

RÜZGAR ENERJİSİNDEN MAKSİMUM GÜÇ ÜRETİMİ VE VERİMİ İÇİN SALINIR KANAT KESİTLERİNİN SALINMA HAREKETİ ENİYİLEMESİ

Mustafa Kaya* ve Munir Elfarra§
THK Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Rüzgâr olarak düşünülen sabit hızlı bir hava akışı ortamında salınma hareketi yapan bir kanat kesitinin hareket parametreleri maksimum güç üretimi ve/veya verimi elde etmek için eniyilenmiştir. Kanat kesiti etrafındaki zamana bağlı laminar akış alanları, paralel hesaplama ortamında çalışan bir Navier-Stokes çözücü ile elde edilmiştir. Periyodik salınma hareketi, sinüzoidal dalma ve yunuslama hareketlerinin bir doğrusal bileşimi olarak tanımlanmıştır. Eniyileme için Cevap Yüzeyi Yöntemi kullanılmıştır. Eniyileme değişkenleri olarak salınma hareketini tanımlayan tüm parametreler kullanılmıştır: salınma frekansı, dalma genliği, yunuslama genliği ve dalma ile yunuslama hareketleri arasındaki faz farkı. İncelenen durumlar için dalma genliği arttıkça elde edilen maksimum güç katsayısının da arttığı gözlenmiştir. Eniyi güç üretim veriminin %40 seviyelerinde olduğunun gösterilmesi ile salınır kanatların türbinlere karşı güçlü bir alternatif olduğu değerlendirilmiştir.

GİRİŞ

Fosil kaynaklı yakıtların giderek azalması, buna paralel olarak petrol fiyatının artması ve uluslararası kamuoyunda çevre kirliliğine karşı tepkilerin zamanla büyümesi neticesinde yenilenebilir kaynakları kullanarak güç üretilmesi düşüncesi yaygınlaşmıştır.

Hava ve su akışından yararlanarak güç elde edilmesi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ilgi çekici bir alternatiftir. Bu yöntemle enerji üretimi için genelde rüzgâr türbinleri gibi döner sistemler kullanılır. Döner kanatların kullanıldığı geleneksel rüzgâr türbinleri ile ilgili yapılan çalışmaların aksine salınır kanatlar kullanılarak rüzgâr enerjisinden güç üretilmesi üzerine yürütülen araştırmaların tarihi yakın geçmişten öteye gitmemektedir.

Literatürde konu ile ilgili ilk kaynak olarak [McKinney ve DeLaurier, 1981] göze çarpmaktadır. McKinney ve DeLaurier, çırpan bir kanat üzerindeki hava akışını analitik hesaplama ve deneysel çalışma yöntemleri ile incelemişler ve sistemin fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarının neticesinde, hava içerisinde yunuslama ve dalma hareketini birlikte yapan bir kanatın güç

*Yrd. Doç. Dr., Pilotaj Böl., E-posta: mkaya@thk.edu.tr

§Yrd. Doç. Dr., Pilotaj Böl., E-posta: melfarra@thk.edu.tr

üretebileceği sonucunu elde etmişlerdir. Yunuslama ve dalma genlikleri, çırpma frekansı ve yunuslama ile dalma arasındaki faz farkı uygun değerlerde olduğunda güç üretim veriminin %30'lara yaklaştığını göstermişlerdir.

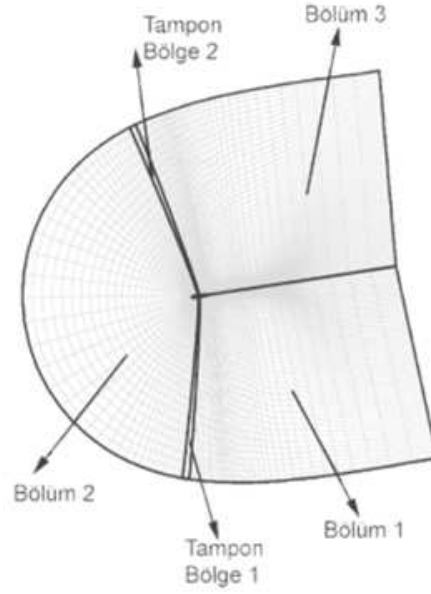
Çırpan/salınır kanatlara olan ilgi McKinney ve DeLaurier'nin 1981 tarihli çalışmasından sonra uzun yıllar boyunca güç üretimi yerine itki üretimi odaklı olmuştur. Rüzgârdan güç üretimi için salınır kanat kullanılması ile ilgili dikkat çekici iki çalışma Jones ve grubu tarafından gerçekleştirilmiştir [Jones, Davids ve Platzer, 1999; Jones, Lindsey ve Platzer, 2003]. [Jones, Davids ve Platzer, 1999] çalışmasında havada çırpan tek bir kanat, [Jones, Lindsey ve Platzer, 2003] çalışmasında ise su içerisinde ardı sıra çırpan iki kanat (*İng: flapping wings in tandem*) sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Jones ve grubu, sayısal incelemeyi 2-B (iki boyutlu) olarak yapmışlardır. Bu çalışmalarda, yüksek verim sağlayan sinüzoidal dalma ve yunuslama hareketleri araştırılmıştır.

[Kinsey ve Dumas, 2008] çalışmasında sinüzoidal dalma ve yunuslama yapan bir kanatın salınma hareketi parametrik olarak 2-Boyutlu hesaplama ortamında değerlendirilmiştir. Kinsey ve Dumas, %35 civarında güç üretim verimi elde edilebileceğini gözlenmişlerdir. Gücün ve güç üretim veriminin maksimize edilmesinde dinamik tutunmazlığın (*İng: dynamic stall*) önemli bir rol oynadığını görmüşlerdir. Kinsey ve Dumas, salınma döngüsü içerisinde hücum kenarı girdabının oluşma zamanının ve yayılma sürecinin kontrol edilmesi ile yüksek güç üretim verimi elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Sinüzoidal olmayan dalma ve yunuslama hareketlerinin daha yüksek itki sağlayabileceğinin gösterildiği çalışmayı [Kaya ve Tuncer, 2007] örnek alan Platzer ve grubu [Platzer, Ashraf, Young ve Lai, 2010], yürüttükleri deneysel çalışma sonucunda, sinüzoidal salınma yerine kare dalgalı salınma hareketi kullanıldığı zaman güç üretme kapasitesinin arttırılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, ardı sıra iki kanat yapılandırması tercih edildiğinde kanat başına düşen güç üretiminin, tek bir salınır kanatın sağladığı güç üretiminden yüksek olduğunu gözlemişlerdir.

