

**Rüzgar Enerjisinden Güç Üretimi İçin
Salınır Kanatların Sayısal ve Deneysel İncelenmesi**

Program Kodu: 1001

Proje No: 112M933

Proje Yürütücüsü:
Yrd. Doç. Dr. Mustafa KAYA

Araştırmacı(lar):
Yrd. Doç. Dr. Munir ELFARRA

MART 2015
ANKARA

ÖNSÖZ

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. Bu projede ise salınma hareketi yapan kanatlar kullanılarak da rüzgâr enerjisinden güç üretilebileceği gösterilmiştir.

Yürütülen proje, sayısal ve deneysel olmak üzere iki safhadan oluşmuştur. Dalma ve yunuslama hareketlerinin doğrusal bileşimi olarak hareket eden salınır kanatlar, her iki safhada incelenmiştir. Üretilen gücün, dalma ve yunuslama hareketlerinin genliğine, frekansına ve aralarındaki faz farkına nasıl bağlı olduğu parametrik olarak ve eniyileme (İng: optimization) yöntemleriyle sayısal çalışma aşamasında araştırılmıştır. Deneysel çalışmada, 2-B (iki boyutlu) ve laminar akış varsayımı ile hesaplanan salınır kanat çözümlerin değerlendirilmesi ve salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretildiğinin gösterilmesi ana hedef olarak amaçlanmıştır.

Sayısal ve deneysel olarak incelenen durumlar neticesinde salınır kanatların türbinlere karşı bir alternatif olabileceği değerlendirilmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	2
1.3 Amaçlar.....	3
2. SAYISAL YÖNTEM	6
2.1 Giriş.....	6
2.2 Navier-Stokes Çözücü.....	6
2.3 Salınma Hareketi.....	7
2.4 Üretilen Gücün ve Güç Üretim Veriminin Tespiti.....	10
2.5 Cevap Yüzeyi Yöntemi ile Eniyileme.....	11
2.6 Paralel Hesaplama.....	12
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	13
3.1 Giriş.....	13
3.2 Deney Düzenegi.....	13
3.3 Salınır Kanatlar.....	17
3.4 Rüzgâr Tüneli.....	18
3.5 Üretilen Gücün ve Güç Üretim Veriminin Tespiti.....	19
4. HESAPLAMA SONUÇLARI.....	20
4.1 Giriş.....	20
4.2 Sonuçlar ve Değerlendirmeler.....	20
4.3 Farklı Salınır Kanat Yapılandırmaları.....	48
5. DENEY SONUÇLARI.....	49
5.1 Giriş.....	49
5.2 Sonuçlar ve Değerlendirmeler.....	51
5.3 Farklı Salınır Kanat Yapılandırmaları.....	52
KAYNAKLAR.....	54

TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ

Tablo Listeleri

Tablo 1. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretimi üzerine geçmişte yapılan sayısal çalışmalar.....	4
Tablo 2. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretimi üzerine geçmişte yapılan deneysel çalışmalar.....	6
Tablo 3. Tünelin teknik değerleri.....	18
Tablo 4. İncelenen salınma hareketlerinin parametrik uzayı.....	21
Tablo 5. Parametrik uzaya eklenen salınma hareketi durumları.....	24
Tablo 6. (Faz farkına göre en yüksek) maksimum güç katsayısı, C_p , ve güç üretim verimi, η , değerleri.....	47
Tablo 7. Deneysel çalışmada incelenen durumlar (AR: kanat açıklık oranı).....	51

Şekil Listeleri

Şekil 1. Bölünen çözüm ağı.....	7
Şekil 2. Dalma, $h(t)$ ve yunuslama, $\alpha(t)$ hareketlerinin bileşimi olarak salınır kanat hareketi..	8
Şekil 3. Aerodinamik yüklerin zamana göre değişimine bir örnek.....	10
Şekil 4. Çözüm alanının paralel hesaplama için bölümlenmesi.....	12
Şekil 5. Salınır kanat ve hareket mekanizmasından oluşan güç jeneratörü.....	14
Şekil 6. Dalma hareketi boyunca yunuslama pozisyonunu belirleyen hareket yolu (eliptik)....	15
Şekil 7. Eliptik yol konumunu yunuslama pozisyonuna transfer eden mekanik düzen.....	15
Şekil 8. Birim genlikte yunuslama konumunun birim genlikte dalma konumuna göre değişimi.....	16
Şekil 9. Üretilen kompozit malzemeli kanatlardan örnekler (içi boş yapılı ve 2 farklı yunuslama merkezi).....	17

Şekil 10. Kullanılan açık test rüzgâr tüneli.....	18
Şekil 11. $h_o=1.0$ durumu için güç katsayısının $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	22
Şekil 12. $h_o=1.0$ durumu için güç üretimi veriminin $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	23
Şekil 13. $h_o=0.75$ için güç katsayısının sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	24
Şekil 14. $h_o=1.00$ için güç katsayısının sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	25
Şekil 15. $h_o=1.25$ için güç katsayısının sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	25
Şekil 16. $h_o=0.75$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	26
Şekil 17. $h_o=1.00$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	26
Şekil 18. $h_o=1.25$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı $k-\alpha_o$ parametrik uzayında haritası.....	27
Şekil 19. $h_o=1.00$, $\phi=90.0^\circ$ cevap yüzeyleri (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).	28
Şekil 20. $h_o=1.25$, $\phi=90.0^\circ$ cevap yüzeyleri (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).	29
Şekil 21. $h_o=0.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	30
Şekil 22. $h_o=0.75$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	31
Şekil 23. $h_o=1.00$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	32
Şekil 24. $h_o=1.25$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	33
Şekil 25. $h_o=1.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	34
Şekil 26. $h_o=0.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	35
Şekil 27. $h_o=0.75$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	36
Şekil 28. $h_o=1.00$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	37
Şekil 29. $h_o=1.25$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	38
Şekil 30. $h_o=1.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	39
Şekil 31. $h_o=0.50$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	40

Şekil 32. $h_o=0.75$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	41
Şekil 33. $h_o=1.00$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	41
Şekil 34. $h_o=1.25$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	42
Şekil 35. $h_o=1.50$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	42
Şekil 36. $h_o=0.50$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	43
Şekil 37. $h_o=0.75$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	43
Şekil 38. $h_o=1.00$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	44
Şekil 39. $h_o=1.25$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	44
Şekil 40. $h_o=1.50$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir).....	45
Şekil 41. İncelenen bütün dalma genliklerinde maksimum güç katsayısı sağlayan salınma hareketleri için etkin hücum açısının bir salınma periyodu boyunca değişimi.....	48
Şekil 42. İlk mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı (başarısız deney).....	49
Şekil 43. İkinci mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı.....	50
Şekil 44. Üçüncü mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı.....	50

ÖZET

Yürütülen bu proje ile hava akışı içerisinde yerleştirilmiş salınır kanatlardan güç üretilmesi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada, 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. Sayısal olarak incelenen durumlar için dalma genliği arttıkça elde edilen maksimum güç katsayısının arttığı ve eniyi güç üretim veriminin de %40 seviyelerinde olduğu gösterilmiştir. İncelenen her dalma genliği için yaklaşık değeri 1'e eşit olan indirgenmiş frekanslar eniyi hareketi sağlamıştır. Maksimum güç katsayısı için faz farkının 90° civarında olması gerektiği gözlenmiştir. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretilbileceği deneysel olarak da gösterilmiştir. Üretilen gücün, rüzgâr hızına, veter boyuna, kanat açıklığına ve yunuslama merkezine göre nasıl değiştiği deneysel çalışmada araştırılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmada, 2-B (iki boyutlu) ve laminar akış varsayımı ile hesaplanan salınır kanat çözümleri doğrulanmıştır. İncelenen durumlar neticesinde salınır kanatların türbinlere karşı bir alternatif olabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, salınır kanatlar, zamana bağlı akışlar, eniyileme, deneysel aerodinamik, paralel işlemler.

ABSTRACT

In this project, power extraction from the air flow over oscillating wings are investigated using computational and experimental tools. In the computational study, numerical optimization of the oscillatory motion parameters of a flapping airfoil under a freestream flow has been conducted. The objective of the optimization has been to maximize the produced power and/or the power production efficiency. Unsteady laminar flows around the airfoil have been computed using a Navier-Stokes solver in a parallel computation environment. The Response Surface Methodology (RSM) has been employed for the optimization. The periodic flapping motion has been defined as a linear combination of sinusoidal plunge and pitch motions. The optimization variables have been the parameters which define the flapping motion: flapping frequency, plunge and pitch amplitudes and the phase shift between the pitch and plunge motions. For the cases studied computationally, it has been observed that the maximum power coefficient increases with increasing plunge amplitude and the calculated maximum power production efficiency is about 40%. Optimum oscillation motion has occurred at a reduced frequency being equal to almost unity for each plunge amplitude investigated. It is observed that the phase shift should be about 90° in order to obtain maximum power coefficient. Power production from wind energy using oscillating wings has also been shown experimentally. The effect of the wind speed, the chord length, the wing span and the pitching center on the produced power has been investigated in the experimental study. Moreover, the computed solutions for oscillating wings with the 2-D (two dimensional) and laminar flow assumptions have been validated against the experimental observations. According to the results of the cases studied, one can say that oscillating wings may be alternative to the turbines.

Keywords: Wind energy, computational fluid dynamics, oscillating wings, unsteady flows, optimization, experimental aerodynamics, parallel processing.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Dünyada karbon temelli yakıtların azalmaya başlaması ile yeni enerji kaynakları kullanmaya yönelik eğilim giderek artmaktadır. Ayrıca, küresel çevre kirliliğine karşı duyarlılığın yükselmesi de çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışını gündeme getirmektedir. Bu bağlamda, rüzgâr enerjisini kullanarak güç üretimi sağlamak önemli bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için genellikle döner kanatların bulunduğu türbinli sistemler kullanılır. Bu amaç için salınır kanatların da kullanılabileceği yakın zamanda yürütülen çalışmalar ile gösterilmiştir (McKinney ve DeLaurier , 1981; Jones vd.,1999; Jones vd., 2003; Kinsey ve Dumas, 2008; Platzter vd., 2010; Ashraf vd., 2011). Literatürde yer alan bu ilk araştırmalara göre rüzgâr enerjisinden faydalanmak için kullanılan salınır kanatlar, geleneksel rüzgâr türbinleri ile rekabet edecek seviyede güç üretebilmektedir.

Ayrıca, rüzgâr hızlarının fazla yüksek olmadığı ülkemizde rüzgâr türbinleri ile güç üretimi için uygun bölge tespiti ve konumlandırma yapmak büyük önem taşımaktadır. Düşük rüzgâr hızları ile dahi güç üretme imkânı sunacağı öngörülen salınır kanatlar ile bölge tespiti ve konumlandırma probleminin çok daha rahat aşılabileceği söylenebilir.

Döner kanatlar ile üretilen türbinler, rüzgâr çiftliği içerisine yerleştirilirken kanatların arkasında oluşan iz bölgesini arttırabilmek için direklerin arasındaki mesafeler yüksek tutulmaktadır. Bu sebeple, birim alan içerisine yerleştirilen türbin sayısı azalmakta ve rüzgâr çiftliğinden elde edilen toplam güç göreceli olarak düşmektedir. Salınır kanatlar kullanarak güç üretme durumunda ise böyle bir durum yaşanmamaktadır (Jones vd., 2003; Ashraf vd., 2011). Uygun salınma hareketleri için güç üretimine pozitif katkıda bulunacak şekilde kanatların üst üste ve/veya arka arkaya yakın mesafeler içerisinde yerleştirilmesi mümkündür. Ayrıca, birim alan içerisine düşen kanat sayısı arttığı için rüzgâr çiftliğinden elde edilen toplam güç miktarı da artmış olacaktır.

Üretimi, basit yapısı, yerleştirilmesi ve kontrol sistemi açısından salınır kanatların, üretilen güç ve güç üretim verimi kapsamında, benzer büyüklükteki döner kanatlara göre avantaj taşıdığı ve iyi bir alternatif olduğu göze çarpmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

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) yaptığı çalışması 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 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.

Bu tarihten itibaren çırpan/salınır kanatlara olan ilgi uzun yıllar boyunca güç üretimi yerine itki üretimi odaklı olmuştur. Rüzgârdan güç üretimi için salınır kanat kullanılması ile ilgili dikkat çekici iki çalışma 1999 ve 2003 yıllarında Jones ve grubu tarafından gerçekleştirilmiştir (Jones vd.,1999; Jones vd., 2003). Jones vd. (1999) havada çırpan tek bir kanat, Jones vd. (2003) 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), sinüzoidal dalma ve yunuslama yapan bir kanatın salınma hareketini parametrik olarak 2-Boyutlu hesaplama ortamında değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında %35 civarında güç üretim verimi elde edilebileceği gözlenmiştir. 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.

Kaya ve Tuncer'in (2007) sinüzoidal olmayan dalma ve yunuslama hareketlerinin daha yüksek itki sağladığını gösterdikleri çalışmayı örnek alan Platzer vd. (2010), yürüttükleri deneysel çalışma sonucunda, sinüzoidal salınma yerine kare dalgalı salınma hareketi kullanıldığı zaman güç üretme kapasitesinin artırılabilirliğini 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 vd. (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 (2012a), 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. 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. Kinsey ve Dumas (2012b), su akışı içinde salınma hareketi yapan kanatlardan elde edilen güç ve güç üretim verimini 2 ve 3 boyutlu çözücü sonuçlarına göre de karşılaştırmışlardır. 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.

Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretimi üzerine geçmişte yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar, sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de listelenmektedir.

