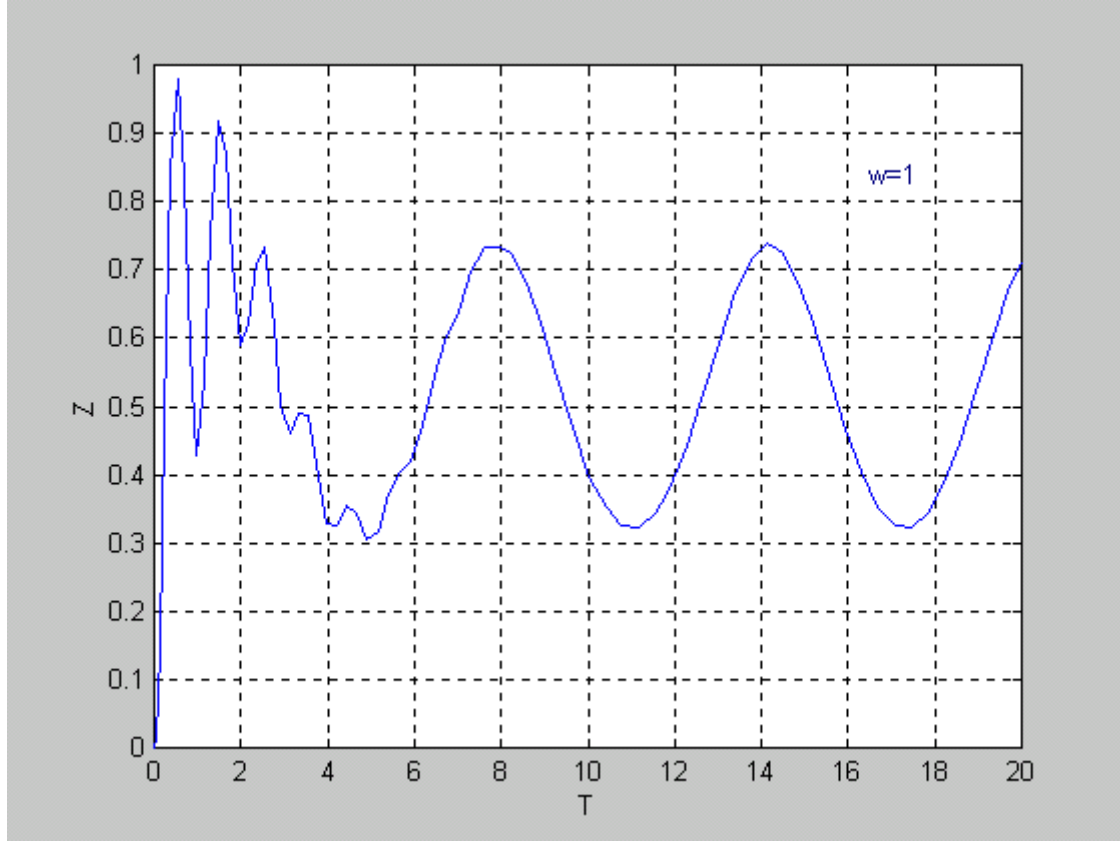


Şekil 5. Beş Farklı Rüzgar Hızı Etkisinde Kanattaki Yer Değiştirmelerin Zamanla Değişimi.