Ashraf ve grubu [Ashraf, Young, Lai ve Platzer, 2011], yayınladıkları çalışmada rüzgâr ve su enerjisinden güç elde etmek için bir salınır kanat düzeneği önermişlerdir. Bu çalışmanın genel yapısını oluşturan sayısal hava akışı hesaplamaları içinse 2-B Navier-Stokes çözücü kullanmışlardır. Sinüzoidal olmayan dalma ve yunuslama hareketlerinin bileşimi ile yapılan salınmanın sinüzoidal dalma ve yunuslama hareketine göre %17 daha fazla güç ve %15 daha yüksek güç üretim verimi sağladığını hesaplamışlardır. Ayrıca, Ashraf ve grubu, ardı sıra iki kanat yapılandırmasını da incelemişlerdir. İnceledikleri durumlar için bu yapılandırmanın ortalama güç üretimi açısından avantajlı olmadığını görmüşlerdir. Ancak, zamana bağlı güç üretiminin salınma döngüsünün büyük bir bölümü boyunca pozitif değerlerde bulunmasının, önerdikleri düzenek açısından avantaj sağladığını belirtmişlerdir.

Kinsey ve Dumas, su akışı içinde iki salınır kanattan maksimum güç üretimi verimi sağlanması için ardı sıra yerleştirilmiş kanatlar için optimal yerleşim yapılandırmasını sayısal çalışma ile belirlemeye çalışmışlardır [Kinsey ve Dumas, 2012]. Bunun için 2-B Navier-Stokes çözücü kullanmışlardır. Ardı sıra yerleştirilmiş kanat yapılandırmasında arkadaki kanat uygun konumlandırıldığında çok yüksek güç üretimi verimi elde edildiğini gözlemişlerdir. Aynı araştırmacılar, su akışı içinde salınma hareketi yapan kanatlardan elde edilen güç ve güç üretim verimini 2 ve 3 boyutlu çözücü sonuçlarına göre de karşılaştırmışlardır [Kinsey ve Dumas, 2012]. Karşılaştırmalarına göre, 3-B çözümler, 2-B çözümlere kıyasla benzer bir eğilim göstermiş ve bağıl olarak %20-%30 daha az verim sağlamıştır. 3-B çözümlerde kanat ucu (*İng: end plate*) kullanıldığında ise 3-B çözümler ile 2-B çözümler arasındaki verim farkının %10'dan daha fazla olmadığını gözlemişlerdir. Bu gözlemden yola çıkarak, Kinsey ve Dumas, uzun hesaplama süreleri gerektiren 3-B çözümler yerine çok kısa sürelerde elde edilebilen 2-B çözümlerin düzeltme faktörleri (*İng: correction factors*) ile doğrulanmasının yeterli olacağını belirtmişlerdir.



Şekil 1: Bölünen çözüm ağı

Bu çalışmada yüksek güç ve/veya güç üretim verimi sağlayan salınma hareketi parametrelerinin (dalma ve yunuslama hareketlerinin frekansı, genlikleri ve aralarındaki faz farkı) eniyileme (*İng: optimization*) yöntemleri kullanılarak belirlenmesi ve literatürdeki konu ile ilgili boşluğun doldurulması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, sinüzoidal dalma ve yunuslama hareketlerinin doğrusal bileşimi olarak hareket eden salınır kanatlar sayısal olarak incelenecektir. Sayısal inceleme, zamana bağlı laminar akışların hesaplanması sonucunda elde edilen aerodinamik kuvvetler kullanılarak yapılacaktır. Akış çözümleri, paralel hesaplama ortamında yapılacaktır.

YÖNTEM

Navier-Stokes Çözücü

Kanat kesiti etrafındaki akışların hesaplanması için sıkışabilir viskoziteli (*İng: incompressible and viscous*) akışların yapısal çözüm ağında (*İng: structured grid*) incelenmesine olanak sağlayan bir Navier-Stokes çözücü kullanılmıştır [Kaya ve Tuncer, 2007, 2008, 2009]. Yapısal çözüm ağı parçalara bölünerek akış çözümleri paralel olarak elde edilmiştir (Şekil-1). Kanat kesitinin çarpma hareketi, kanat kesiti ve etrafındaki C-tipi ağ hareket ettirilerek sağlanmıştır.

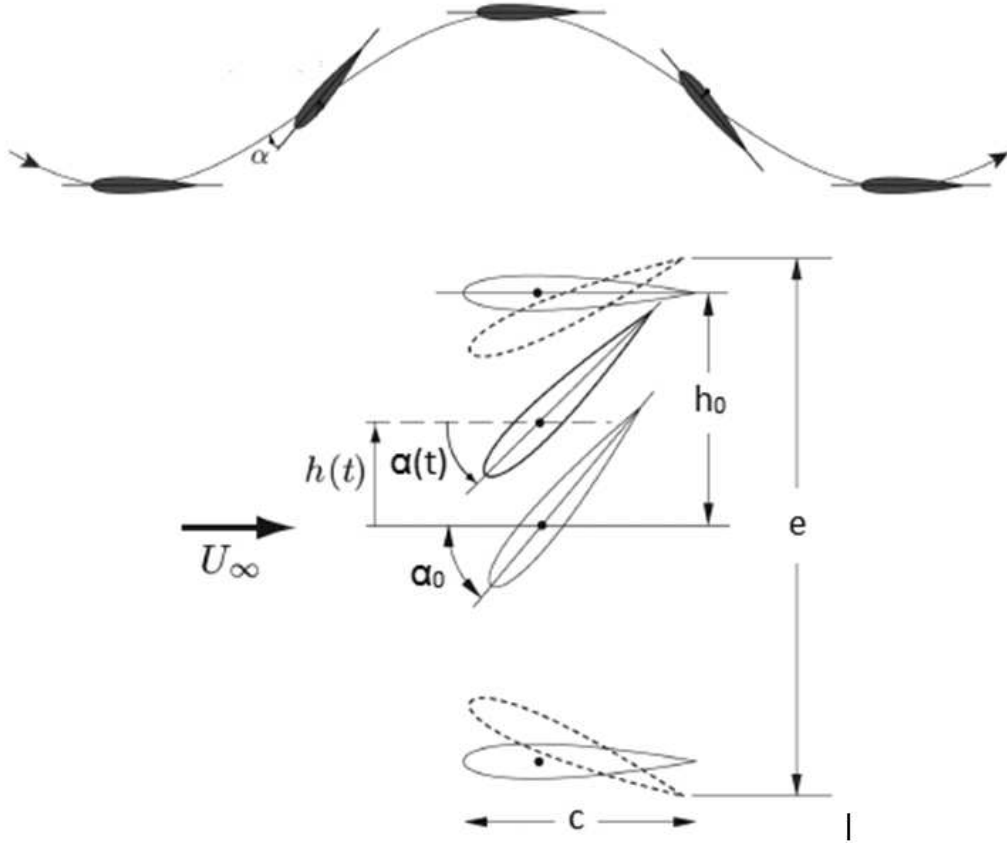
Çözüm ağının parçalanmış her bir bölümünde, iki boyutlu, ince-tabaka, Reynolds ortalımalı Navier-Stokes denklemleri yüksek korunumlu olarak çözülür. Ağlararası sınır noktalarında karşılıklı akış değişkenleri alışverişi yapılarak sınır koşulları sağlanır. Akı hesaplamaları, akış yönü (*İng: upwind*) yaklaşımına dayalı üçüncü dereceli Osher Akı Farkı Ayrıştırma yöntemi ile içsel (*İng: implicit*) zaman integrasyonu kullanılarak yapılır.