1.3 Amaçlar

Bu projede, salınır kanatlar sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada, yüksek güç ve/veya güç üretim verimi sağlayan sinüzoidal salınma hareketlerinin eniyileme yöntemleri kullanılarak belirlenmesi hedeflenmiştir. Kanatlar üzerindeki zamana bağlı laminar akışlar 2-B Navier-Stokes çözücü ile paralel hesaplama ortamında elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, salınır kanatların türbinlere alternatif olabilecek seviyede performans gösterebileceği düşüncesinin doğrulanması amaçlanmıştır. Ayrıca, 2-B (iki boyutlu) ve laminar akış varsayımı ile hesaplanan çözümler de değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretimi üzerine geçmişte yapılan sayısal çalışmalar

Kaynak	Yıl	Geometri	Kinematik	Salınma Hareketi	Re sayısı	$C_{p,max}$	η_{max}
Davids	1999	NACA0012	Sinüzoidal	Hareket tayinli	∞	0.9	0.3
Jones et al.	1999	NACA0012	Sinüzoidal	Hareket tayinli	∞	0.9	0.3
Lindsey	2002	NACA0014	Sinüzoidal	Hareket tayinli	∞ , 2.0×10^4	1.48	0.33
Jones et al.	2003	NACA0014	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1.0×10^6		
Kinsey and Dumas	2008	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1100	1.13	0.34
Platzer et al.	2008	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Hareket tayinli	2.0×10^4	1.35	
Shimizu et al.	2008	NACA0012	Sinüzoidal	Yarı pasif	∞ ve 4.62×10^5	1.27	0.35
Ashraf et al.	2009	NACA0012	Sinüzoidal	Hareket tayinli	2.0×10^4	0.73	0.34
Ashraf et al.	2009	NACA0012	Sinüzoidal	Yarı pasif	1100	1.1	0.38
Peng and Zhu	2009	12% thick Joukowski	Değişken	Tam pasif	1100	0.29	0.2
Platzer et al.	2009	NACA0014	Sinüzoidal ve Sinüzoidal olmayan	Hareket Tayinli	2.0×10^4	1.44	0.54 (Tandem kanat kesitleri)
Zhu et al.	2009	Flat plate NACA0005 NACA0014	Sinüzoidal	Yarı pasif	∞	0.08	<0.25
Zhu and Peng	2009	12% thick Joukowski	Sinüzoidal	Yarı pasif	∞ and 1000	0.31	0.27
Caracoglia	2010	Flat plate	Sadece yunuslama	Tamamen pasif	∞		~ 0.05
Platzer et al.	2010	NACA0014	Sinüzoidal olmayan	Hareket tayinli ve tam pasif	2.0×10^4	1.43	0.54 (Tandem kanat kesitleri)
Young et al.	2010	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Tam pasif	1100	0.79	0.3
Ashraf et al.	2011	NACA0014	Sinüzoidal ve Sinüzoidal olmayan	Hareket tayinli	2.0×10^4	1.43	0.54 (Tandem kanat kesitleri)
Platzer et al.	2011	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Tam pasif	1100	0.79	0.3
Zhu	2011	15% thick Joukowski	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1100		0.31
Bryant et al.	2012	Flat plate	Sinüzoidal	Hareket tayinli	∞	0.7	0.27
Campobasso and Drofelnik	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1100	0.86	0.34
Isogai and Abiru	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Yarı pasif	∞ ve 3.8×10^4		0.3
Kinsey and Dumas	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	5.0×10^5	1.6	0.63

Kinsey and Dumas	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	5.0×10^5	1.6	0.63
Kinsey and Dumas	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	5.0×10^5	0.84	0.33
Lapointe and Dumas	2012	NACA0012	Değişken	Hareket tayinli	$5.0 \times 10^4 - 1.3 \times 10^5$		
Usoh et al.	2012	Düz plaka	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1100	0.84	0.34
Xiao et al.	2012	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Hareket tayinli	1.0×10^4	1.0	< 0.39
Zhu	2012	12% kalınlıkta Joukowski	Değişken	Tam pasif	1000		0.31
Campobasso et al.	2013	NACA0015	Sinüzoidal	Hareket tayinli	1100 ve 1.5×10^6	1.01	0.4
Le et al.	2013	Oluklu plaka	Sinüzoidal	Hareket tayinli	9.0×10^4		0.39
Veilleux and Dumas	2013	NACA0012	Değişken	Tam pasif	$5.0 \times 10^4 - 1.3 \times 10^5$		
Young et al.	2013	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Tam pasif	1100 ve 1.1×10^6	1.1	0.41
Yu and Wang	2013	NACA0012	Sinüzoidal	Hareket tayinli ve yarı pasif	1000		0.33
Xie et al.	2014	10% kalınlıkta elips	Sinüzoidal, geleneksel olmayan yunuslama tersi	Hareket tayinli	2.0×10^4	0.9	0.3

Tablo 2. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretimi üzerine geçmişte yapılan deneysel çalışmalar

Kaynak	Yıl	geometri	Kinematik	Salınma hareketi	Re sayısı	$C_{p_{max}}$	η_{max}
McKinney and DeLaurier	1981	NACA0012	Sinüzoidal	Tam pasif	$8.5 \times 10^4 - 1.1 \times 10^5$	0.14	0.17
Davids, Jones et al.	1999	NACA0012	Sinüzoidal	Tam pasif	$2.2 \times 10^4 - 4.7 \times 10^4$	0.19	0.16
Lindsey, Jones et al.	2002, 2003	NACA0014	Sinüzoidal olmayan	Tam pasif	2.2×10^4	0.25	0.23
Simpson et al. , Simpson	2008, 2009	NACA0012	Sinüzoidal olmayan	Hareket tayinli	1.38×10^4		0.32
Kinsey and Dumas	2010	NACA0015	Sinüzoidal	Tam pasif	5.0×10^5	1.02	0.4
Semler	2010	Düz plaka	Sinüzoidal olmayan	Tam pasif	$4.0 \times 10^4 - 1.9 \times 10^5$		
Abiru and Yoshitake	2011	NACA0015	Sinüzoidal	Yarı pasif	5.0×10^4		0.22
Kinsey et al.	2011	NACA0015	Sinüzoidal	Tam pasif	5.0×10^5	1.02	0.4
Abiru and Yoshitake	2012	NACA0015	Sinüzoidal	Yarı pasif	5.0×10^4		0.21
Huxham et al.	2012	NACA0012	Sinüzoidal	Yarı pasif	4.5×10^4		0.24
Poirel and Mendes	2012	NACA0012	Değişken	Tam pasif	$5.0 \times 10^4 - 1.3 \times 10^5$		

2. SAYISAL YÖNTEM

2.1 Giriş

Zamana bağlı, 2-B laminar akış alanları, hareketli C-tipi çözüm ağında Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi ile elde edilmiştir. Hareketli C-tipi çözüm ağı, salınır kanat kesitinin etrafında ve onun salınması ile birlikte hareket etmektedir. Zamana bağlı çözümler, alan ayrıştırma yöntemine (Şekil 1) dayalı bir algoritmayla paralel hesaplama ortamında elde edilmiştir. Paralel çözüm algoritmasının bilgisayar programlaması PVM (Parallel Virtual Machine) mesaj geçirme kitaplık rutinleri ile yapılmıştır.

Kanat kesitlerinin salınma hareketi, zamana göre sinüzoidal bir yörünge içerisinde tanımlanmıştır.

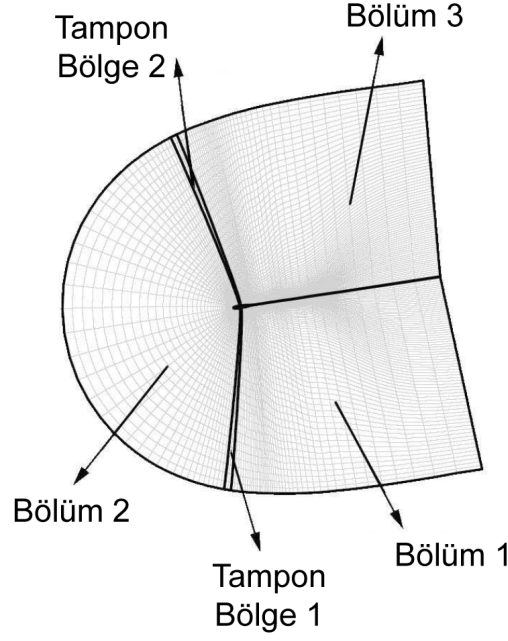
Salınır kanat kesitleri etrafında çözülmüş akış alanları, zamana bağlı aerodinamik yüklerden yola çıkılarak hesaplanan güç katsayısı ve güç üretimi verimi açısından analiz edilmiştir.

Eniyileme metodu olarak, Cevap Yüzeyi Yöntemi (*İng: Response Surface Methodology - RSM*) kullanılmıştır.

2.2 Navier-Stokes Çözücü

Kanat kesiti etrafındaki akışların hesaplanması için sıkışabilir, viskoziteli (*İng: incompressible and viscous*) akışların yapıli çözüm ağında (*İng: structured grid*) incelenmesini sağlayan bir Navier-Stokes çözücü kullanılmıştır [Kaya1, Kaya2, Kaya3]. Çözücüde zaman integrasyonu kapalı (*İng: implicit*) olarak yapılmaktadır.

Çözüm ağı parçalara bölünerek akış çözümleri her bir alt ağıda paralel olarak elde edilmiştir (Şekil 1). Ağlararası sınır noktalarında karşılıklı akış değişkenleri alışverişi yapılarak sınır koşulları sağlanır. Akış çözümleri, yönetici-işçi yapılanmasına dayalı basit bir paralel işlem algoritması ile birden fazla işlemci kullanılarak elde edilir. Çözüm ağı alt ağlara bölündükten sonra her bir alt ağıdaki 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.



Şekil 1. Bölünen çözüm ağı

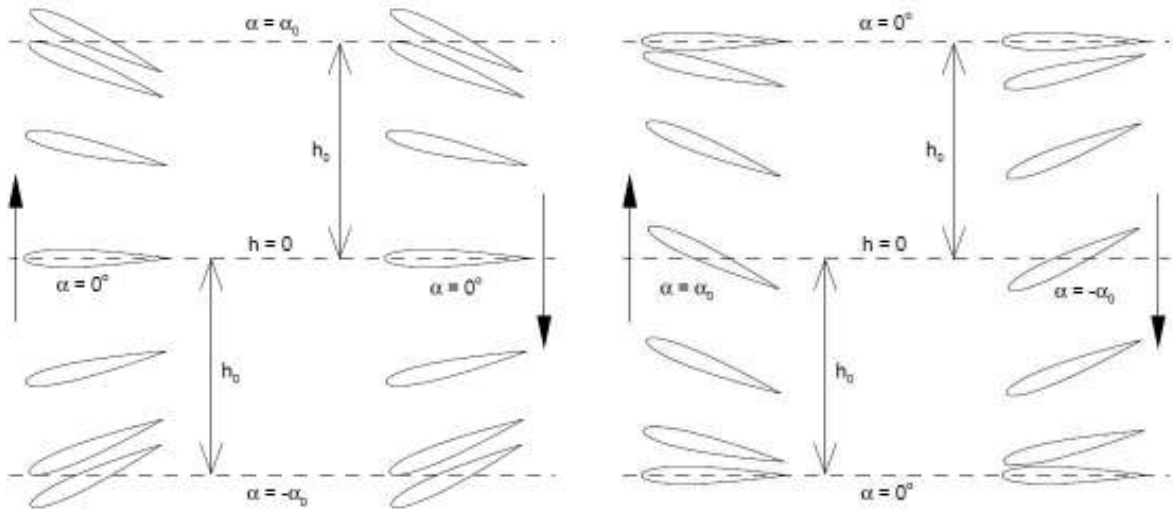
Çözücü, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin sonlu farklar ile formülasyonunu kullanmaktadır. Navier-Stokes denklemleri, çözücü içerisinde güçlü korunum kanunları kapsamında 2-B (iki boyutlu) ve ince tabaka varsayımı ile yer almaktadır. Zamana (t) bağlı denklemlerin (ξ, ζ) eğrisel koordinatlardaki yazılışı aşağıdaki gibidir:

$$\partial_t \hat{\mathbf{Q}} + \partial_\xi \hat{\mathbf{F}} + \partial_\zeta \hat{\mathbf{G}} = \text{Re}^{-1} \partial_\zeta \hat{\mathbf{S}} \quad (1)$$

Denklemden koyu renkle görülen parametreler, sırasıyla, korunum değişkenleri, ξ yönündeki taşınım akısı (*Ing: convection flux*), ζ yönündeki taşınım akısı ve kanata kesitine dik olan ζ yönündeki ince tabaka varsayımli viskozite akısıdır. Re ise, Reynolds sayısıdır. Reynolds sayısının girdi olarak kullanılmasından anlaşılacağı üzere, Navier-Stokes denklemler boyutsuz ortamda çözülmektedir. Taşınım akıları için hesaplamalar, akış yönü (*Ing: upwind*) yaklaşımına dayalı üçüncü dereceli Osher Akı Farkı Ayırıştırma yöntemi ile yapılmıştır.

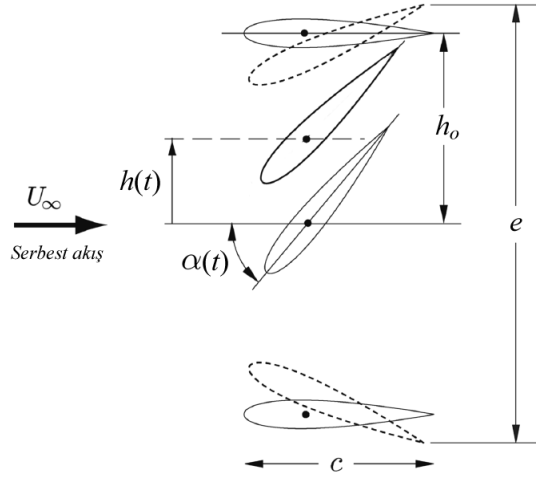
2.3 Salınma Hareketi

Kanat kesitinin salınma hareketi, kanat kesiti ve etrafındaki C-tipi ağı hareket ettirilerek sağlanmıştır. Dalma, h , ve yunuslama, α , olarak tanımlanan salınma hareketi aşağıda verilmiştir:



(a) Faz farkı, $\phi=0^\circ$, durumu

(b) Faz farkı, $\phi=90^\circ$, durumu



(c) Salınma hareketi akış penceresi

Şekil 2. Dalma, $h(t)$ ve yunuslama, $\alpha(t)$ hareketlerinin bileşimi olarak salınır kanat hareketi

$$\begin{aligned} h &= -h_0 \cos(\omega t) \\ \alpha &= -\alpha_0 \cos(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada, h_0 , dalma genliği; α_0 , yunuslama genliğidir. t , zamanı ifade etmektedir. T , salınma periyodu ve $f=1/T$, salınma frekansı olmak üzere $\omega=2\pi f$, dairesel frekanstır. Hareketleri tanımlayan son parametre ϕ ise dalma ile yunuslama arasındaki faz farkıdır. Denklemden görülen h ve h_0 , veter (*Ing: chord*) uzunluğu c ile boyutsuzlaştırılmıştır.

Şekil 2, salınma hareketini görsel olarak sunmaktadır. Şekilde görülen e parametresi, dalma hareketinin ekseni boyunca kanat kesitinin yaptığı maksimum yolu (*Ing: total excursion*) ifade etmektedir. Faz farkı, ϕ değerine bağlı olarak $e \approx 2h_0c$ olduğu görülmektedir. Şekildeki U_∞ ve ok yönü ise serbest akış hızını ve akış yönünü göstermektedir.

Literatürde, kanatların salınma hareketi incelenirken farklı parametreler de değerlendirilmeye alınmıştır. Bu projede, literatüre uygun olarak göz önünde bulundurulanan diğer parametreler şunlardır: indirgenmiş frekans, k , etkin hücum açısı, α_{eff} ve kılıçlama parametresi, χ :

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

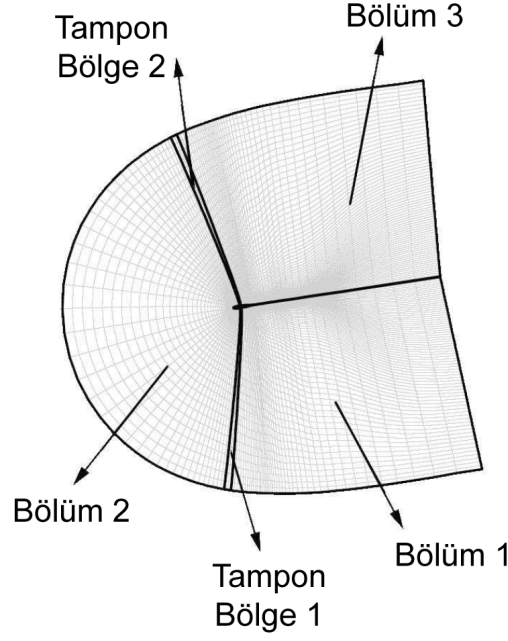
$$\alpha_{eff}(t) = \alpha(t) - \arctan\left(\frac{\dot{h}(t)c}{U_\infty}\right) \quad (4)$$

$$\chi = \frac{\alpha_0}{\arctan(kh_0)} \quad (5)$$

İndirgenmiş frekans, k , boyutsuz bir parametre olup salınma hareketi zaman ölçeğinin akışın taşınım zaman ölçeğine oranı olarak yorumlanabilir.