Şekil 6. Kanat Profiline Kararsız Rüzgara $w=0.5$ İçin Verdiği Yer Değiştirme

Cevabı



Şekil 7. Kanat Profilinin Kararsız Rüzgara $w=1$ İçin Verdiği Yer Değiştirme

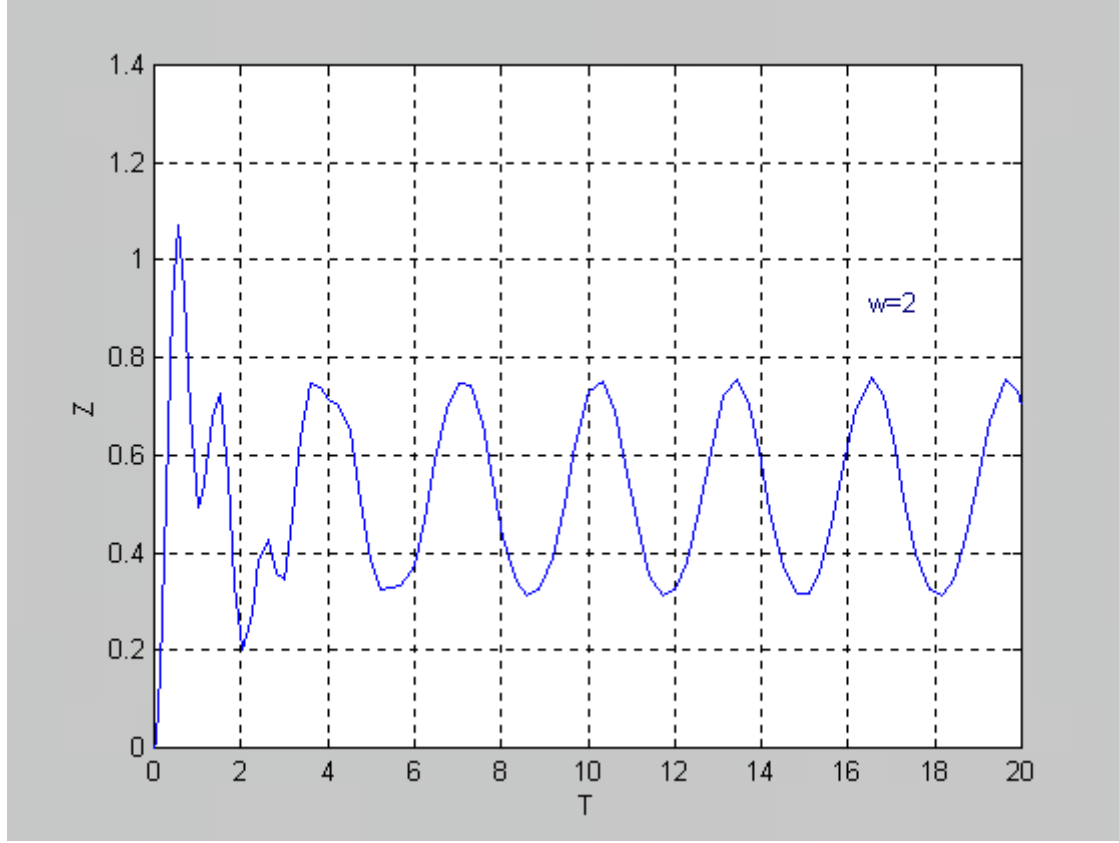
Cevabı

ANALİZ

Şekil 2'deki gibi bağlanmış bir kanat profilinin dikey hareketinin modelini kurduğumuz denklem 7'de verilen iki adet birinci dereceden diferansiyel denklem takımını 4. dereceden Runge-Kutta metodu ile $T=0-20$ aralığında, $h=0.1$ adım aralığında ve $r_1=1.22 \text{ kg/m}^3$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $m=3 \text{ kg}$, $S=0.3 \text{ m}^2$, $k=980 \text{ kg/s}^2$, $\alpha_0=10^\circ$, olacak şekilde Matlab-Simulink de, Şekil 4'de de genel olarak gösterildiği gibi bir blok diyagram oluşturularak yapılmıştır.

Şekil 5 de beş farklı sabit rüzgar hızında sistemimizin verdiği cevap grafik olarak ortaya konulmaktadır.