Salınma Hareketi

Kanat kesitinin zamana bağlı sinüzoidal dalma (h) ve yunuslama (α) pozisyonları şu şekilde tanımlanmıştır:

$$h = -h_o \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$\alpha = -\alpha_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$



Şekil 2: Dalma, $h(t)$ ve yunuslama, $\alpha(t)$ hareketleri

Burada, h_o , dalma genliği, α_o , yunuslama genliğidir. $\omega = 2\pi f$, dairesel frekans ve t , zamandır. $f = 1/T$, salınma frekansı ve T de salınma periyotudur. Hareketleri tanımlayan son parametre olan ϕ ise dalma ve yunuslama arasındaki faz farkıdır. h ve h_o , veter (*İng: chord*) uzunluğu c ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil-2, salınma hareketini görsel olarak sunmaktadır. Şekilde görülen e parametresi, dikeyde yani dalma hareketi ekseninde boyunca kanat kesitinin yaptığı maksimum yolu (*İng: total excursion*) ifade etmektedir. U_∞ , serbest akış hızını ve ok yönü de akış yönünü göstermektedir.

Bir kanat kesitinin salınma hareketi incelenirken literatürde farklı parametreler de değerlendirilmeye alınmıştır. Bu çalışmada göz önünde bulundurulmuş diğer parametreler şunlardır: indirgenmiş frekans, k , etkin hücum açısı, α_{eff} ve kılıçlama parametresi, χ :

$$k = \frac{\omega c}{U_\infty} \quad (3)$$

$$\alpha_{eff}(t) = \alpha(t) - \arctan\left(\frac{hc}{U_\infty}\right) \quad (4)$$

$$\chi = \frac{\alpha_o}{\arctan(kh_o)} \quad (5)$$

Salınma hareketi neticesinde üretilen anlık güç $P(t)$ yerine boyutsuz bir değişken olan anlık güç katsayısı $C_P^*(t)$ değerlendirilmiştir. $C_P^*(t)$ 'nin tanımı Denklem-6'da verilmiştir. Denklemdeki ρ , serbest akış yoğunluğudur. Bir salınma periyodu boyunca ortalama olarak elde edilen güç katsayısı ise C_P ile gösterilmiş ve Denklem-7'de tanımlanmıştır. Denklemde görülen $C_l(t)$ ve $C_m(t)$, anlık kaldırma kuvveti ve moment katsayılarıdır. Moment hesabı, yunuslama merkezine göre yapılmıştır.

Güç üretim verimi, η ise Denklem-8'deki gibi tanımlanmıştır. Bu tanım, elde edilen gücün kullanılabilir güce oranından yola çıkılarak yapılmıştır. Kullanılabilir güç, kanat kesiti tarafından taranan alan içinden (akış penceresi) geçen akışın toplam gücü olarak değerlendirilmiştir. e parametresi, daha önce de belirtildiği gibi kanat kesitinin dikeyde yaptığı maksimum yoldur (Şekil-2). Denklemden görüldüğü üzere aynı güç katsayısını vermesine rağmen daha küçük akış penceresine sahip bir salınma hareketinin güç üretim verimi daha yüksektir.

$$C_P^*(t) = \frac{P(t)}{1/2\rho U_\infty^3 c} \quad (6)$$

$$C_P = \int_0^1 (C_l(t)\dot{h}(t) + C_m(t)\dot{\alpha}(t)c) d(t/T) \quad (7)$$

$$\eta = \frac{1}{e/c} C_P \quad (8)$$

Paralel Hesaplama

Akış çözümleri, yönetici-işçi yapılanmasına dayalı basit bir paralel işlem algoritması ile birden fazla işlemci kullanılarak elde edilir. Çözüm ağı sistemi alt ağlara bölündükten sonra her bir alt ağdaki çözüm, farklı bir işlemcide hesaplanır. İşlemciler arası iletişim PVM (Parallel Virtual Machine Sürüm 3.4.6) kitaplık rutinleri (*İng: library routine*) ile sağlanır. Paralel hesaplamalar, 64 bit Linux İşletim Sistemi altında çalışan çok işlemcili bilgisayarlardan oluşan bir PC öbeğinde yapılmıştır.

UYGULAMALAR, SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, akış çözümleri, literatür [Ashraf, Young, Lai ve Platzer, 2011; Kinsey ve Dumas, 2008] ile uyumlu olması bakımından laminar akış varsayımı ile çözülmüştür. Hava akışı düşük hızlı (rüzgâr benzetimi) olacağından, kullanılan sıkışabilir çözücüde serbest akış Mach Sayısı, $M_\infty = 0.1$ olarak kullanılmıştır. Yine literatür [Ashraf, Young, Lai ve Platzer, 2011; Platzer, Ashraf, Young ve Lai, 2010] ile uyumlu olması ve aynı zamanda ilerleyen zamanlarda yapılması planlanan deneylerin koşullarını yaklaşık sağlaması için serbest akış Reynolds Sayısı, $Re = 1100$ olarak seçilmiştir.

Bütün hesaplamalar, çözüm ağı 3 bölüme parçalanarak paralel hesaplama ortamında gerçekleştirilmiştir. Parametrik uzayı geren durumlardan (*İng: cases spanning the parametric space*) bazıları, PC öbeğinde boş işlemci olduğunda aynı anda hesaplanmıştır. 5 periyot devam eden bir salınma hareketi için ortalama hesaplama süresi yaklaşık 30-40 dakika olmuştur. Güç katsayısı ve güç üretim verimi, 5. periyotta elde edilen aerodinamik yüklere göre hesaplanmıştır.

Parametrik uzay, indirgenmiş frekansın, k , yunuslama genliğinin, α_o , dalma genliğinin, h_o ve dalma ile yunuslama arasındaki faz farkının, ϕ , belli aralıklardaki değerleri tarafından gerilerek oluşturulmuştur. k , 0.15 – 1.50 arasında logaritmik olarak değişirken, α_o , $5^\circ - 90^\circ$ arasında doğrusal değişmiştir. h_o ve ϕ değerleri de doğrusal değişmiştir ve aralıkları, sırayla, 0.5 – 1.50 ve $60^\circ - 90^\circ$ 'dir. Gerilen parametrik uzay Tablo-1'de verilmiştir.

Oluşturulan uzayda $5 \times 5 \times 10 \times 18 = 4500$ eleman bulunmasına rağmen sadece $\chi > 1$ koşulunu sağlayan durumlar hesaplanmıştır [Kinsey ve Dumas, 2008]. Hesaplanan durum sayısı 3235'tir. 1265 durum, $\chi > 1$ durumunu sağlayamamıştır. 3235 durumun hesaplanması için yaklaşık 2 aylık bir çözücü çalıştırma süresi gerekmiştir.