Etkin hücum açısının, α_{eff} , oluşmasına, dalma hareketinin zamana bağlı hız değişimi, $\dot{h}(t)$, sebep olmaktadır. Denklemden verilen etkin hücum açısı, kanat kesitinin yunuslama merkezinde tanımlanmıştır. Kanat kesitinin başka lokasyonlarında görülen etkin hücum açısı değerleri için yunuslama konumunun ve yunuslama hareketi hız değişiminin de etkisi olduğu unutulmamalıdır. Bu çalışmada, Denklem 4'te verildiği gibi yunuslama merkezine göre tanımlanmış etkin hücum açısı değerlendirilmiştir. Etkin hücum açısının zamana bağlı değişimi içerisindeki maksimum değerinin dinamik tutunmazlıkta (*Ing: dynamic stall*) ve aerodinamik kuvvetlerin uç değerlere ulaşmasında önemli rol oynadığı düşünülmektedir[1].

Kılıçlama parametresi, χ , salınma hareketi neticesinde güç ya da itkidenden hangisinin üretileceği konusunda bilgi vermektedir. Yarı-Daimi (*Ing: quasi-steady*) akış varsayımı ve dalma ile yunuslama arasında 90°'lik faz farkı için $\chi < 1$ durumları itki üretirken, $\chi > 1$ durumlarında ise güç üretilmektedir [1].



Şekil 3. Aerodinamik yüklerin zamana göre değişimine bir örnek

2.4 Üretilen Gücün ve Güç Üretim Veriminin Tespiti

Periyodik bir fonksiyon olan sinüs fonksiyonuna göre salınma hareketi yapan kanat kesitleri üzerinde oluşan zamana bağlı aerodinamik yükler “daimi-periyodik” (*İng: steady periodic*) adı verilen bir davranış göstermektedir (Şekil 3). Zamana bağlı hesaplamalar boyunca akış alanı çözümü periyodik bir durum almakta ve bir salınma periyodu için hesaplanan ortalama güç sabit bir değere yakınsamaktadır.

Bu projede, güç yerine boyutsuz bir parametre olan güç katsayısının kullanılması tercih edilmiştir. Ortalama güç katsayısının ve güç üretim veriminin tanımları aşağıda yapılmaktadır:

$$C_P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left(C_l(t) \dot{h}(t) + C_m(t) \dot{\alpha}(t) c \right) dt \quad (6)$$

$$\eta = \frac{1}{e/c} C_P \quad (7)$$

Denklem 6’da görülen $C_l(t)$ ve $C_m(t)$, kanat kesiti üzerindeki anlık kaldırma kuvveti katsayısı ve anlık moment katsayısıdır. Moment hesabı, yunuslama merkezine göre yapılmıştır. T , salınma periyodu süresidir.

Denklem 7’de verilen güç üretim veriminin tanımı, 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, bir önceki bölümde de belirtildiği gibi kanat kesitinin dalma ekseninde yaptığı maksimum yoldur (Şekil 2). Denklemden anlaşılacağı üzere aynı güç katsayısını veren ama daha küçük akış penceresine sahip bir salınma hareketinin güç üretim verimi daha yüksek olacaktır.

2.5 Cevap Yüzeyi Yöntemi ile Eniyileme

Cevap Yüzeyi Yöntemi (*İng: Response Surface Methodology – RSM*), bir veya birden fazla girdi ile bir çıktı arasındaki bilinmeyen fonksiyonel ilişki için analitik formu bulunan bir yaklaşım (*İng: approximate*) model oluşturma ilkesine dayalıdır.

Bu çalışmada, girdi, salınma hareketini tanımlayan parametreler; çıktı ise üretilen güçten elde edilen ortalama güç katsayısı, C_P veya güç üretim verimidir, η . Dolayısıyla, akış alanını etkileyen diğer bütün parametreler (Reynolds ve Mach sayıları, kanat kesiti geometrisi, vb...) sabit tutulduğunda, çıktı, girdiler cinsinden şöyle yazılabilir:

$$C_P = f_1(k, h_o, \alpha_o, \phi) \quad (8)$$

$$\eta = f_2(k, h_o, \alpha_o, \phi) \quad (9)$$

Ancak, Navier-Stokes denklemlerinin çözümüne bağlı oldukları için f_1 ve f_2 analitik olarak bilinmeyen fonksiyonlardır. Bu yüzden, belli bir k , h_o , α_o ve ϕ değer kümesi için girdi-çıkıtları arasındaki fonksiyonel ilişkiye yaklaşım sağlamak üzere $g_1 \cong f_1$ ve $g_2 \cong f_2$ fonksiyonları oluşturulabilir [RSM, 57]. Bu amaçla oluşturulan yaklaşım fonksiyonuna Cevap Yüzeyi adı verilir.

Bu çalışmada, cevap yüzeyleri, g_1 ve g_2 , girdi parametrelerine bağlı olarak 2. dereceden polinomlar şeklinde oluşturulmuştur:

$$g(k, h_o, \alpha_o, \phi) = a_{11}k^2 + 2a_{12}kh_o + 2a_{13}k\alpha_o + \dots + a_{22}h_o^2 + \dots \quad (10)$$

Denklem 10'da yer alan a_{ij} katsayıları, aşağıda verilen en az kareler (İng: least-square) probleminin çözülmesi ile elde edilmiştir:

$$\begin{aligned} \min_{a_{ij}} \quad & \sum_{n=1}^N (g_1(k, h_o, \alpha_o, \phi)_n - C_{Pn})^2 \\ \min_{a_{ij}} \quad & \sum_{n=1}^N (g_2(k, h_o, \alpha_o, \phi)_n - \eta_n)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

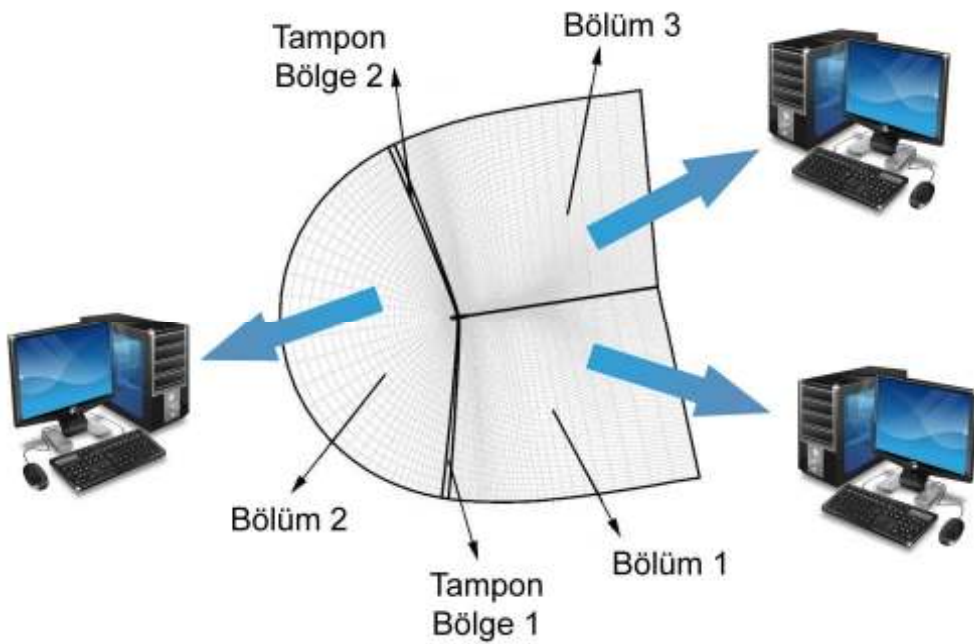
Burada, N , farklı k , h_o , α_o ve ϕ kombinasyonları için hesaplanan zamana bağılı Navier-Stokes çözümlerinin toplam sayısıdır. Girdi parametrelerinin kombinasyonlarının yer aldığı listeye Deney Tasarımı (*Ing: design of experiment - DOE*) adı verilmektedir. Bu çalışmada, deney tasarımı olarak k , h_o , α_o ve ϕ parametrelerinin belli aralıklarda taranması ile gerilen uzay kullanılmıştır.

Yaklaşım için analitik fonksiyon, g , belirlendikten sonra cevap yüzeyinin yani bu fonksiyonun maksimum değerini sağlayan eniyi (*Ing: optimum*) k , h_o , α_o ve ϕ değerleri gradyanın sıfıra eşitlenmesi ile kolayca hesaplanmıştır.

2.6 Paralel Hesaplama

Akış çözümleri, yönetici-işçi yapılanmasına dayalı basit bir paralel işlem algoritması ile birden fazla işlemci kullanılarak elde edilmiştir. Bu algoritmada, çözüm ağı sistemi alt ağlara bölündükten sonra her bir alt ağdaki çözüm, farklı bir işlemcide hesaplanır (Şekil 4). Sonunda, bütün sonuçlar birleştirilerek orijinal problemin çözümü elde edilir.

İşlemciler arası iletişim PVM (Parallel Virtual Machine Sürüm 3.4.6) kitaplık rutinleri (*Ing: library routine*) ile sağlanmıştır. Paralel hesaplamalar, 64 bit Linux İşletim Sistemi altında çalışan çok işlemcili bilgisayarlardan oluşan bir PC öbeğinde yapılmıştır.



Şekil 4. Çözüm alanının paralel hesaplama için bölümlenmesi

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Giriş

Sayısal çalışmada elde edilen değerlendirmeler doğrultusunda salınır kanatlar ve salınma hareketini sağlayacak mekanizma ürettirilmiştir. Yapılan deneylerde rüzgâr hızının, dalma genliğinin, veter uzunluğunun, kanat açıklığının ve yunuslama merkezinin güç üretimine etkisi araştırılmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan dalma ve yunuslama arasındaki bağıntının etkisine de bakılmıştır.

Deneyler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM) bünyesinde faaliyet gösteren test altyapısında yapılmıştır.

Salınır kanatlar ve salınma sağlayıcı mekanizmadan oluşan jeneratör tasarımından elde edilen güç bir adım motor (*İng: step motor*) vasıtasıyla anlık voltaj çıkışı değerlerinden yararlanarak hesaplanmıştır.

Deneyisel çalışmanın değerlendirilmesi, farklı rüzgâr hızları ve farklı kanat boyutları için güç ve güç üretimi veriminin nasıl değiştiği üzerinden yapılmıştır. Sonuçlar sayısal çalışmada elde edilen değer ile de karşılaştırılmıştır.

3.2 Deney Düzeneği

Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretilmesi konusunda yapılan deneyisel çalışmalarla ilgili olarak literatürde üç farklı deney düzeneği yapılandırması yer almaktadır [.....]:

1. *Hareket Tayinli*: Bu yapılandırmada, salınma hareketi tamamen dışarıdan kontrol edilmektedir. Dalma ve yunuslamanın zamana göre değişimi yani anlık pozisyon değerleri mekanizmaya gerçek zamanlı olarak verilmektedir.

Avantaj: İstenilen her salınma hareketi (örnek: sinüzoidal) sayısal çalışmalarda olduğu gibi mekanizmaya verilebilir.

Dezavantaj: Hareketin mekanizmaya verilmesi için aerodinamik kuvvetlere, mekanizma ataletine ve sürtünmelere karşı düzeneğe dışarıdan güç sağlamak gerekmektedir.

2. *Yarı Pasif*: Bu yapılandırmada, dalma genliği veya yunuslama genliği mekanizma tasarımının girdisi olup dalma hareketi ile yunuslama hareketi arasında $f(h(t), \alpha(t)) = 0$ gibi bir ilişki bulunmaktadır. Böylelikle salınma hareketi 2 serbestlik derecesinden 1 serbestlik derecesine düşmektedir.

Avantaj: Düzeneğe dışarıdan ekstra güç vermeden salınma hareketi sağlanmaktadır.

Dezavantaj: Salınma periyodu boyunca dalma ve yunuslama hızlarına müdahale edilemez. Salınma hızı, aerodinamik kuvvetler tarafından belirlenmektedir.

3. *Tam Pasif:* Bu yapılandırmada, sadece dalma genliği mekanizmanın tasarımı sırasında kullanılmaktadır. Salınır kanatların salınma hareketi tamamen aerodinamik kuvvetler tarafından belirlenmektedir.

Avantaj: Özel hareket mekanizmasına gerek yoktur. Basitçe tasarlanıp üretilir. Düzeneğe dışarıdan ekstra güç sağlanmaz.

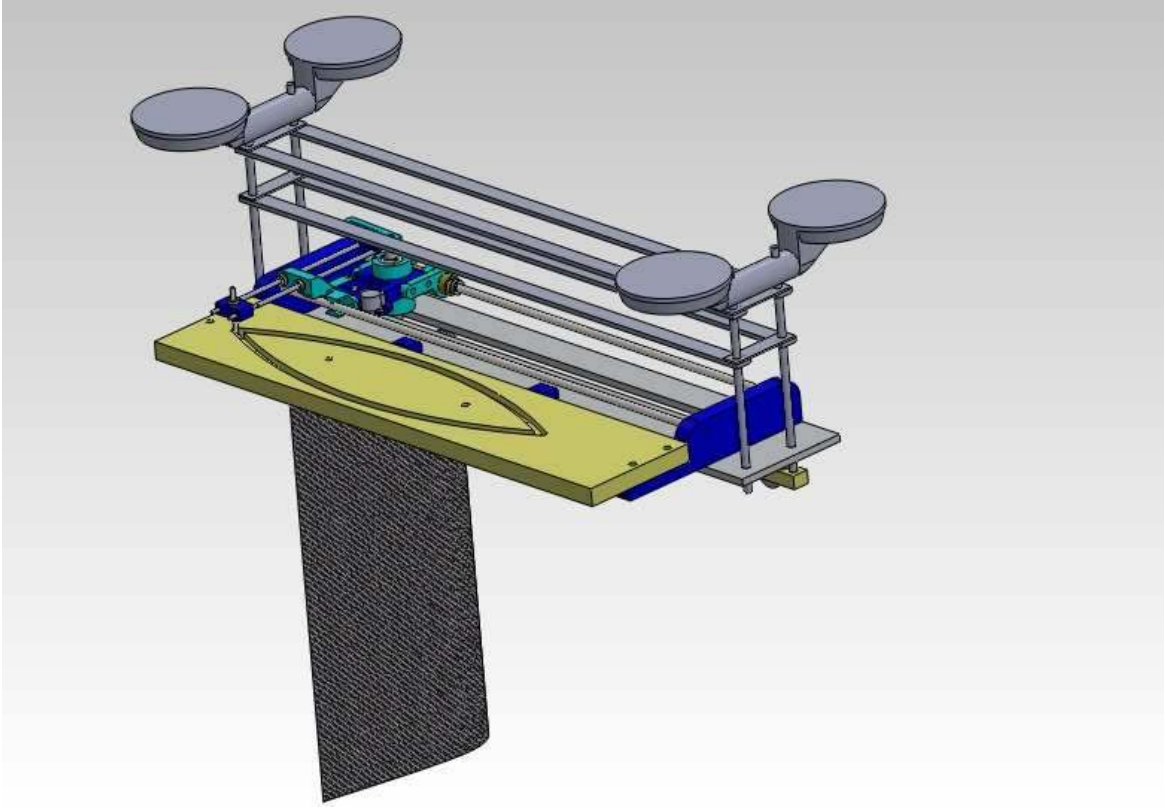
Dezavantaj: Dalma genliği dışında salınma hareketine müdahale edilemez.

Bu çalışmada, 2 numaralı yaklaşım tercih edilerek yarı pasif bir güç jeneratörü tasarlanmıştır (Şekil 5, 6 ve 7). Tasarımda yunuslama hareketi, anlık dalma pozisyonuna göre düzenek tarafından belirlenmektedir.