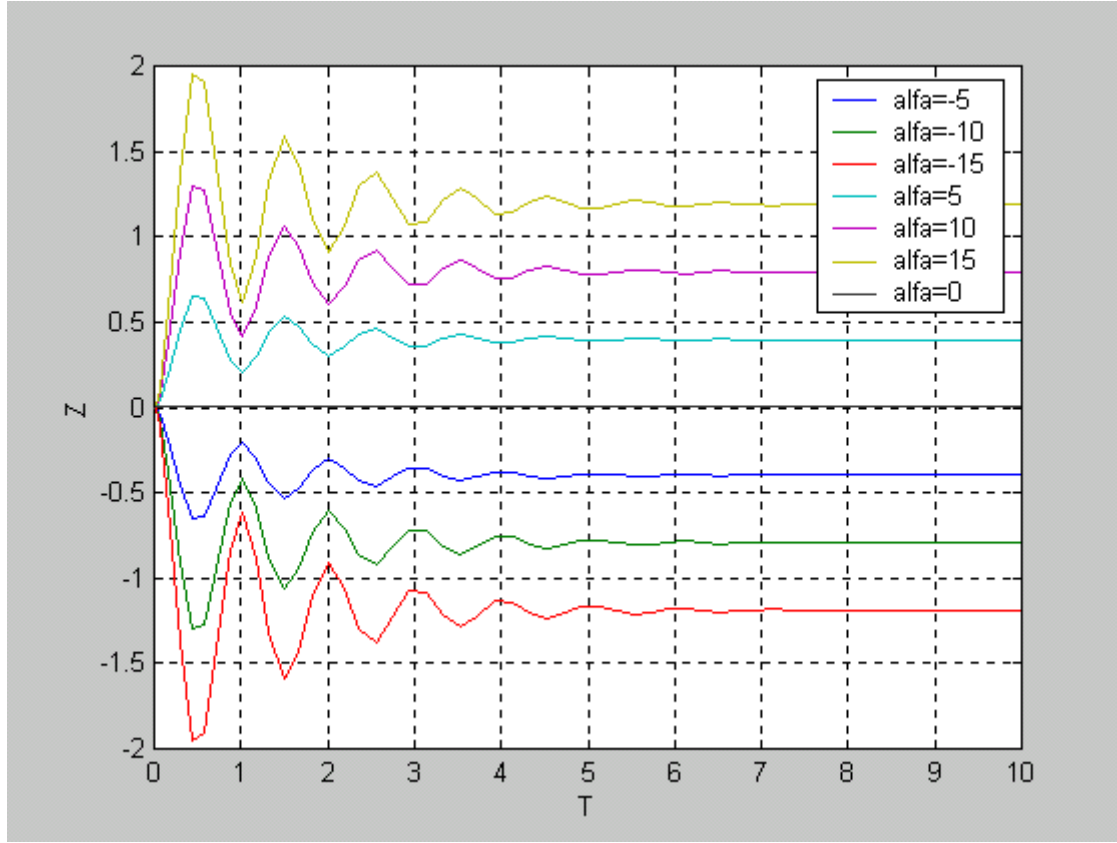
Şekil 6-8'de rüzgar tünelineki kanadımızın sırasıyla $w=0.5$, $w=1$ ve $w=2$ 'de, ile ifade edilebilen kararsız rüzgar hızına maruz kaldığı durumda verdiği cevabın grafik ifadesi verilmiştir. Burada $U=100$ ve $\alpha=0.2$ dir. Rüzgar hızını bu şekilde değiştirdiğimiz zaman artık kaldırma kuvveti katsayısı (c_l) sadece V ye bağlı olarak değil aynı zamanda T ye de bağlı olarak değişen bir fonksiyon haline gelmektedir.



Şekil 8. Kanat Profiline Kararsız Rüzgara $w=2$ İçin Verdiği Yer Değiştirme

Cevabı

Şekil 9'da ise yedi farklı hücum açısında, $U=125$ hızındaki rüzgarda kanadın verdiği cevap ortaya konmuştur. Burada kaldırma kuvveti katsayısı, Reynold sayısından ve kanat profili geometrisinden bağımsız olarak ifade edilebildiği kabulü yapılarak lineerleştirme yapılmıştır. Ancak gerçekte, NACA 4415 profilinin kaldırma kuvveti katsayısı karakteristiği $\alpha = 0^\circ-10^\circ$ hücum açısı aralığında doğrusal olarak değişmektedir. Buna rağmen hücum açısının sıfır değerinde de (kılıçlama pozisyonunda) bir kaldırma mevcuttur. Yani karakteristik orjinden geçmemektedir. Bunun sebebi profilin simetrik olmamasıdır. Simetrik olmayan profillerde α sıfır olsa bile, kanat etrafında bir sirkülasyon doğar ve sırt tarafında küçükte olsa bir basınç düşmesi olur. Hücum açısı büyüdükçe, özellikle kanadın sırt tarafındaki basınçlar azalır, akım çizgilerinin eğrilikleri artar ve cıdardan ayrılma tehlikeleri baş gösterir [7].