Tablo 1'de verilen her bir salınma hareketi durumunun 5 periyotluk zamana bağlı çözümü sonrasında, son periyotun ortalamasına göre güç katsayısı ve güç üretim verimi hesaplanmıştır.

Tablo 1: İncelenen salınma hareketlerinin parametrik uzayı

		Dalma genliği, h_o				
		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
Faz Farkı, ϕ (°)	120	İndirgenmiş frekans, $k =$ 0.150, 0.194, 0.250, 0.323, 0.417, 0.539, 0.696, 0.899, 1.160, 1.500				
	105					
	90	Yunuslama genliği (°), $\alpha_o =$ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0, 45.0, 50.0, 55.0, 60.0, 65.0, 70.0, 75.0, 80.0, 85.0, 90.0				
	75					
	60					

Hesaplanan güç katsayıları ve güç üretim verimleri, sabit h_o ve ϕ değerleri için $k - \alpha_o$ parametrik uzayında haritalanmıştır. Haritalarda sadece güç üreten durumlar (pozitif güç katsayısı, C_P , durumu) gösterilmiştir. Güç katsayısı ve güç üretim verimi için örnek haritalar Şekil 3 ve 4'te verilmiştir.

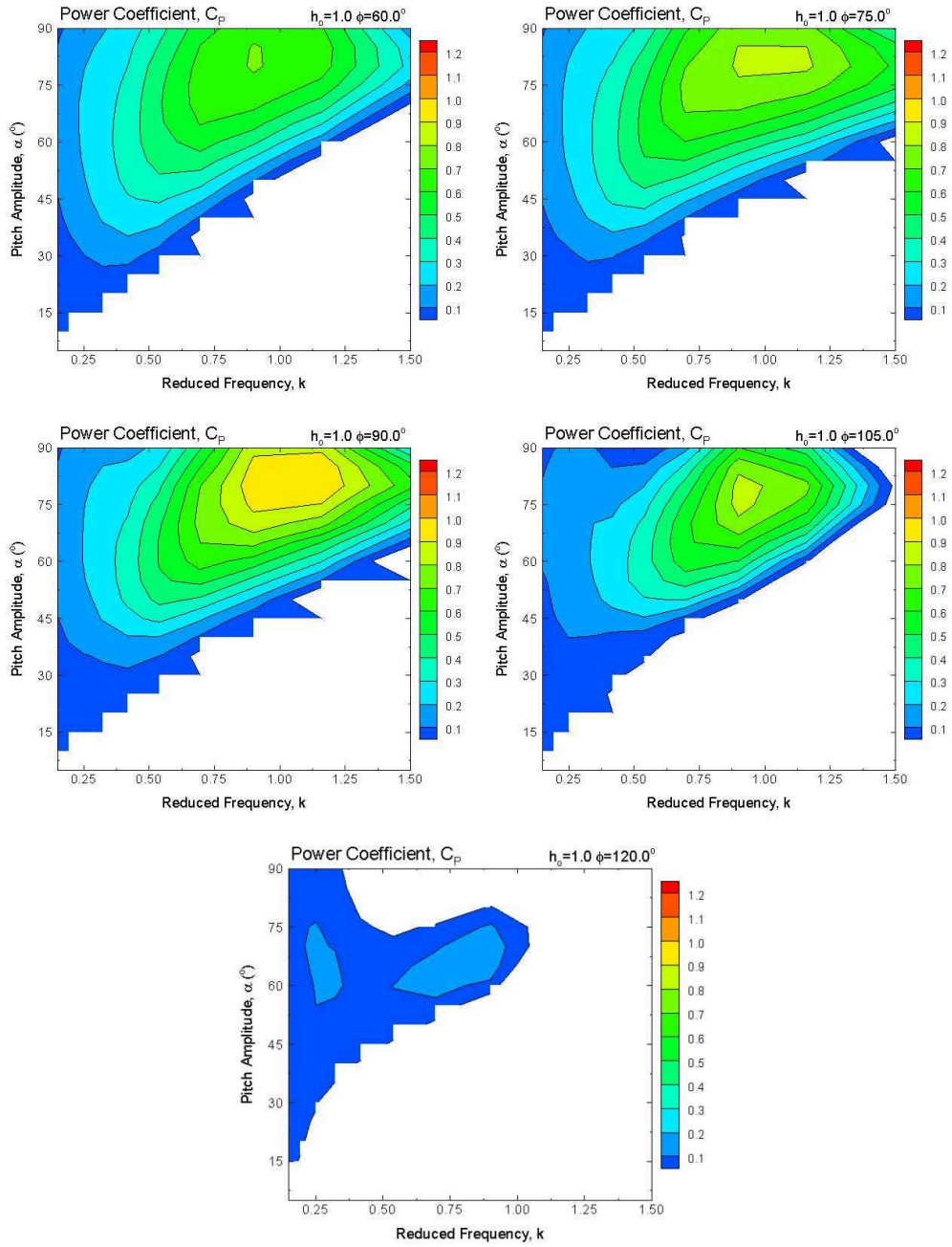
Haritalar incelendiğinde, değerlendirilen her dalma genliği ve faz farkı değeri için gerek maksimum güç katsayısının gerekse maksimum güç üretim veriminin $k = 0.9 - 1.2$ ve $\alpha_o = 75^\circ - 85^\circ$ aralıklarında gerçekleştiği görülmüştür. Haritaların cevap yüzeylerine (İng: response surface) dönüştürülmesi ile daha kesin değerlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda sabit dalma genliği, h_o ve faz farkı, ϕ ikilisi için $k - \alpha_o$ parametrik uzayında hesaplanan güç katsayısı, C_P ve güç üretim verimi, η değerleri için 2. dereceden polinom cevap yüzeyleri oluşturulmuştur. Örnek bir cevap yüzeyi Şekil 5'te verilmiştir.

2. dereceden polinom olarak her bir dalma genliği, h_o ve faz farkı, ϕ ikilisi için oluşturulan cevap yüzeylerinin maksimum değerleri kolaylıkla hesaplanmıştır. Hesaplanan maksimumlar ve bunları sağlayan $k - \alpha_o$ ikilisi değerleri grafik olarak sunulmuştur (Şekil 6-15). Şekiller, sabit dalma genliği için maksimum C_P ve η değerlerinin faz farkına göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Cevap yüzeylerinin yaklaşım başarısını ölçmek amacıyla ilgili salınma hareketi parametreleri için yapılan Navier-Stokes hesaplaması sonuçları da grafiklere ayrıca eklenmiştir.