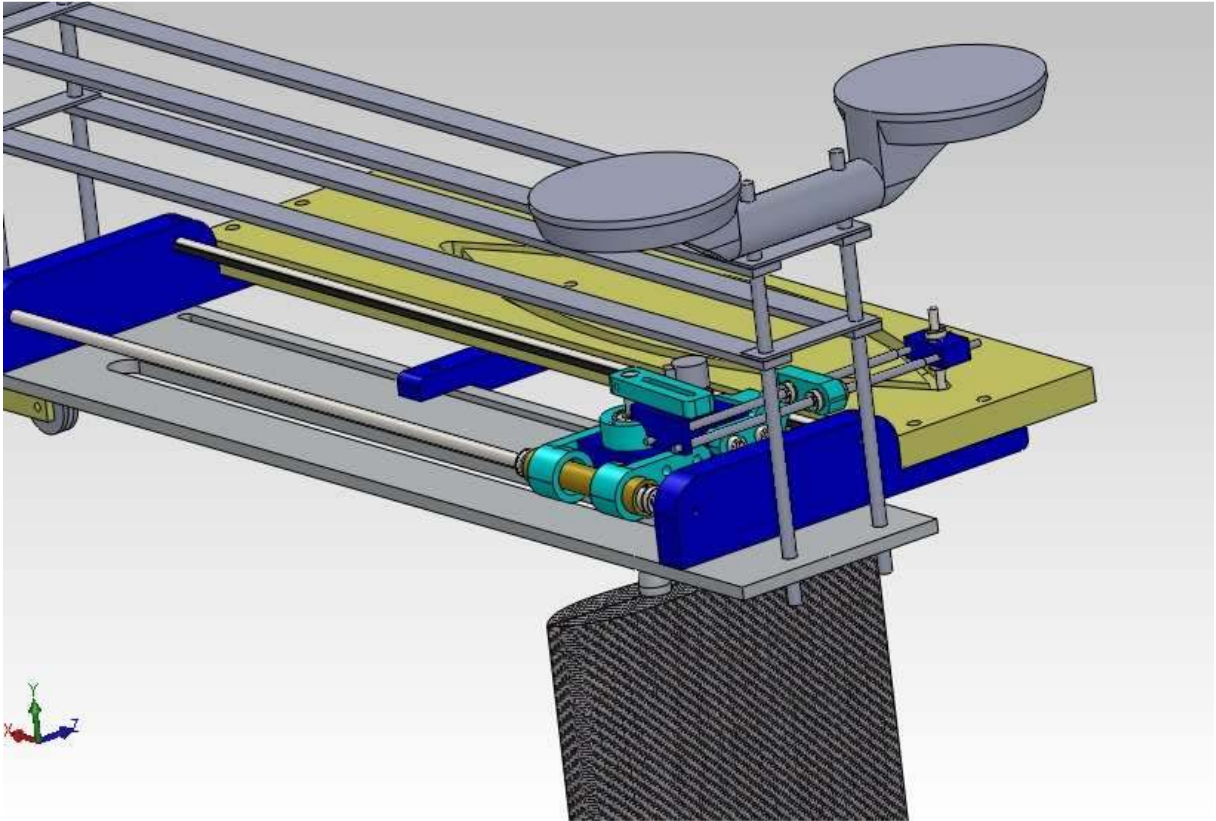
Not: Projenin ikinci gelişme raporunda, basit yapısı sebebiyle tam pasif bir mekanizma kullanılacağı belirtilmişti. Ancak, bu durumda deneysel sonuçlar ile sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırılma imkânı olmayacağı için bu tercihten vazgeçilerek yarı pasif yapılandırmaya yönelinmiştir.



Şekil 5. Salınır kanat ve hareket mekanizmasından oluşan güç jeneratörü



Şekil 6. Dalma hareketi boyunca yunuslama pozisyonunu belirleyen hareket yolu (eliptik)



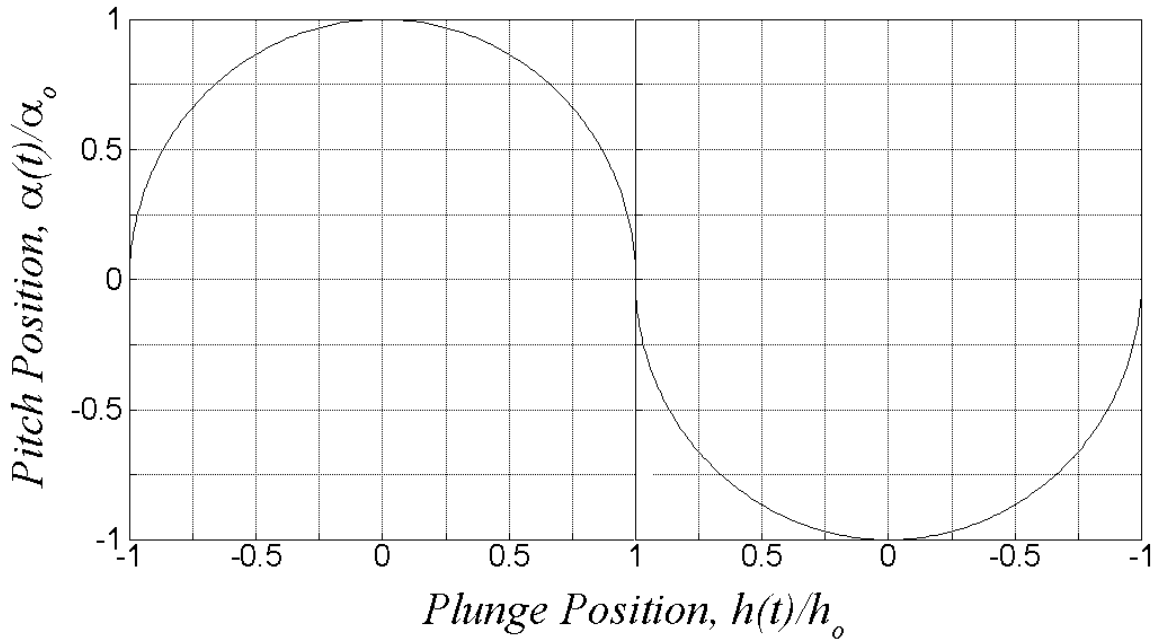
Şekil 7. Eliptik yol konumunu yunuslama pozisyonuna transfer eden mekanik düzen

Şekil 6'da verilen eliptik yolu belirleyen dalma ile yunuslama hareketleri arasındaki bağıntı aşağıda verilmiştir:

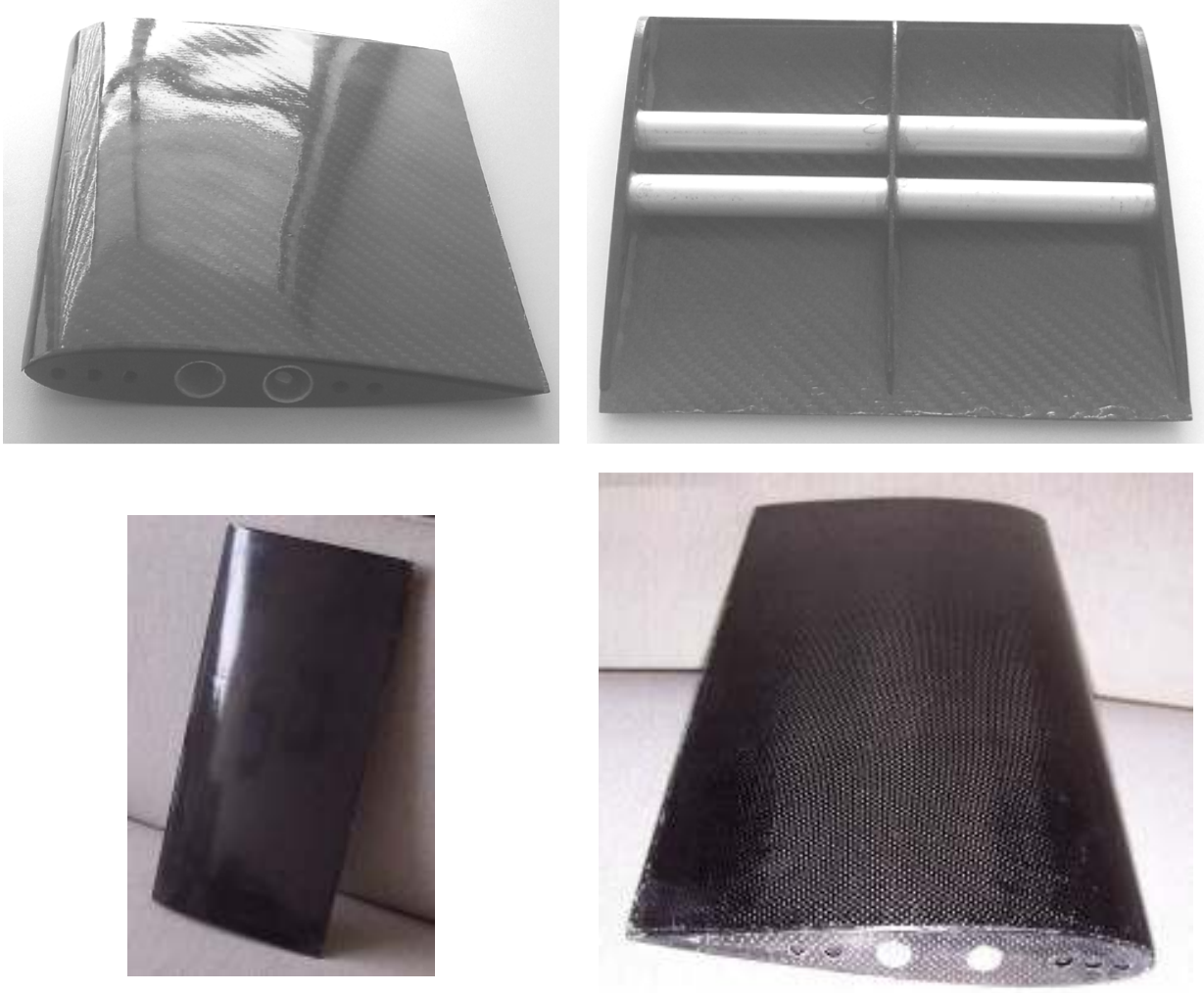
$$\left(\frac{h(t)}{h_o}\right)^2 + \left(\frac{\alpha(t)}{\alpha_o}\right)^2 = 1 \quad (12)$$

Şekil 7'de görülen mekanik düzen vasıtasıyla herhangi bir andaki $h(t)$ değeri için denklemde verilen bağıntıya göre $\alpha(t)$ değeri sağlanmaktadır. Denklemden görüldüğü üzere eğer dalma hareketi, $h(t)$, aerodinamik kuvvetlerin etkisi ile sinüzoidal olursa yunuslama hareketi, $\alpha(t)$, de sinüzoidal olmaktadır. Aralarındaki faz farkı ise $\phi=90^\circ$ 'dir. Böylelikle, sayısal çalışmada kullanılmış olan salınma hareketini (Denklemler 2) $\phi=90^\circ$ şartı için sağlamak mümkün olmaktadır.

Deneyisel çalışmada aerodinamik kuvvetler sayesinde başlayacak olan dalma hareketi sinüzoidalliğe ne kadar yakın olursa yunuslama hareketinin sinüzoidalliğe o kadar yakın olacağı beklenmektedir. Denklem 12'de verilen anlık yunuslama konumunun anlık dalma konumuna göre değişimi Şekil 8'de görsel olarak da sunulmaktadır.



Şekil 8. Birim genlikte yunuslama konumunun birim genlikte dalma konumuna göre değişimi



Şekil 9. Üretilen kompozit malzemeli kanatlardan örnekler (içi boş yapı ve 2 farklı yunuslama merkezi)

3.2 Salınır Kanatlar

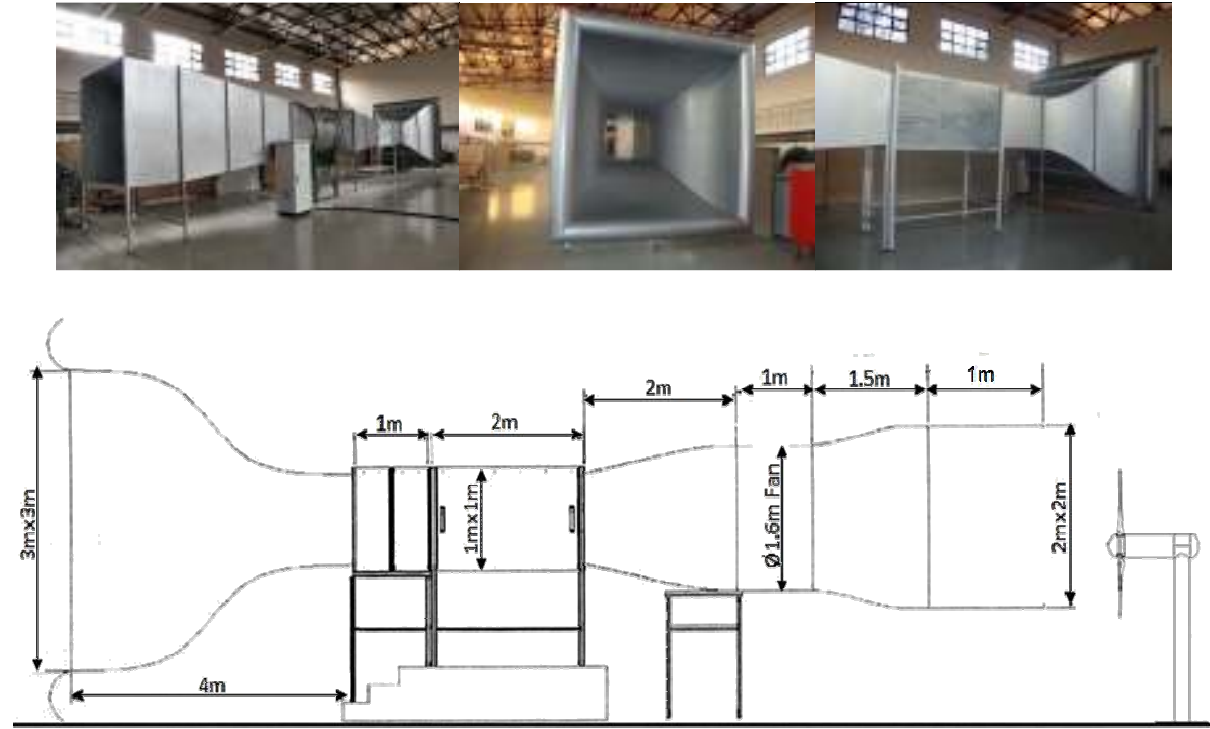
Hizmet alımı ile toplam 6 kanat üretimi sağlanmıştır (Şekil 9). Sayısal hesaplama kanat ağırlığı göz önünde bulundurulmadığı için kütleyi minimize edebilmek amacıyla üretimde kompozit malzeme kullanılmıştır. Ayrıca, kanatların iç yapısı boş olarak imal edilmiştir. Yunuslama merkezinin üretilen güce etkisini deneysel ortamda incelemek için de bu duruma uygun üretim istenmiştir.

Kullanılacak olan rüzgâr tüneline test bölümünün büyüklüğüne uygun olarak kanatların veter uzunluğuna ve kanat açıklığına karar verilmiştir. İlk 5 kanatın veter uzunluğu 15 cm, kanat açıklık oranı 1.3'tür. Son üretilen kanatın veter uzunluğu 22.5 cm ve kanat açıklık oranı 2.0'dır. Kanat açıklığının etkisini anlamak amacıyla düşük kanat açıklığına sahip kanatlar sonsuz civata ile birbirine bağlanarak daha yüksek kanat açıklığı elde edilmiştir. Yunuslama

merkezi olarak hücum kenarından 1/2 ve 1/3 veter uzaklığı seçilmiştir. Kanatların hepsi NACA0012 profiline sahiptir.