Şekil 9. Yedi Farklı Başlangıç Konumlandırma Açısında U=125 de Kanadın Yer Değiştirme Cevabı

SONUÇ

Şekil 5'de beş farklı rüzgar hızında α_0 başlangıç konumlandırma açısı 10° de sistemimizin verdiği cevap grafik olarak ortaya konulmuştur. Bu grafikten anlaşıldığı üzere rüzgar hızı arttıkça sistemin yer değiştirme genliğinin arttığı ve yaklaşık olarak Tablo 2'de verilen değerlerde set olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Farklı Rüzgar Hızlarında Kanadın Set Olma Değerleri

Hız	25	50	75	100	125
Yer Değiştirme	0.032	0.125	0.285	0.508	0.794

Şekil 6-8'de rüzgar tünelineki kanadın sırasıyla $w=0.5$, $w=1$ ve $w=2$ de, ile ifade edilebilen değişken rüzgar hızına maruz kaldığı durumda verdiği cevabın grafik ifadesi verilmiştir. Burada $U=100$ ve $\alpha=0.2$ dir. Rüzgar hızını bu şekilde değiştirdiğimiz zaman artık kaldırma kuvveti katsayısı (c_l) sadece V ye bağlı olarak değil aynı zamanda T ye de bağlı olarak değişen bir

fonksiyon haline gelmektedir. Şekil (5, 6, 7) de görüldüğü gibi kanadın anlık değişen rüzgara (dalgalanan rüzgara) verdiği cevap başlangıçta kendi doğal frekansında titreşmeye çalışması yönündedir. Fakat sonunda hem kendi doğal frekansından hem de dalgalanan rüzgarın frekansından daha küçük bir frekansta set olmaktadır ve kanadın bu periyodik hareketinin sinüzoidal bir hareket olmadığı da görülmektedir.

Şekil 8 de ise yedi farklı hücum açısında, $U=125$ hızındaki rüzgarda kanadın verdiği cevap ortaya konmuştur. Buradan görüldüğü gibi negatif hücum açılarında negatif kaldırma kuvveti meydana gelmektedir. Bu çalışmada c_l kaldırma kuvveti katsayısını, akışın Reynold sayısından ve kanat profili geometrisinden bağımsız olarak sadece $c_l=2 \pi a$ fonksiyonu ile ifade edilebildiği ($-18^\circ < \alpha < +18^\circ$ aralığında) kabulünün yapıldığı unutulmamalıdır. Ancak gerçekte, kanat profillerinin kaldırma kuvveti katsayısı karakteristiği $a = 0^\circ-10^\circ$ hücum açısı aralığında doğrusal olarak değişmektedir. Buna rağmen hücum açısının sıfır değerinde de (kılıçlama pozisyonunda) bir kaldırma mevcuttur. Bunun sebebi profil giriş hattının altındaki ve üstündeki kalınlıkların simetrik olmamasıdır. Simetrik olmayan profillerde hücum açısı sıfır olsa bile, kanat etrafında bir sirkülasyon doğar ve sırt tarafında küçükte olsa bir basınç düşmesi olur. Hücum açısı büyüdükçe, özellikle kanadın sırt tarafındaki basınçlar azalır, akım çizgilerinin eğrilikleri artar ve cıdardan ayrılma tehlikeleri baş gösterir.

KAYNAKÇA

1. **Özdamar A., M. G. Kavas**, "Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı Üzerine Bir Araştırma", Erciyes Üniv. Güneş Günü Sempozyumu '99 Bildiri Kitabı, 27 Haziran, 1999.
2. "Wind Energy Information Brochure", German Wind Energy Institute, DEWI, June 30th, 1998.
3. **Hickok F.**, "Handbook of Solar and Wind Energy", Cahnners specia report, 1975.
4. **Spera D. A.**, "Wind Turbine Technology", ASME Press, New York, 1994, 215-287
5. **Hau E.**, "Windkraftanlagen", B. G. Toubner verlag, Stuttgart, 1996, 120-151
6. **Chuen-Yen Chow**, "An Introductuion to Computational Fluid Mechanics", John Wiley & Sons.
7. **Canbazoglu S., Onat C.**, "Türkiye'nin Rüzgar Enerjisi Potansiyeli ve Malatya İli İçin Bir Rüzgar Türbini Pervanesi Dizaynı", Kayseri III. Havacılık Sempozyumu, 10-12 Mayıs 2000, Kayseri.