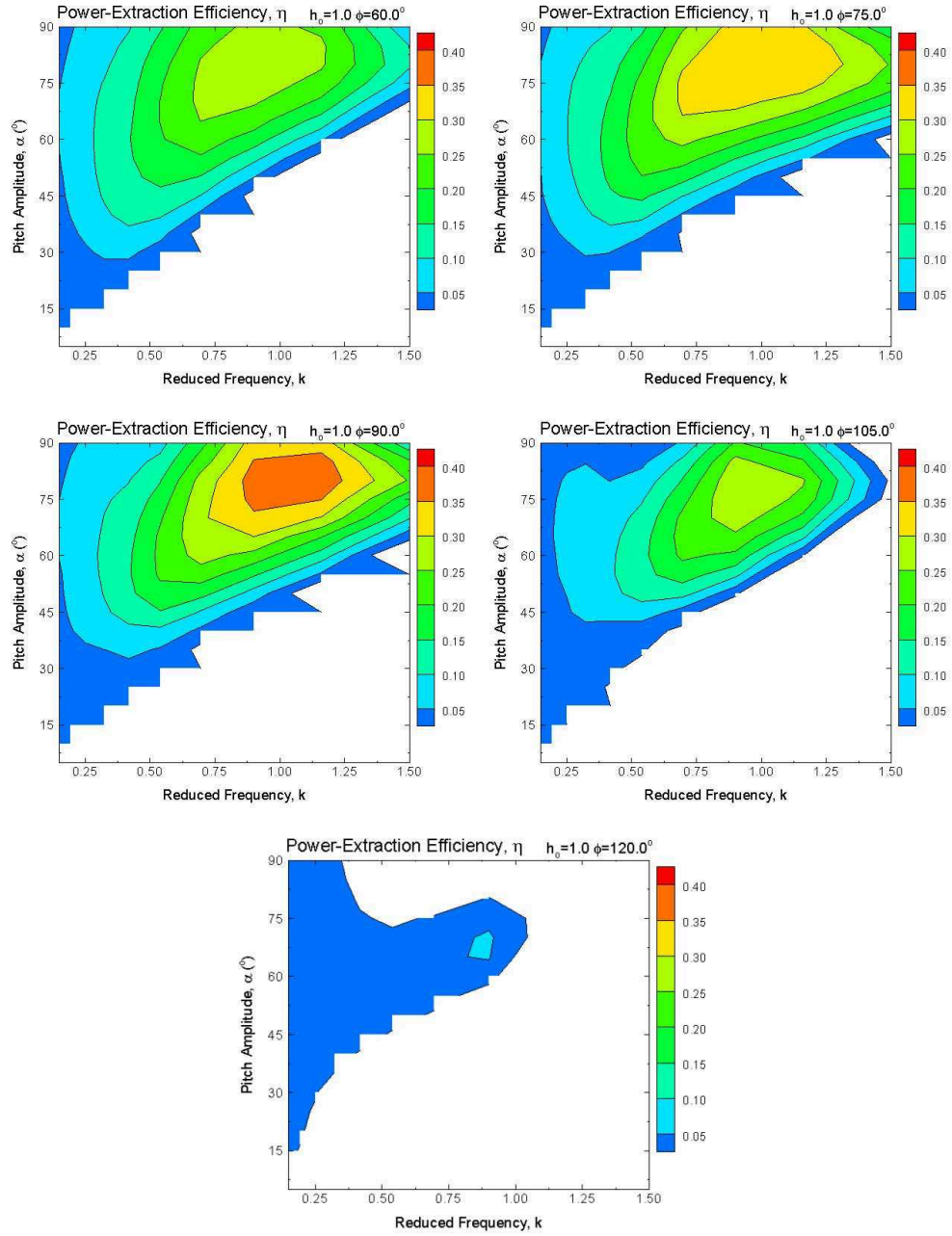
Maksimum güç katsayıları, $h_o = 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ için sırasıyla Şekil 6, 7, 8, 9 ve 10'da gösterilmektedir. Şekil 11, 12, 13, 14 ve 15 ise maksimum güç üretimi verimlerini vermektedir. Sonuçların oldukça ilginç ve faydalı olduğu değerlendirilmiştir.

Faz farkına göre ayrı ayrı belirlenen maksimum güç katsayılarının arasında en yüksekini incelenen her dalma genliği, h_o değeri için $k \approx 1$ durumunda olduğu gözlenmiştir. Bu, iz bölgesi girdaplarının konveksiyon periyotunun salınma periyotuna yaklaşık olarak eşit olması anlamına gelmektedir. Ancak, bu durumun (incelenen) her dalma genliğinde neden maksimum C_P sağladığı konusu daha detaylı inceleme gerektirmektedir. İlerleyen çalışmalarda bu konunun araştırılması düşünülmektedir.

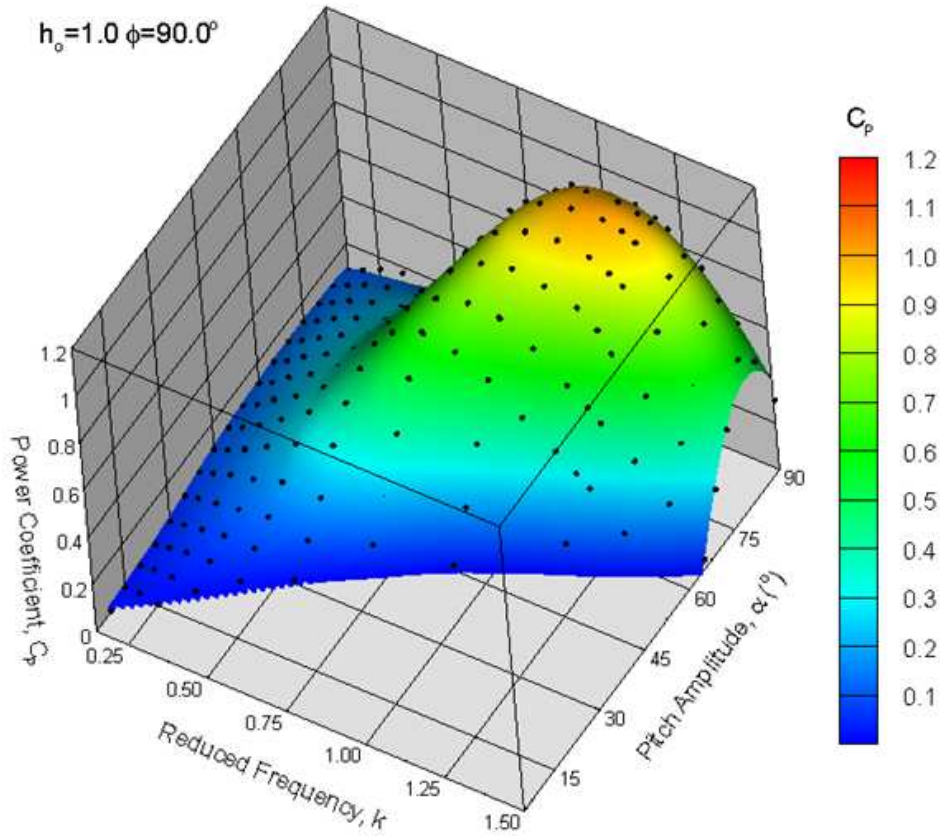
Benzer şekilde, her dalma genliği değeri için dalma ve yunuslama hareketlerinin arasındaki faz farkının $\phi = 90^\circ$ olduğu durumlar, maksimum C_P 'ler arasında en yükseği vermiştir. Özellikle, dalma genliği arttıkça bu durum belirginleşmiştir. Bu sonucun bir sebebi, zamana bağlı etkin hücum açısının, $\phi = 90^\circ$ durumu için bir salınma periyodu içerisinde daha uzun sürelerde yüksek değerlerde bulunuyor olması olabilir. Bu konunun da ilerleyen çalışmalarda daha detaylı olarak araştırılması değerlendirilmiştir.