3.3 Rüzgâr Tüneli

Projenin yürütüldüğü Türk Hava Kurumu Üniversitesinde bulunan rüzgâr tünelinin test bölümünün küçük olması sebebiyle Orta Doğu Teknik Üniversitesi Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM) test altyapısında bulunan düşük hızlı bir açık test rüzgâr tüneli kullanılmıştır (Şekil 10 ve Tablo 3). Proje bütçesinin hizmet alımı faslında bulunan ödenekte yeterli bakiye bulunması sebebiyle RÜZGEM rüzgâr tüneli kullanımı hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10. Kullanılan açık test rüzgâr tüneli

Tablo 3. Tünelin teknik değerleri

Test odası kesiti	1x1 m ²
Açık rotor test kesiti	2x2 m ²
Fan gücü / çapı	90 kW / 1.6 m
Maksimum hız	40 m/s
Açık test kesiti maksimum hızı	10 m/s

3.4 Üretilen Gücün ve Güç Üretim Veriminin Tespiti

Bu sistem için enerji korunumu denklemi aşağıdaki gibidir:

$$L\dot{h} + M\dot{\alpha} = m\dot{h}\ddot{h} + I\dot{\alpha}\ddot{\alpha} + P_e \quad (13)$$

Burada, L , kaldırma kuvveti, M ise aerodinamik momenttir. m ve I , sistemin kütlesi ve atalet momentidir. P_e , sistemden elde edilen gücü vermektedir. h ve α , zamana bağlı boyutlu dalma ve yunuslama konumlarıdır. • işareti, zaman göre türevi simgelemektedir. Denklem (ve salınma konumları) boyutsuzlaştırıp bir salınma periyotu boyunca ortalama değer olarak yazılırsa aşağıdaki gibi olur:

$$C_P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left(C_L\dot{h} + C_M\dot{\alpha} - \frac{m}{\frac{1}{2}\rho b c^2} \dot{h}\ddot{h} - \frac{I}{\frac{1}{2}\rho b c^4} \dot{\alpha}\ddot{\alpha} \right) dt \quad (14)$$

Denklem 14'ün, sayısal hesaplamada kullanılan Denklem 6'dan iki farkı bulunmaktadır:

- Kütle ve atalet momentinin göz önünde bulundurulmadığı sayısal hesaplamaya göre daha düşük değer almaktadır.
- Deneyin 3-B (üç boyutlu) olması sebebiyle kanat açıklığı, b , etkisi görülmektedir. Ayrıca, C_L ve C_M , 3-B aerodinamik katsayılarıdır.

Deneyde zamana bağlı P_e , veri toplama cihazı ile salınma periyotları boyunca kaydedilmiş ve veri uzunluğuna bağlı olarak son birkaç periyotun ortalamasına göre güç katsayısı, C_P , hesaplanmıştır. Zamana bağlı P_e değeri, salınır kanatlar ile birlikte hareket eden düzeneğe doğrudan monteli bir adım motorun voltaj çıktısı olarak kaydedilmiştir. Voltaj değerlerinin güce dönüştürülmesi amacıyla yapılan adım motorun kalibrasyonu için farklı büyüklükteki kütlelerin belli yükseklikten düşerken adım motora birim zamanda kazandırdığı enerji değerleri kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada güç üretim veriminin tanımı sayısal çalışmada olduğu gibi yapılmıştır:

$$\eta = \frac{1}{e/c} C_P \quad (15)$$

4. HESAPLAMA SONUÇLARI

4.1 Giriş

Bu proje kapsamında hesaplanan bütün akış çözümleri, literatür [1,4] ile uyumlu olması bakımından laminar akış varsayımı ile elde edilmiştir. Projenin ikinci aşaması olan deneysel çalışma koşullarında hava akışı düşük hızlı (rüzgâr benzetimi) olacağından, kullanılan sıkıştırılabilir çözücüde serbest akış Mach Sayısı, $M_{\infty}=0.1$ olarak kullanılmıştır. Yine literatür [1,5] ile uyumlu olması ve yapılacak olan deneylerin koşullarını yaklaşık sağlaması için serbest akış Reynolds Sayısı, $Re=1100$ olarak seçilmiştir. Kanat kesiti olarak NACA 0012 kullanılmıştır. Yunuslama merkezi [1]'de olduğu gibi hücum kenarından 1/3 veter uzaklıkta alınmıştır.

Paralel ortamda yapılan hesaplamaların her birinde çözüm ağı 3 bölüme parçalanmıştır (Şekil 4). Parametrik uzayı geren deney tasarımının bazı durumları (*İng: DOE cases spanning the parametric space*), bilgisayar 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 yüklerin ortalamasına göre hesaplanmıştır (Denklem 6 ve 7).

4.2 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Parametrik uzayı geren deney tasarımının durumları, indirgenmiş frekansın, k , yunuslama genliğinin, α_o , dalma genliğinin, h_o ve dalma ile yunuslama arasındaki faz farkının, ϕ , belli aralıklardaki değerlerinin taranması ile elde edilen kombinasyonlardır. k , 0.15-1.50 arasında logaritmik olarak değişirken, α_o , 5° - 90° arasında doğrusal değişmiştir. h_o ve ϕ değerleri de doğrusal değişmiştir. Bu son iki parametrenin aralıkları, sırayla, 0.5-1.50 ve 60° - 90° 'dir. Gerilen parametrik uzay Tablo-4'te verilmiştir.

Oluşturulan uzayda $5 \times 5 \times 10 \times 18 = 4500$ eleman bulunmasına rağmen 2.3 Bölümü'nde de anlatıldığı üzere sadece $X \geq 1$ koşulunu sağlayan durumlar hesaplanmıştır. Hesaplanan durum sayısı 3235'tir. 1265 durum, $X \geq 1$ durumunu sağlayamamıştır. 3235 durumun hesaplanması için yaklaşık 2 aylık bir çözücü çalıştırma süresi gerekmiştir.

Tablo 4. İncelenen salınma hareketlerinin parametrik uzayı

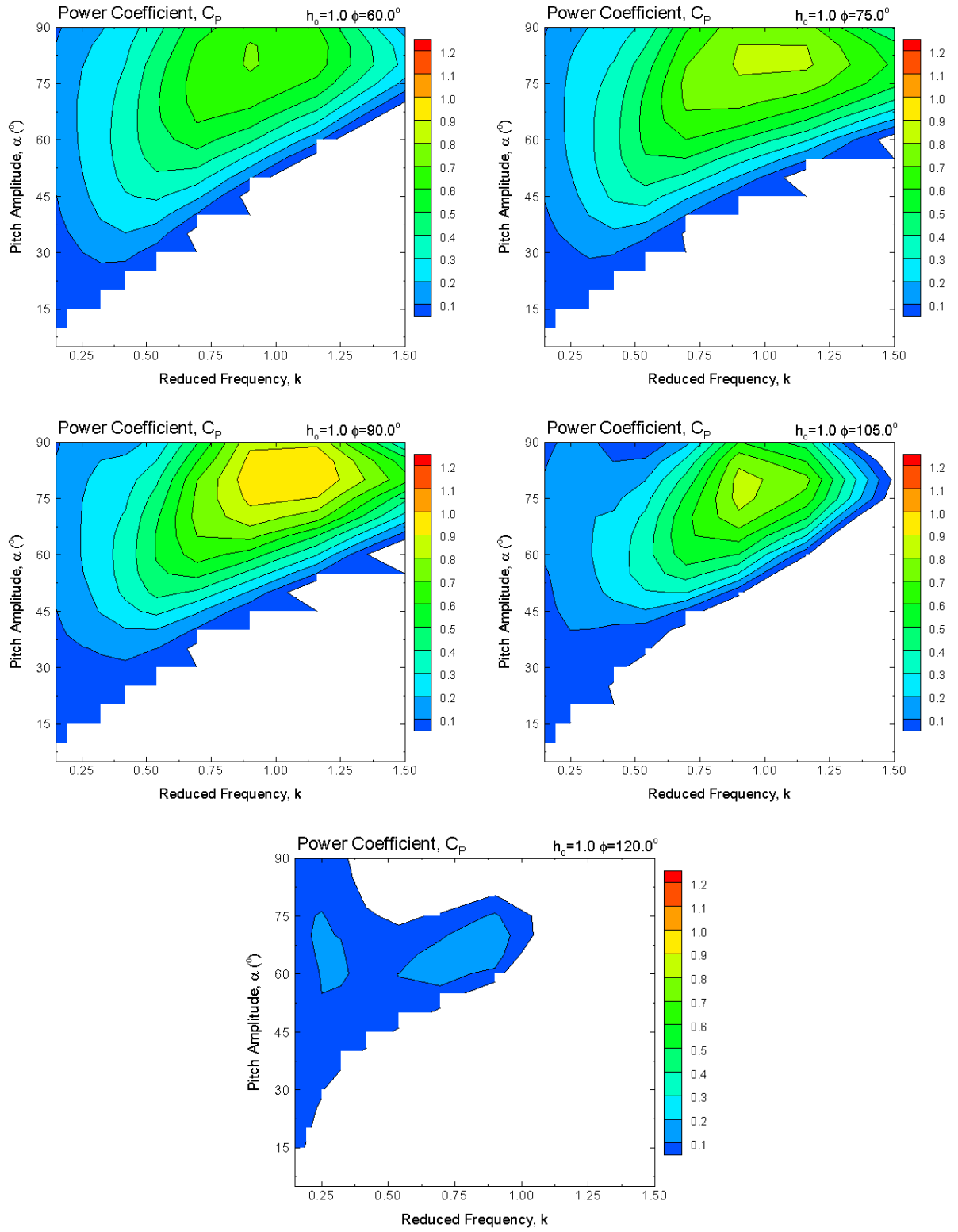
		Dalma genliği, h_o				
		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
Faz Farkı, ϕ (°)	120	İndirgenmiş frekans, k = 0.150, 0.194, 0.250, 0.323, 0.417, 0.539, 0.696, 0.899, 1.160, 1.500				
	105					
	90					
	75	Yunuslama genliği (°), α_o = 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0, 45.0, 50.0, 55.0, 60.0, 65.0, 70.0,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

Her bir salınma hareketi durumunun 5 periyotluk zamana bağlı çözümü sonrasında, son periyotun ortalamasına göre güç katsayısı ve güç üretim verimi hesaplanmıştır. Hesaplanan güç katsayıları ve güç üretim verimleri, sabit h_o ve ϕ değerleri için k - α_o , parametrik uzayında haritalanmıştır. Haritaların oluşturulmasında sadece güç üreten durumlar (pozitif güç katsayısı, C_p , durumu) kullanılmıştır.

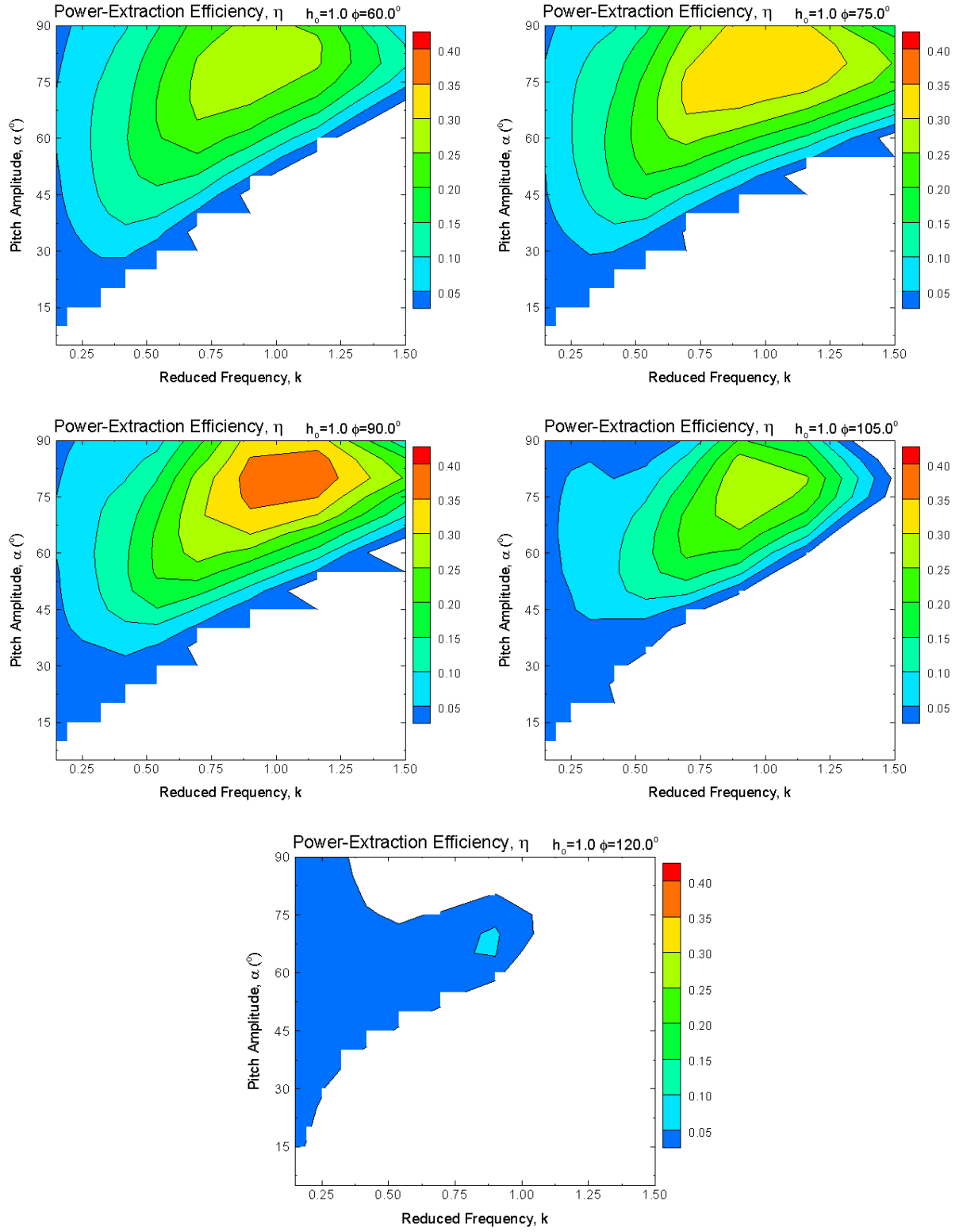
Güç katsayısı ve güç üretim verimi için örnek haritalar Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Örnek haritalar $h_o=1.0$ durumunu göstermektedir. Şekillerde 5 farklı ϕ değerine (60°, 75°, 90°, 105°, 120°) karşılık 5 harita bulunmaktadır.

Haritalar incelendiğinde maksimum güç ve verim sağlayan salınım hareketi için eniyi indirgenmiş frekansın, k , 0.60-1.40 arasında ve eniyi yunuslama genliğinin, α_o , ise 60°-90° arasında olduğu gözlenmiştir. Bu aralıklarda daha yüksek çözünürlüklü yeni salınma hareketi durumları için akış hesaplanması yapmanın faydalı olacağı değerlendirilmiş ve parametrik uzayı geren deney tasarımı güncellenmiştir.

Deney tasarımına ilave edilen durumlar, Tablo-5'te özetlenmektedir. k değerlerinin, bu defa, doğrusal ve daha sık aralıklı değiştiği Tabloda görülmektedir. Eklenen yeni $3 \times 3 \times 9 \times 7 = 567$ durumdan 564 tanesi $\chi > 1$ koşulunu sağlamıştır. İlave 564 durumun hesaplanması için yaklaşık 10 günlük bir çözücü çalışma süresi gerekmiştir.