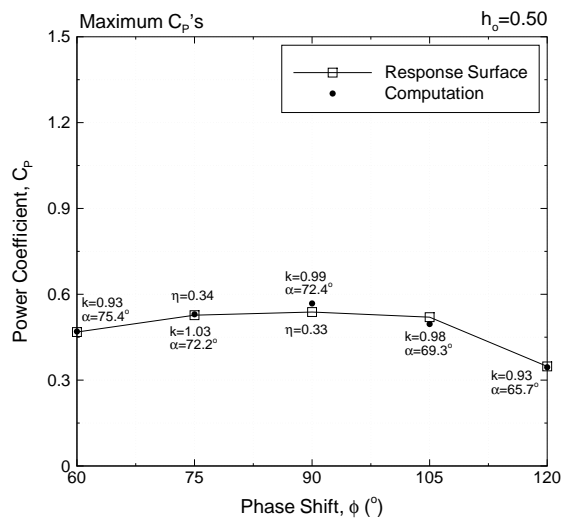
Şekil 3: $h_o = 1.0$ durumu için güç katsayısının $k - \alpha$ parametrik uzayında haritası



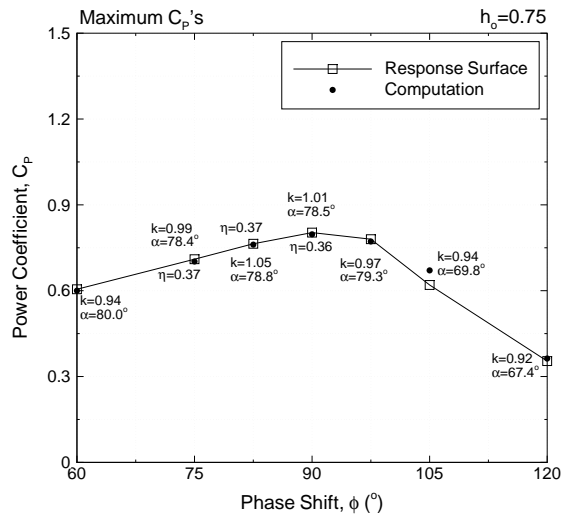
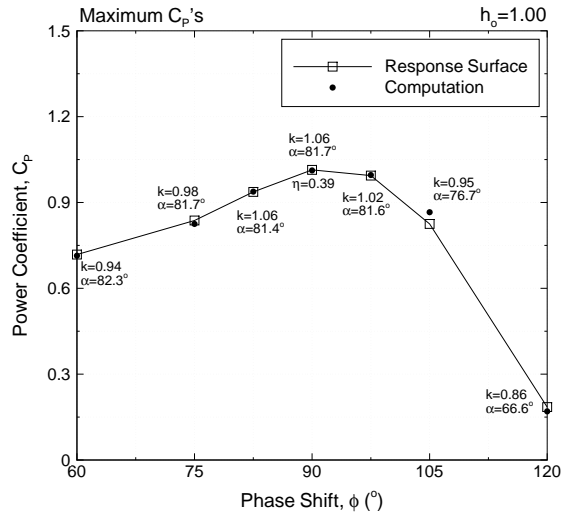
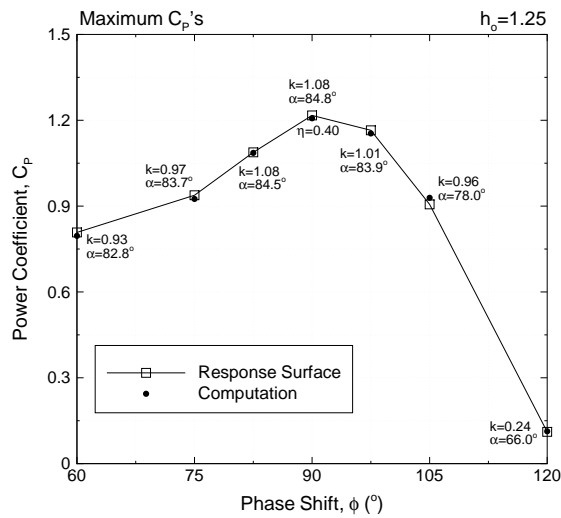
Şekil 4: $h_o = 1.0$ durumu için güç üretim veriminin $k - \alpha$ parametrik uzayında haritası

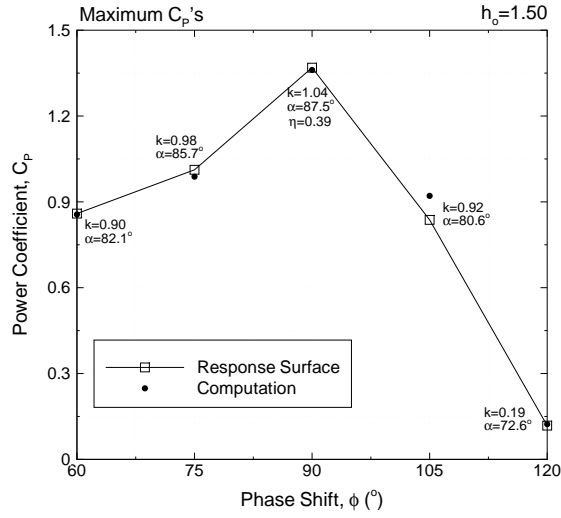
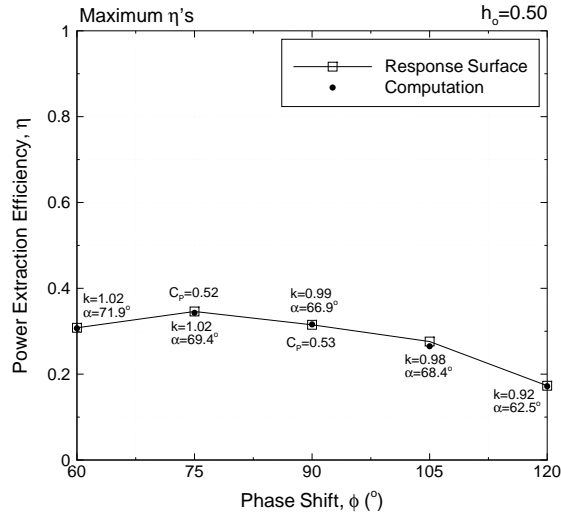
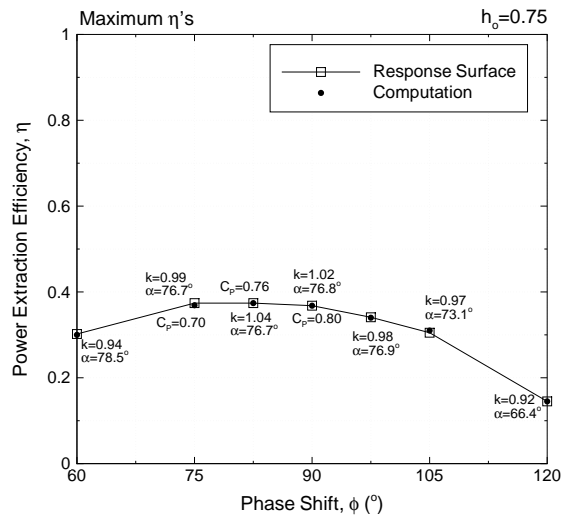


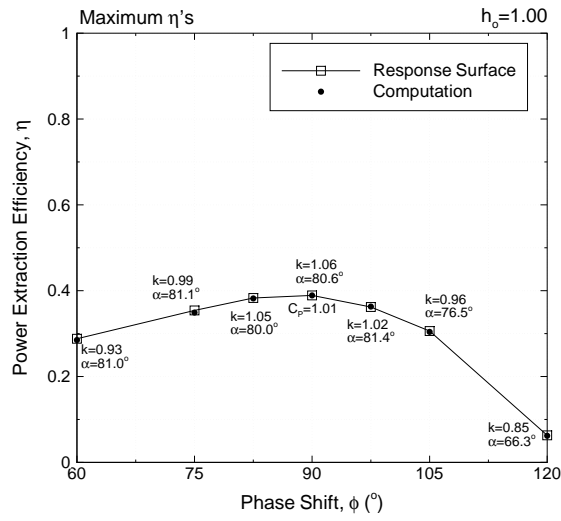
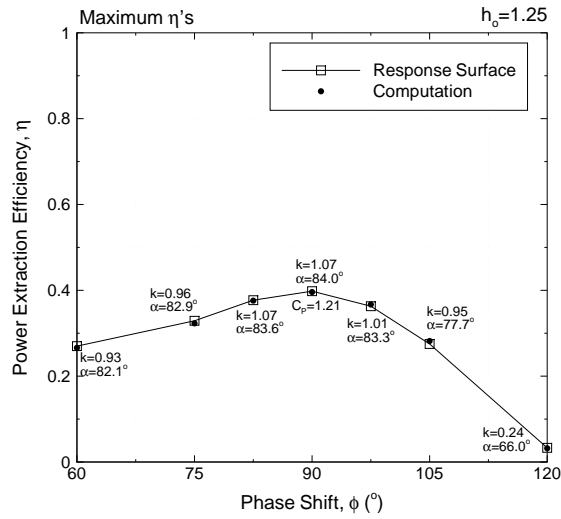
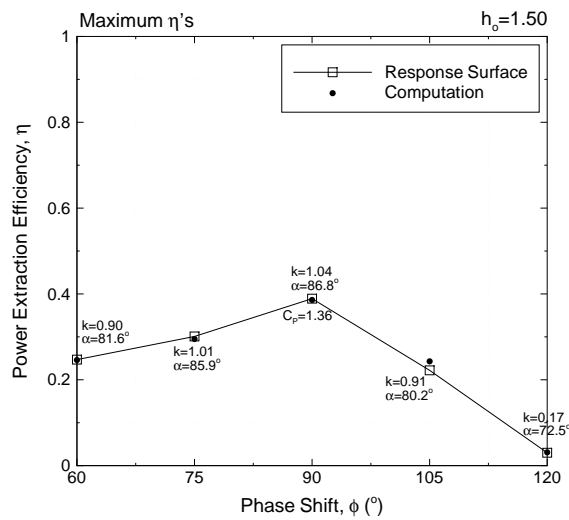
Şekil 5: $h_o = 1.0$ ve $\phi = 90^\circ$ için güç katsayısının cevap yüzeyi (hesaplanan değerler siyah nokta ile gösterilmektedir)



Şekil 6: $h_o = 0.50$ için maksimum güç katsayıları

Şekil 7: $h_o = 0.75$ için maksimum güç katsayılarıŞekil 8: $h_o = 1.0$ için maksimum güç katsayılarıŞekil 9: $h_o = 1.25$ için maksimum güç katsayıları

Şekil 10: $h_o = 1.50$ için maksimum güç katsayılarıŞekil 11: $h_o = 0.50$ için maksimum güç üretim verimleriŞekil 12: $h_o = 0.75$ için maksimum güç üretim verimleri

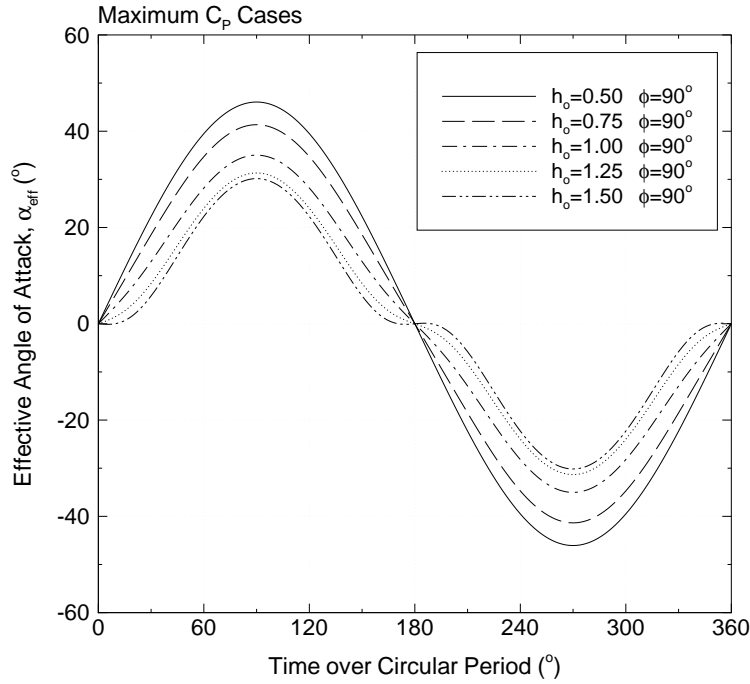
Şekil 13: $h_o = 1.0$ için maksimum güç üretim verimleriŞekil 14: $h_o = 1.25$ için maksimum güç üretim verimleriŞekil 15: $h_o = 1.50$ için maksimum güç üretim verimleri

Tablo 2: (Faz farkına göre en yüksek) maksimum güç katsayısı ve güç üretim verimi değerleri