Şekil 11. $h_0=1.0$ durumu için güç katsayısının k - α_0 parametrik uzayında haritası

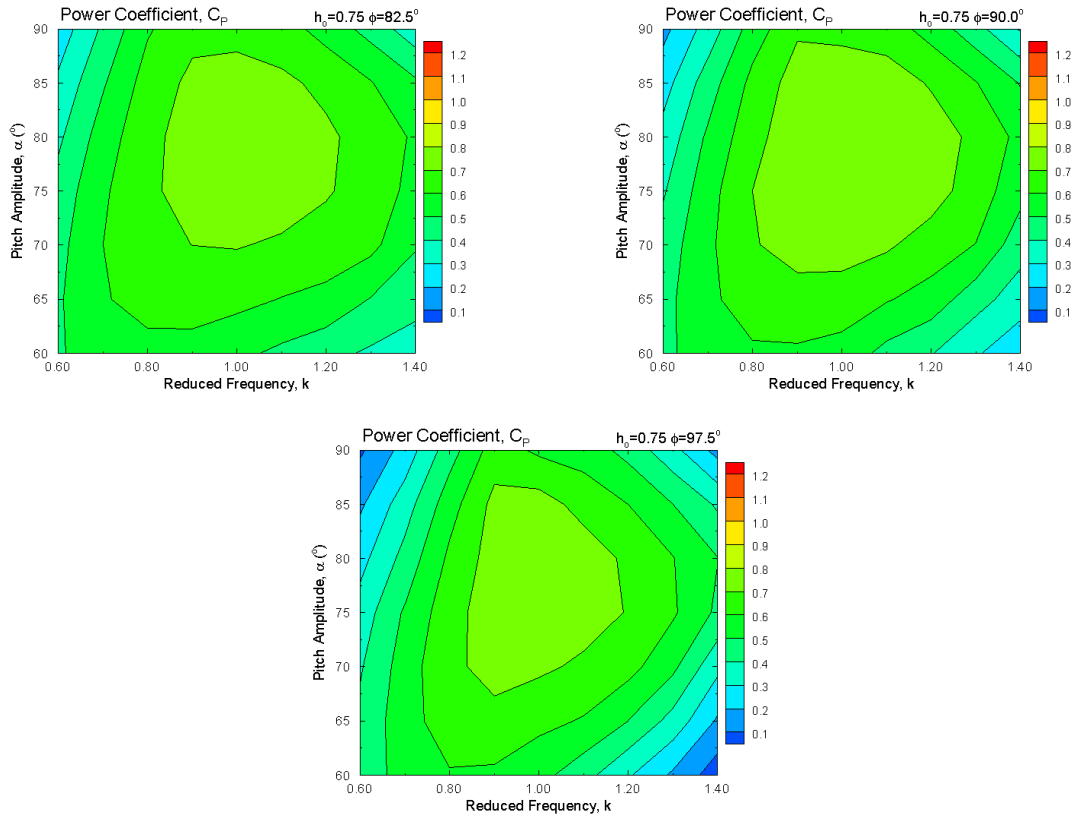


Şekil 12. $h_0=1.0$ durumu için güç üretimi veriminin k - α_0 parametrik uzayında haritası

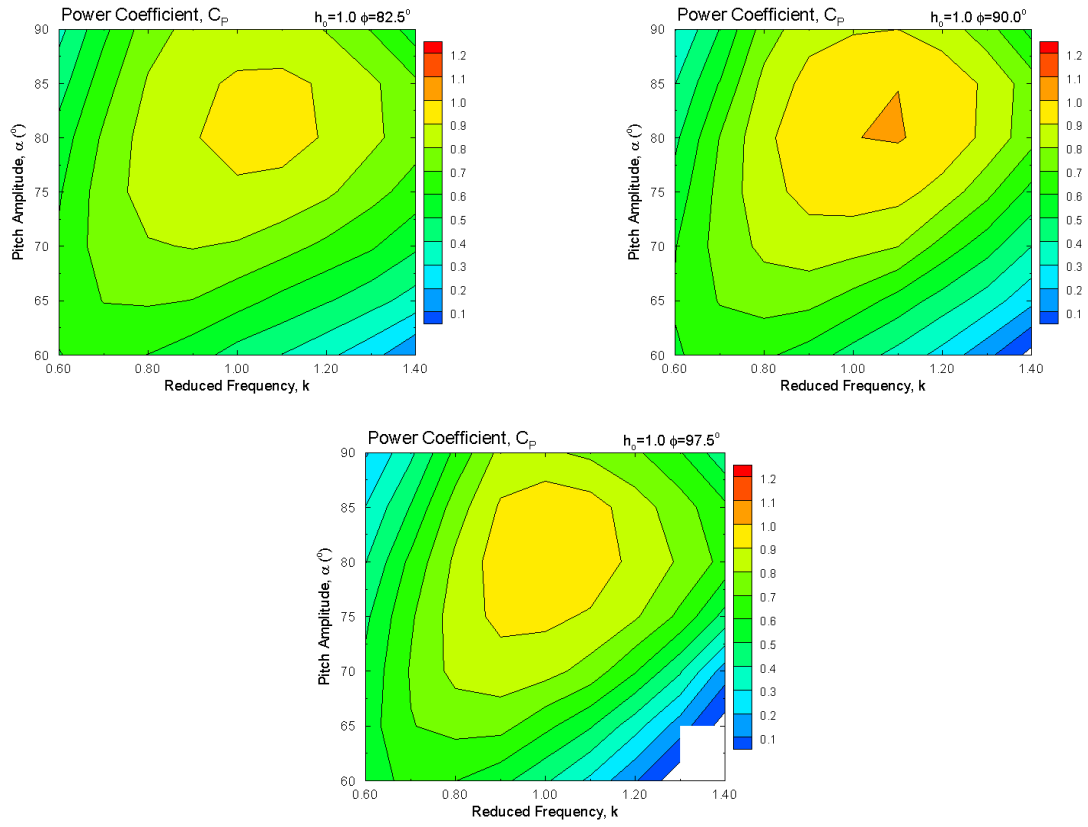
Tablo 5. Parametrik uzaya eklenen salınma hareketi durumları

		Dalma genliği, h_o		
		0.75	1.00	1.25
Faz Farkı, ϕ (°)	97.5	İndirgenmiş frekans, $k =$ 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 Yunuslama genliği (°), $\alpha_o =$ 60.0, 65.0, 70.0, 75.0, 80.0, 85.0, 90.0		
	90.0			
	82.5			

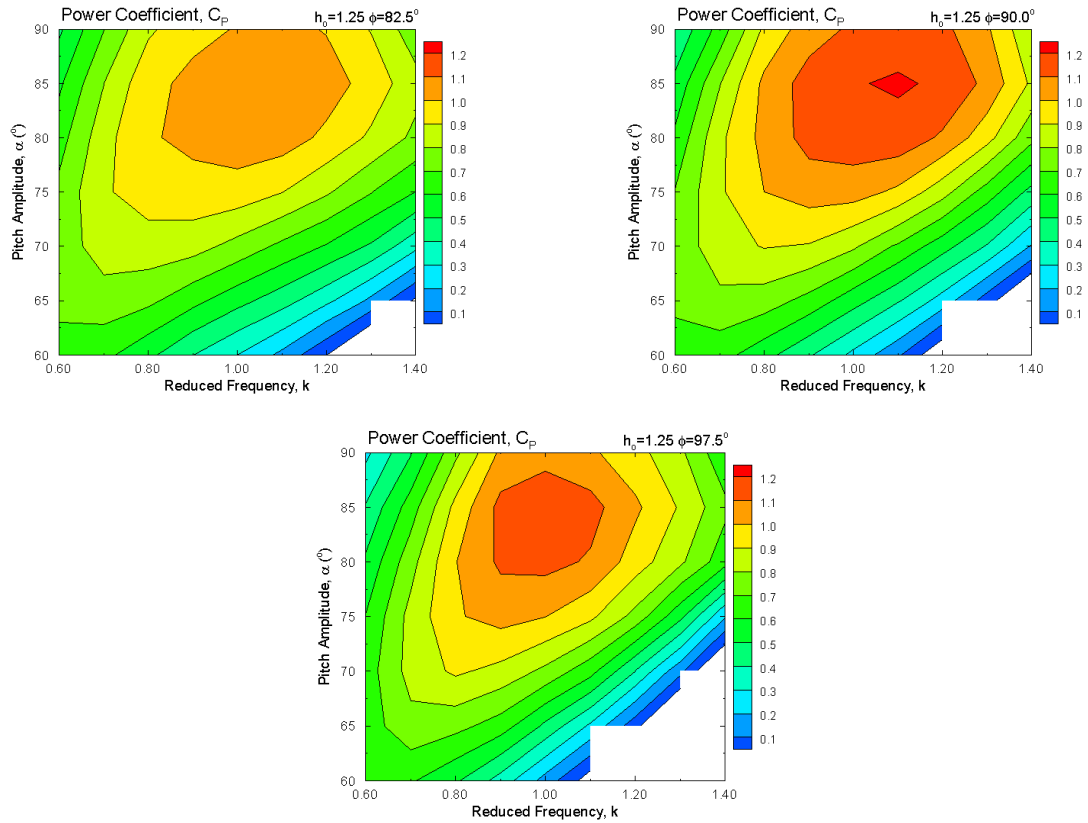
Parametrik uzaya eklenen ilave salınım hareketi durumları için hesaplanan güç katsayısı ve güç üretim verimi haritaları Şekil 13-15'da gösterilmektedir. Şekil 13, $h_o=0.75$ için, Şekil 14, $h_o=1.00$ için ve Şekil 15, $h_o=1.25$ için güç katsayısı haritasını vermektedir. Güç üretim verimi haritaları ise aynı sırayla Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18'de verilmiştir. Her bir şekilde 3 farklı ϕ değerine (82.5°, 90.0°, 97.5°) karşılık 3 harita bulunmaktadır. Haritalarda yine sadece güç üreten durumlar (pozitif güç katsayısı, C_P , durumu) gösterilmiştir.



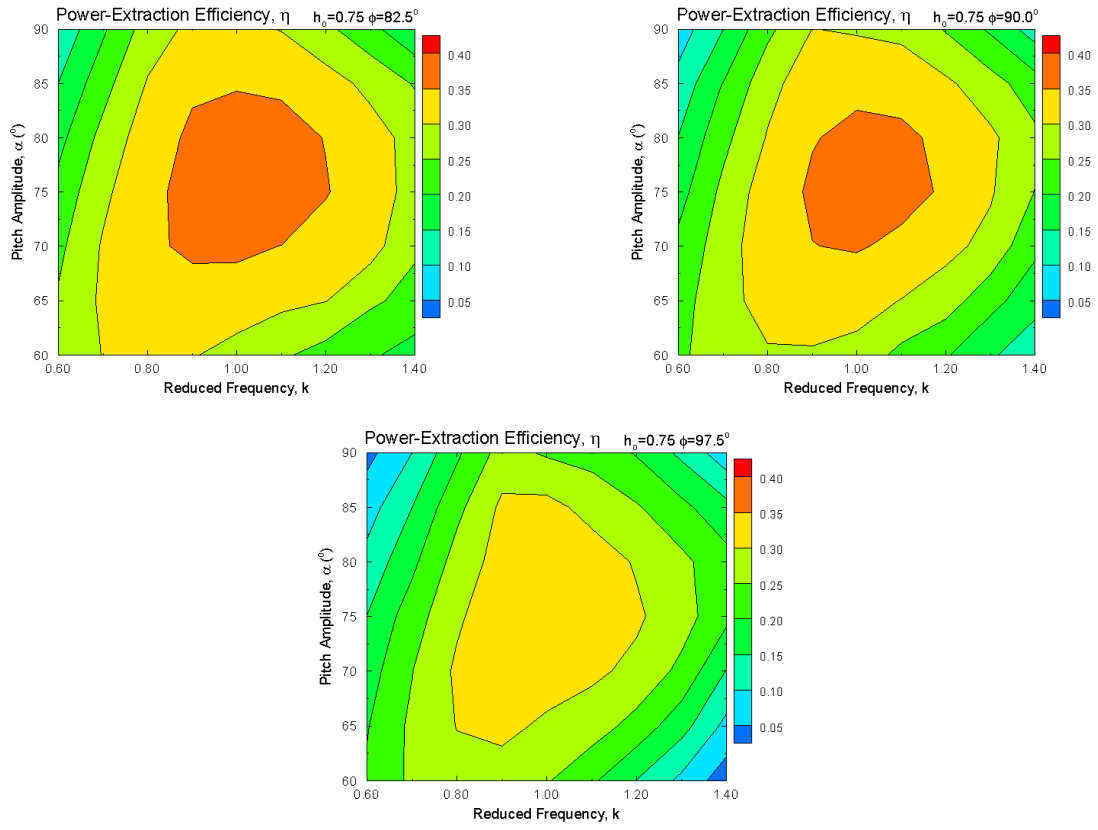
Şekil 13. $h_o=0.75$ için güç katsayısının sık aralıklı k - α_o parametrik uzayında haritası



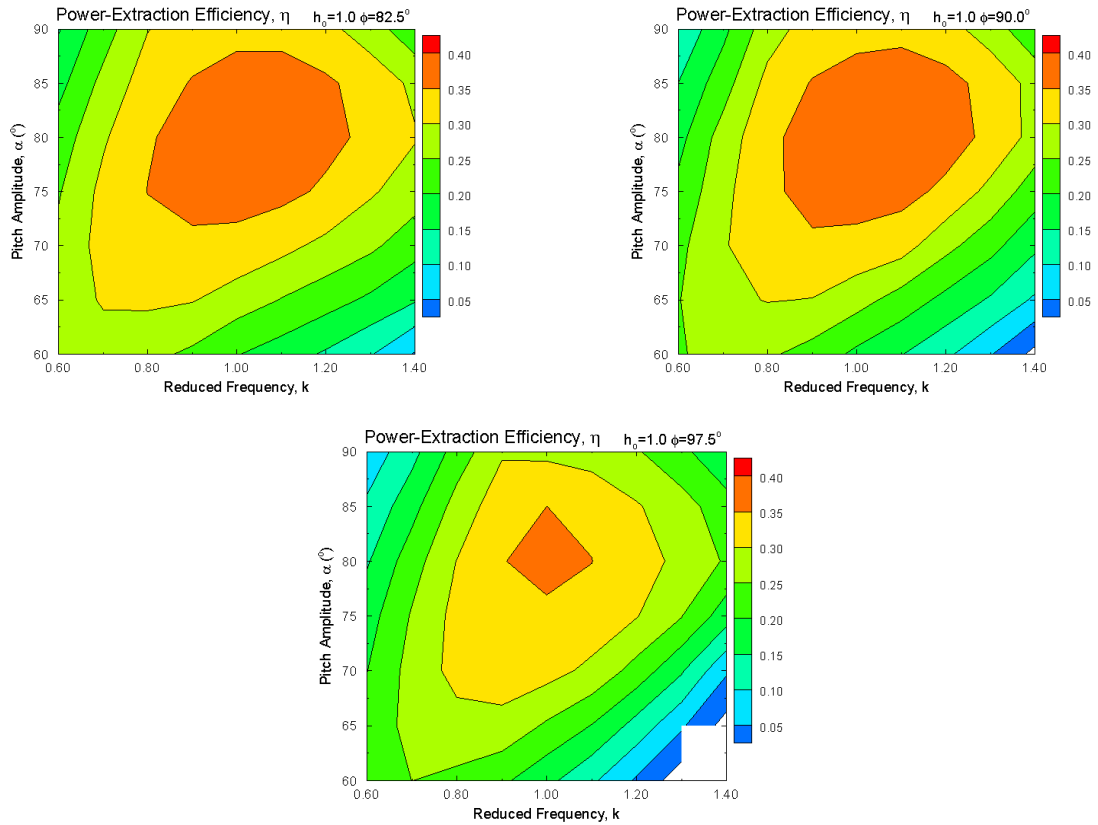
Şekil 14. $h_0=1.00$ için güç katsayısının sık aralıklı k - α_0 parametrik uzayında haritası