		C_P	η (%)
h_o	0.50	0.57 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 0.99 \\ \alpha_o = 72.4^\circ \end{array} \right)$	34.3 $\left(\begin{array}{l} \phi = 75^\circ \\ k = 1.02 \\ \alpha_o = 69.4^\circ \end{array} \right)$
	0.75	0.80 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.01 \\ \alpha_o = 78.5^\circ \end{array} \right)$	37.4 $\left(\begin{array}{l} \phi = 82.5^\circ \\ k = 1.04 \\ \alpha_o = 76.7^\circ \end{array} \right)$
	1.00	1.01 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.06 \\ \alpha_o = 81.7^\circ \end{array} \right)$	38.9 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.06 \\ \alpha_o = 80.6^\circ \end{array} \right)$
	1.25	1.21 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.08 \\ \alpha_o = 84.8^\circ \end{array} \right)$	39.6 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.07 \\ \alpha_o = 84.0^\circ \end{array} \right)$
	1.50	1.36 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.04 \\ \alpha_o = 87.5^\circ \end{array} \right)$	38.6 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.04 \\ \alpha_o = 86.8^\circ \end{array} \right)$

Her bir h_o değeri için faz farkı ϕ 'a göre ayrı ayrı belirlenen maksimum güç üretim verimleri arasında en yüksekinin, düşük dalma genliklerinde $\phi < 90^\circ$ ($75^\circ - 90^\circ$ arası) durumunda, yüksek dalma genliklerinde ise $\phi = 90^\circ$ durumunda gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunun sebebi, büyük ölçüde, verimin tanımından kaynaklanmaktadır (Denklem-8). Bu tanıma göre, yaklaşık aynı güç katsayısını sağlayan salınma hareketleri arasından en verimli, kanat kesitinin en az alan taradığı durumdur. Düşük dalma genlikleri için dalma ve yunuslama hareketi arasındaki faz farkı $75^\circ < \phi < 90^\circ$ arası olduğunda, kanat kesiti, $\phi = 90^\circ$ 'ye göre daha küçük bir alan taramaktadır. Dolayısıyla, bu durumlar için belirlenen maksimum verimin daha yüksek hesaplanması normal karşılanmıştır. Elde edilen ilginç bir sonuç da, dalma genliği arttıkça maksimum güç katsayısını ya da maksimum güç üretim verimini sağlayan yunuslama genliğinin de artmış olmasıdır.

Faz farkına göre belirlenen maksimum C_P ve η değerleri arasında en yüksekleri, sayısal olarak da ayrıca Tablo-2'de verilmiştir. Görüldüğü ve beklendiği üzere, dalma genliği h_o arttıkça elde edilen maksimum güç katsayısı C_P de artmaktadır. En yüksek güç üretim verimi ise $h_o = 1.25$ durumunda $\eta = \%40$ olarak hesaplanmıştır. Aslında, $h_o = 1.0$ ve $h_o = 1.5$ durumları için de maksimum güç üretim verimi bu değere çok yakındır ($\eta = \%39$). $h_o = 0.75$ durumunda ise $\eta = \%37$ olarak hesaplanmıştır. Betz'in Betz [1920] viskozitesiz ortamda eyleyici teker (İng:



Şekil 16: Farklı h_o değerleri ve $\phi = 90^\circ$ için salınma periyodu boyunca etkin hücum açısının değişimi

actuator disk) teorisi kullanarak hesapladığı limit değer $\eta = \%59$ olması, $\eta = \%39$ gibi bir verimin sağlayabileceği sayısal olarak gösterilen salınır kanatlar ile rüzgar enerjisinden güç üretilmesi çalışmalarını motive etmektedir. Aslında, pratikte $\eta > \%30$ durumunun sağlanmasının dahi salınır kanatları türbinlere karşı güçlü bir alternatif yaptığı değerlendirilebilir Kinsey ve Dumas [2008].

Son olarak, faz farkına göre en yüksek maksimum güç katsayısı durumlarını sağlayan salınma hareketlerine ait zamana bağlı etkin hücum açıları değerlendirilmiştir (Şekil-16). Şekilden görüldüğü üzere, dalma genliği artarken zaman içerisindeki maksimum etkin hücum açısı değeri (etkin hücum açısı genliği) ise azalarak 30° 'ye doğru yakınsama eğilimindedir. Yukarıda maksimum güç katsayısı için dalma genliği artıktıkça yunuslama genliğinin de arttığını görüldüğü anlatılmıştı. Buna karşın, etkin hücum açısı genliğinin dalma genliği ile ters orantılı değişmesinin sebebi daha detaylı inceleme gerektirmektedir. İlerleyen çalışmalarda bu konunun da analiz edilmesi planlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın 112M933 Numaralı TÜBİTAK 1001 Projesi kapsamında yürütülmesi sebebiyle yazarlar TÜBİTAK'a destek için teşekkürlerini bildirirler.

Kaynaklar

- Ashraf, M. A., Young, J., Lai, J. C. S. and Platzer, M. F., *Numerical Analysis of an Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator*, AIAA Journal Vol. 49, No. 7, 1374-1386 , (2011).
- Jones, K. D., Davids, S. and Platzer, M. F., *Oscillating-Wing Power Generator*, Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM'99, San Francisco, California, USA, 18-23 July 1999, pp: 1.
- Jones, K. D., Lindsey, K. and Platzer, M. F., *An Investigation of the Fluid-Structure Interaction in an Oscillating-Wing Micro-Hydropower Generator*, Fluid Structure Interaction 2, Southampton, England, U.K., 2003, pp: 73-82.
- Kaya, M. and Tuncer, I. H., *Nonsinusoidal Path Optimization of a Flapping Airfoil*, AIAA Journal, Vol. 45, No. 8, 2075-2082, (2007).
- Kaya, M. and Tuncer, I. H., *Path Optimization of Thrust Producing Flapping Airfoils Using Response Surface Methodology*, 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering Venice, Italy, June 30 –July 5, 2008.
- Kaya, M., Tuncer, I.H., Jones, K.D. and Platzer, M.F., *Optimization of Flapping Motion Parameters for Two Airfoils in a Biplane Configuration*, Journal of Aircraft, Vol. 46, No.2, (2009)
- Kinsey, T. and Dumas, G., *Parametric Study of an Oscillating Airfoil in a Power-Extraction Regime*, AIAA Journal, Vol. 46, No. 6, 1318-1330, (2008).
- Kinsey, T. and Dumas, G., *Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine*, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 134, Issue 3, (2012).
- Kinsey, T. and Dumas, G., *Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine*, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 134, Issue 7, (2012).
- McKinney, W. and DeLaurier, J., *The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill*, Journal of Energy, Vol. 5, No. 2, 109-115, (1981).
- Platzer, M. F., Ashraf, M. A., Young, J. and Lai, J. C. S., *Extracting Power in Jet Streams: Pushing the Performance of Flapping Wing Technology*, 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, International Council of the Aeronautical Sciences Paper 2010-2.9.1, Nice, France, 19-24 Sept. 2010.
- Betz, A., *Das Maximum der Theoretisch Möglichen Ausnützung des Windes Durch Windmotoren*, Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen, Vol. 26, pp. 307-309, (1920).