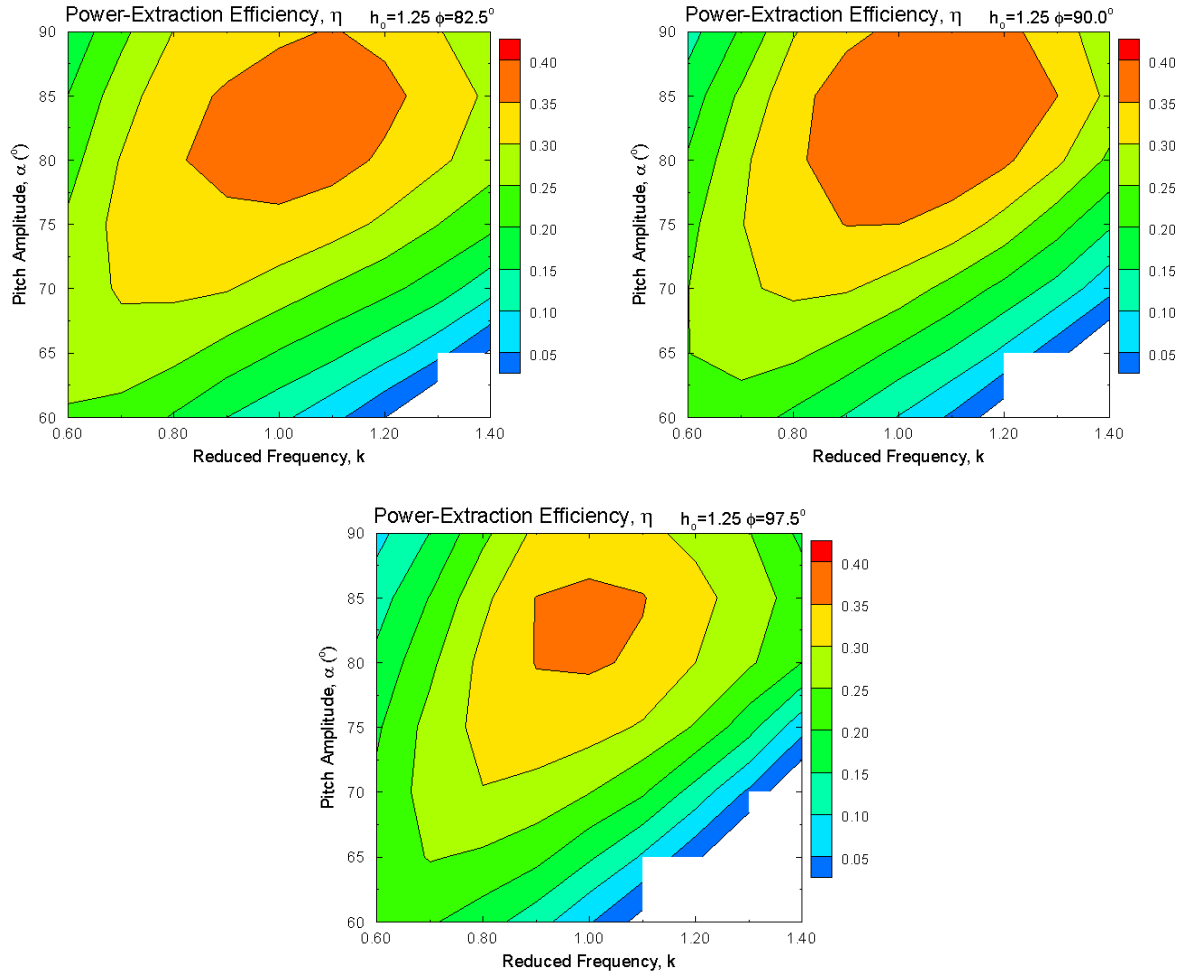
Şekil 15. $h_0=1.25$ için güç katsayısının sık aralıklı k - α_0 parametrik uzayında haritası



Şekil 16. $h_0=0.75$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı k - α_0 parametrik uzayında haritası



Şekil 17. $h_0=1.00$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı k - α_0 parametrik uzayında haritası



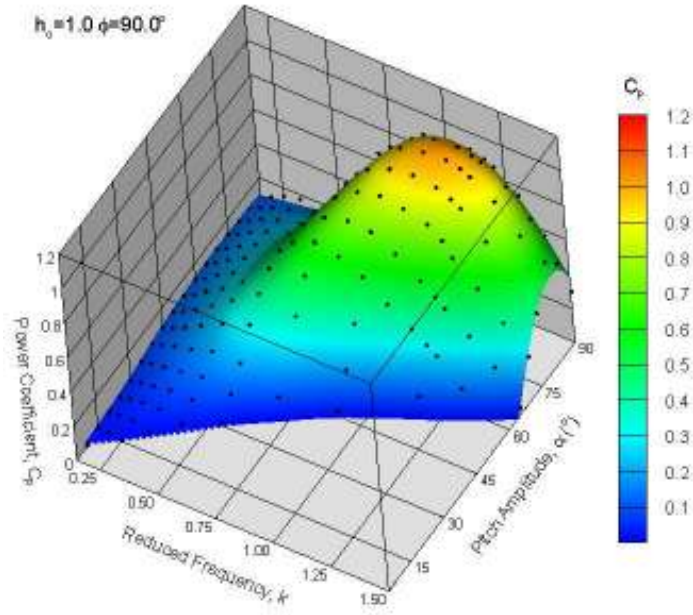
Şekil 18. $h_0=1.25$ için güç üretimi veriminin sık aralıklı k - α_0 parametrik uzayında haritası

Şekil 13-18'de verilen haritalarda maksimum bölgeler net olarak gözlenebilmektedir. İncelenen her dalma genliği ve faz farkı değeri için gerek maksimum güç katsayısının gerekse maksimum güç üretim veriminin $k=0.90$ -1.20 ve $\alpha_0=75^\circ$ -85 aralıklarında gerçekleştiği görülmüştür.

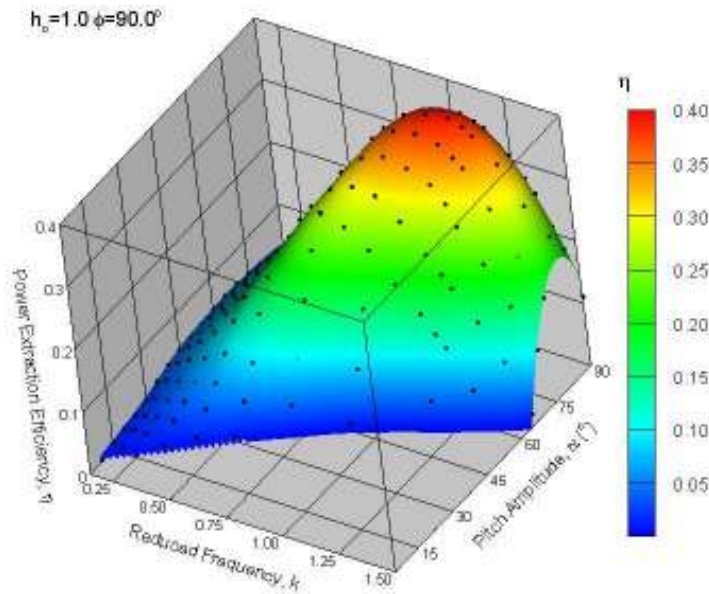
Haritaların cevap yüzeylerine dönüştürülmesi ile daha kesin değerlerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda ilave durumların da göz önünde bulundurulduğu güncellenmiş deney tasarımı (toplamda $3235+564=3799$) için dalma genliği, h_0 , ve faz farkı, ϕ , değerleri sabit tutularak k - α_0 parametrik uzayında güç katsayısı, C_P , ve güç üretim verimi, η , değerlerine karşılık 2. dereceden polinom cevap yüzeyleri oluşturulmuştur.

$h_0=1.00$ ve $\phi=90^\circ$ için oluşturulan güç katsayısı ve güç üretim verimi cevap yüzeyleri Şekil 19'da örnek olarak verilmektedir. Şekil 20 ise $h_0=1.25$ ve $\phi=90^\circ$ için cevap yüzeylerini

göstermektedir. $h_o=0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ ve 1.50 için oluşturulan güç katsayısı cevap yüzeyleri kısıtlı sayfa boyutuna uygun büyüklükte toplu olarak Şekil 21-25'de verilmektedir. Güç üretimi cevap yüzeyleri ise aynı sırayla Şekil 26-30'da yine sayfaya uygun büyüklükte gösterilmiştir. Her bir şekilde farklı ϕ değerlerine ($60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ$ ve 120°) karşılık cevap yüzeyleri bulunmaktadır. Navier-Stokes çözücü ile toplam 3799 farklı salınım hareketi için hesaplanan C_P ve η değerleri de şekil üzerinde • simgesi ile gösterilmiştir.

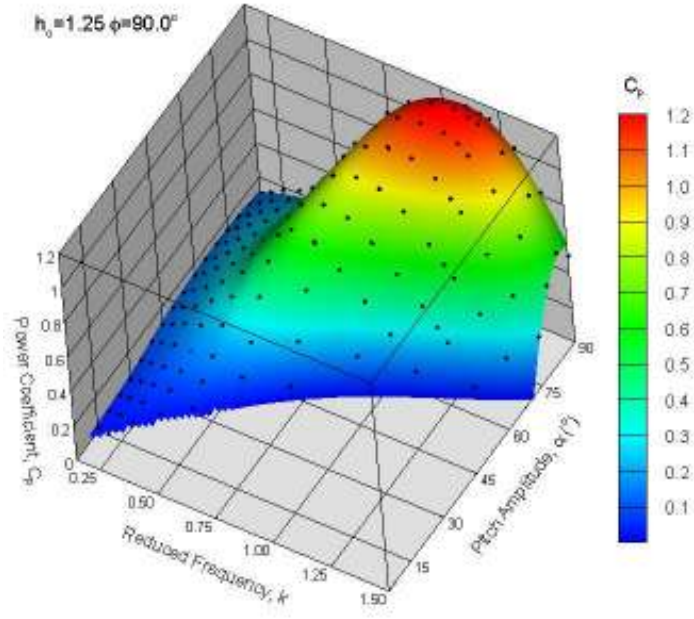


(a) Güç katsayısı, C_P , cevap yüzeyi

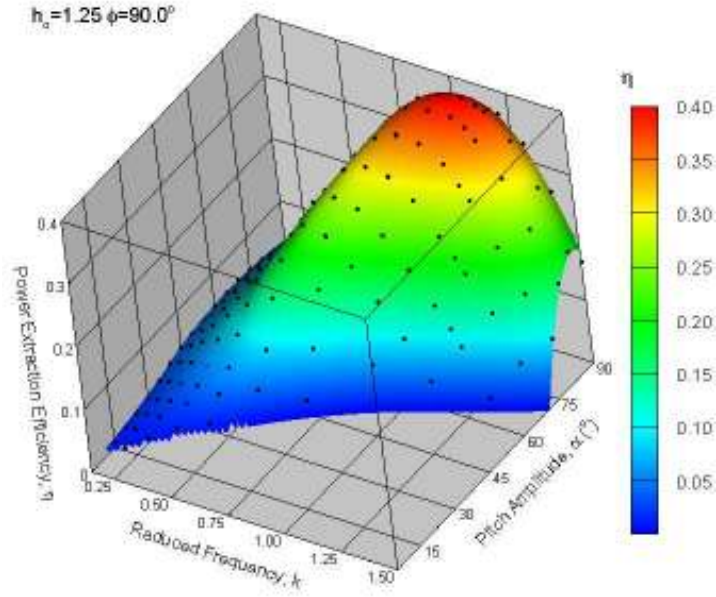


(b) Güç üretimi verimi, η , cevap yüzeyi

Şekil 19. $h_o=1.00, \phi=90.0^\circ$ cevap yüzeyleri (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)

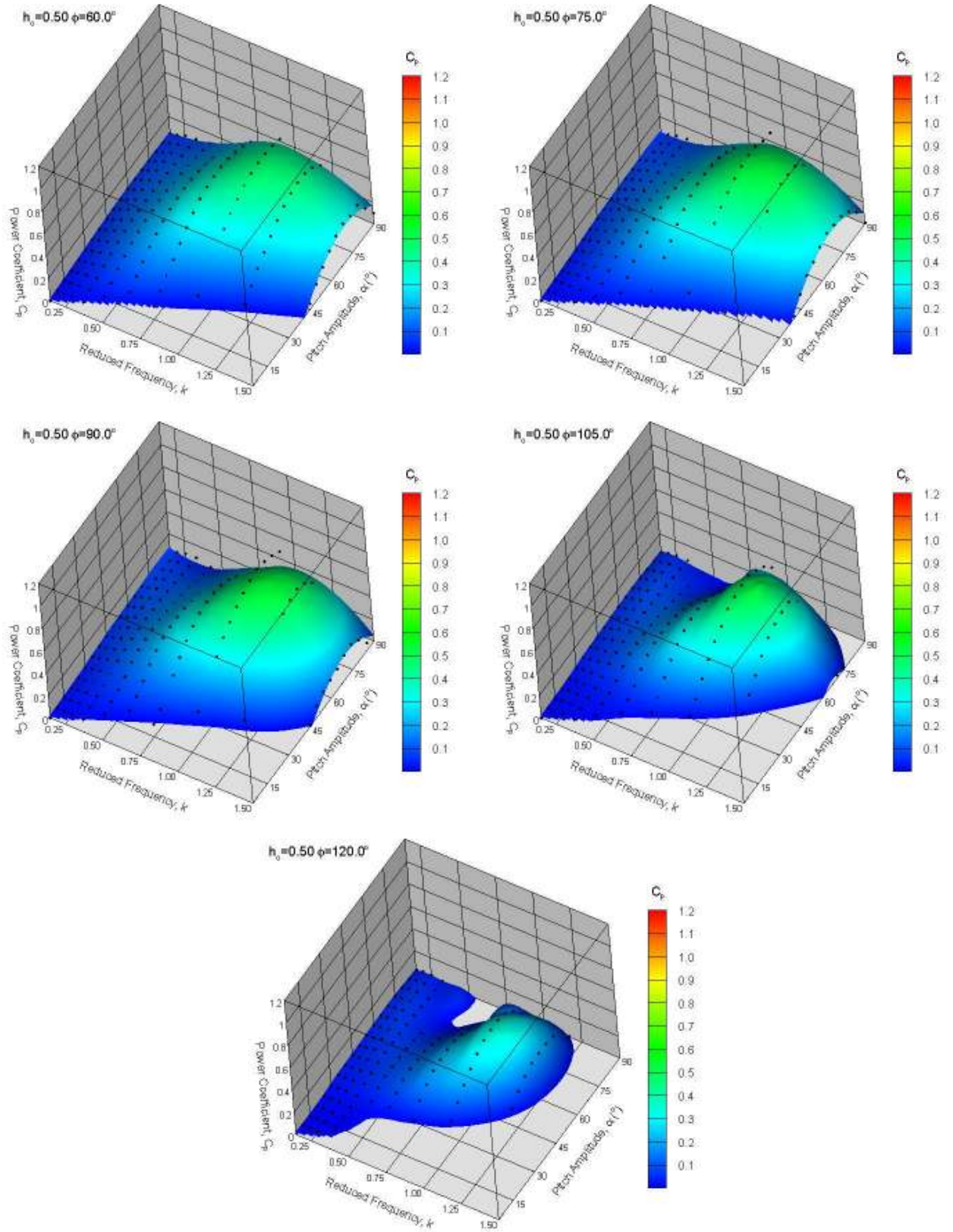


(a) Güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi

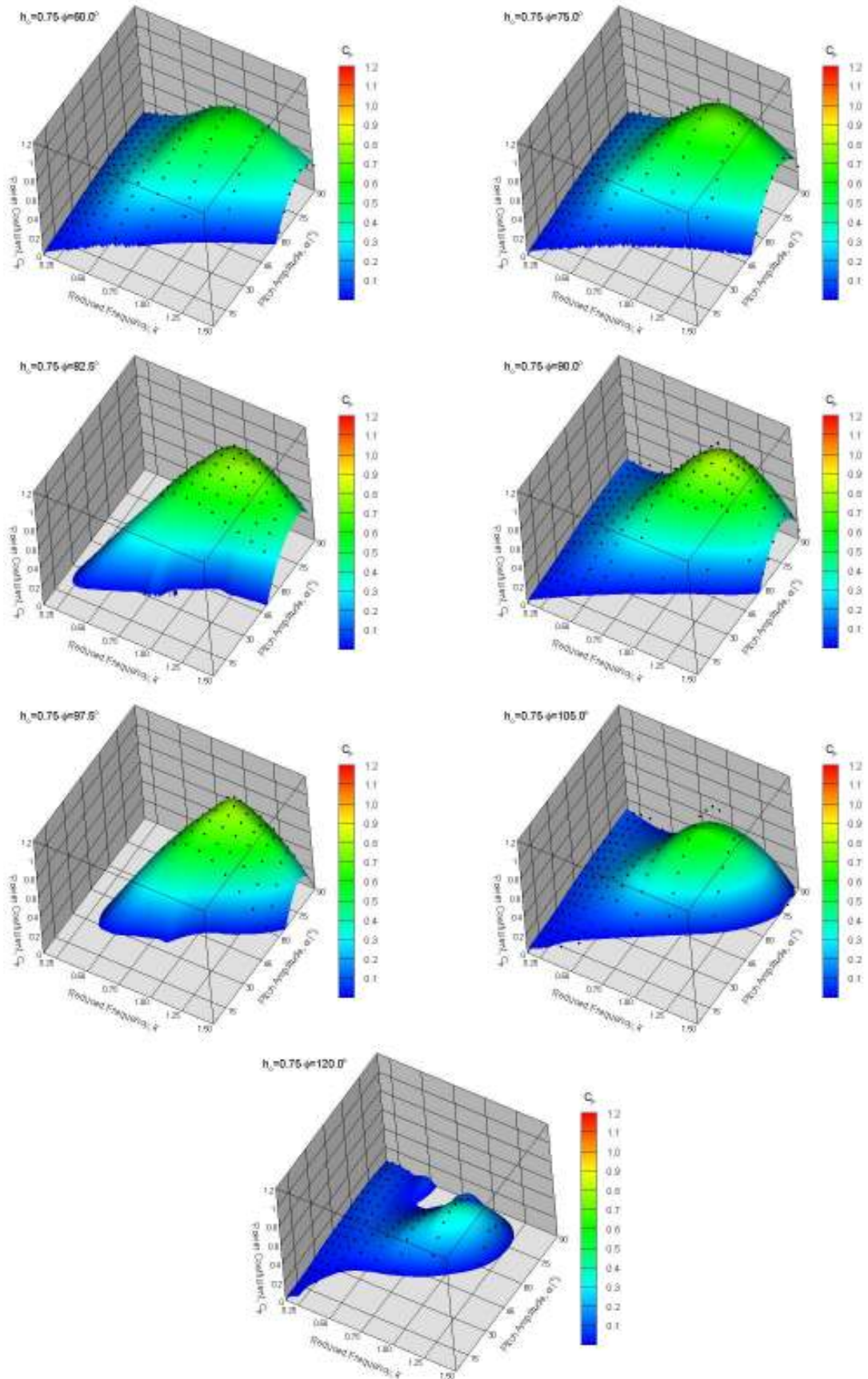


(b) Güç üretimi verimi, η , cevap yüzeyi

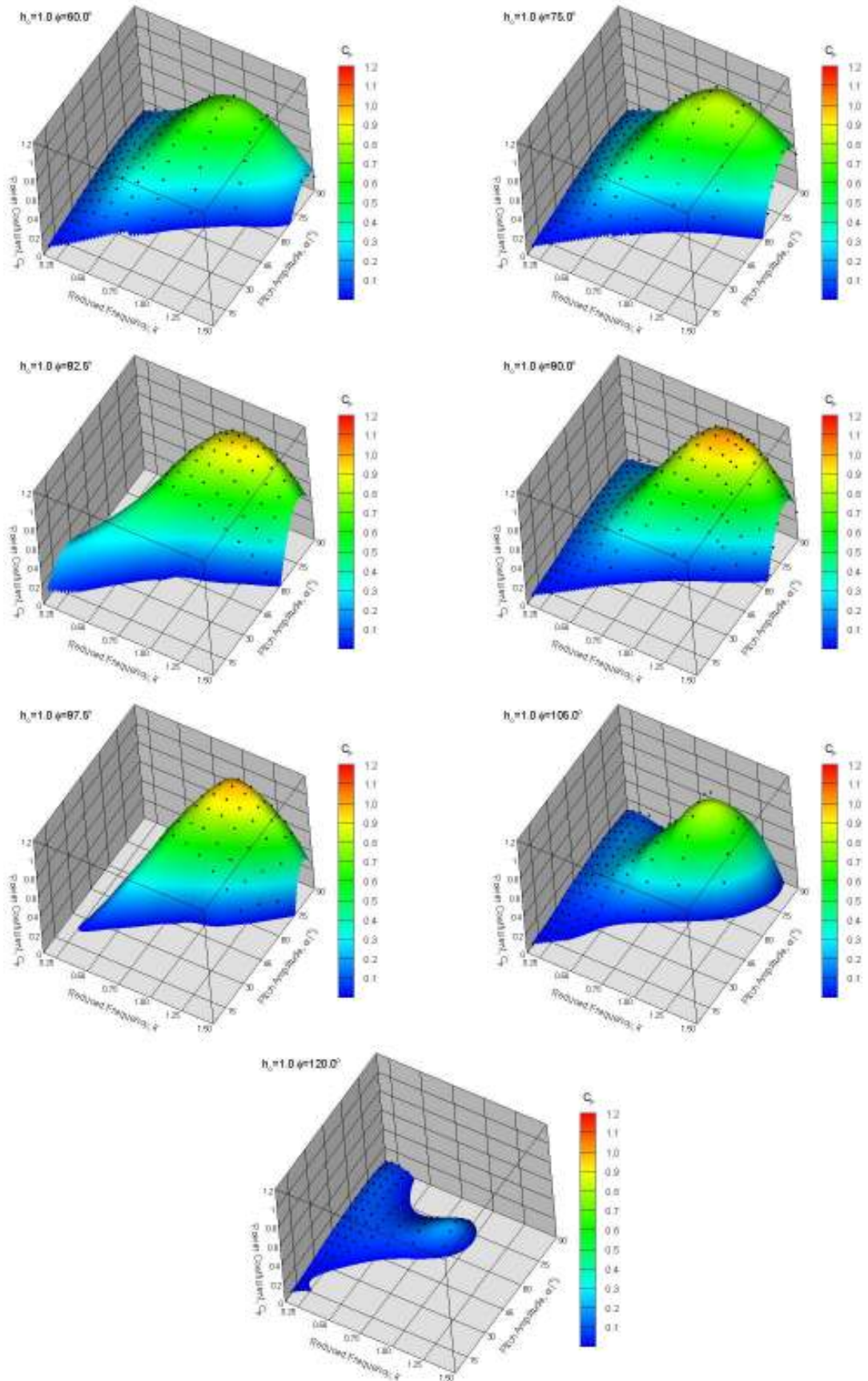
Şekil 20. $h_o=1.25$, $\phi=90.0^\circ$ cevap yüzeyleri (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



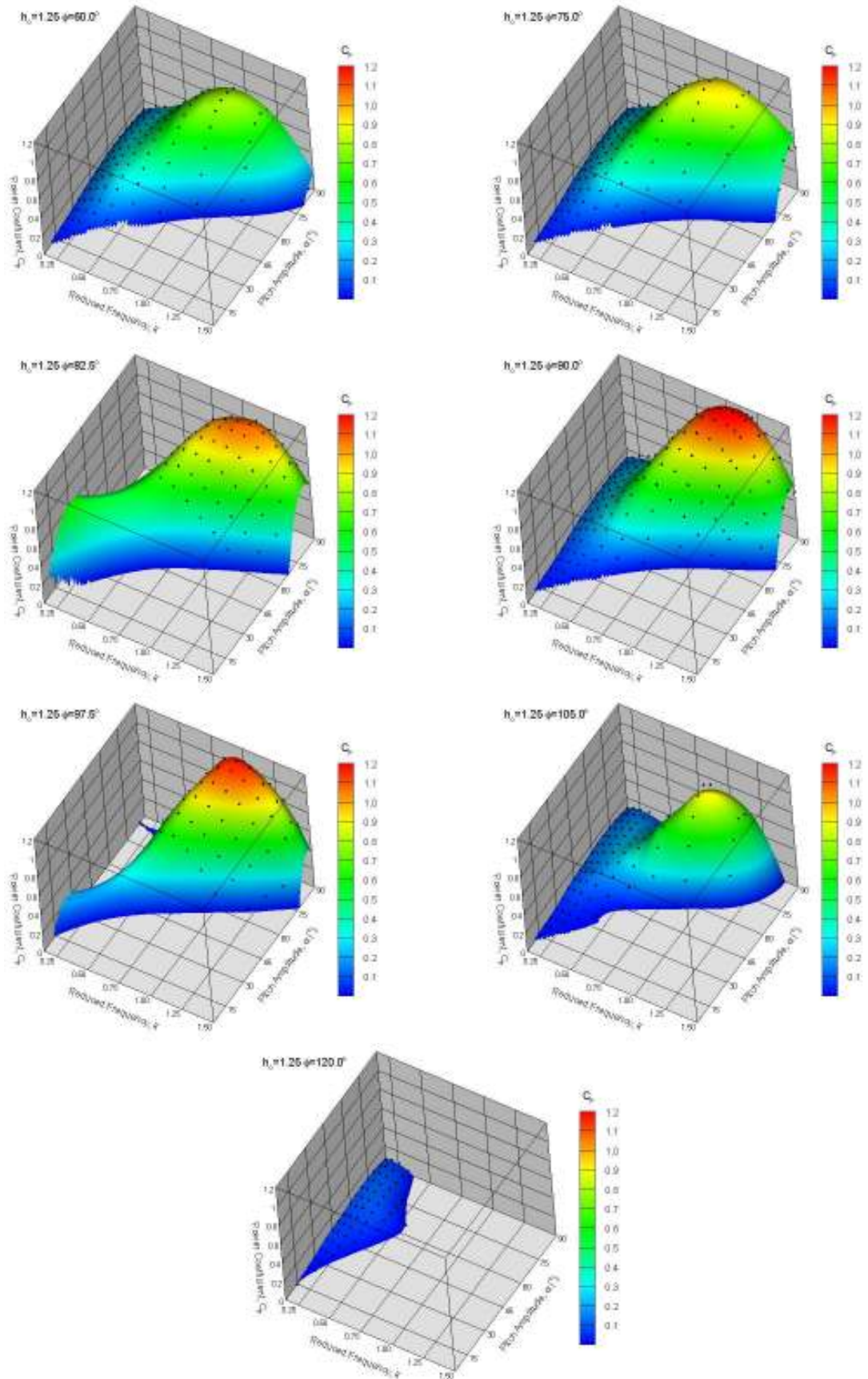
Şekil 21. $h_0=0.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



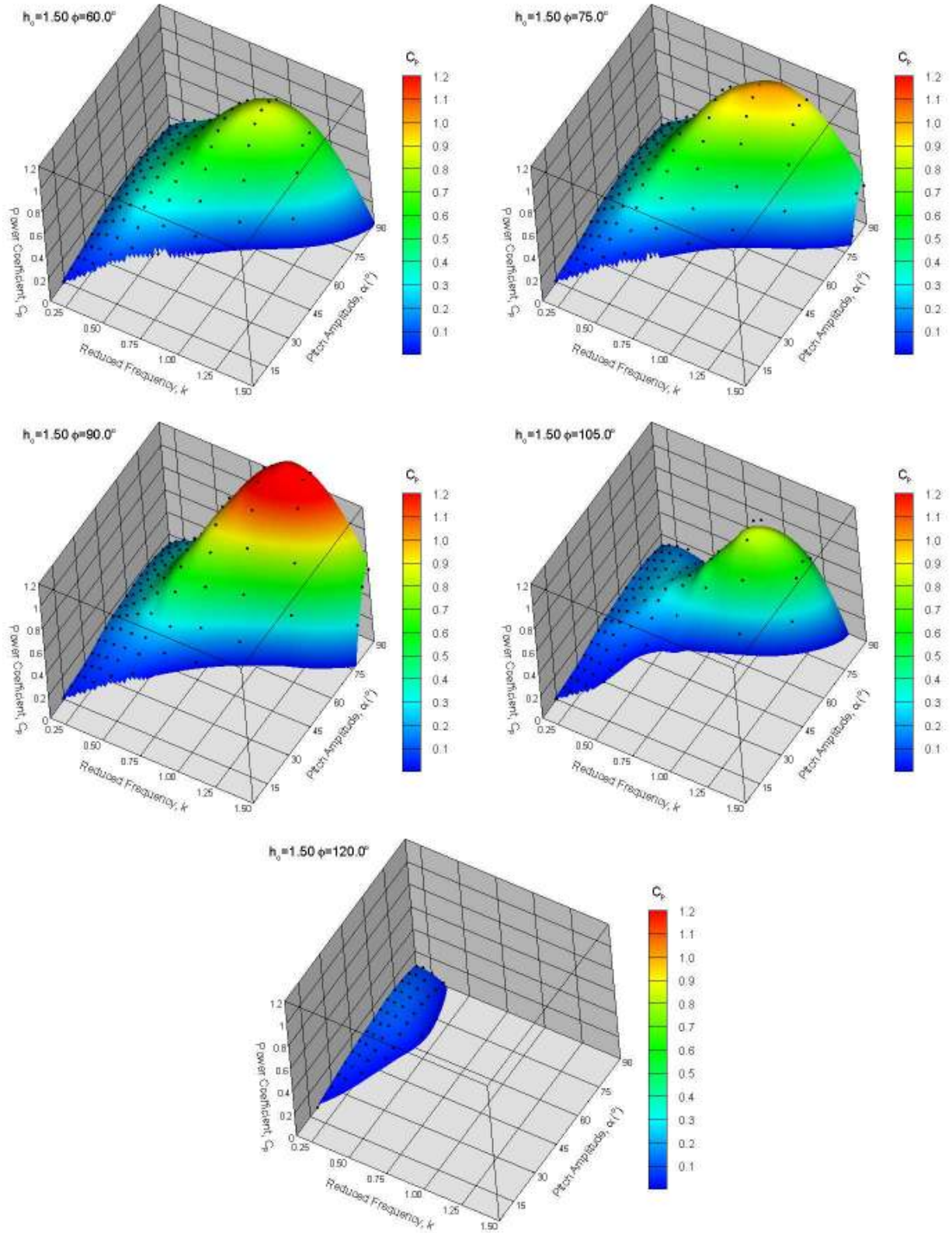
Şekil 22. $h_0=0.75$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



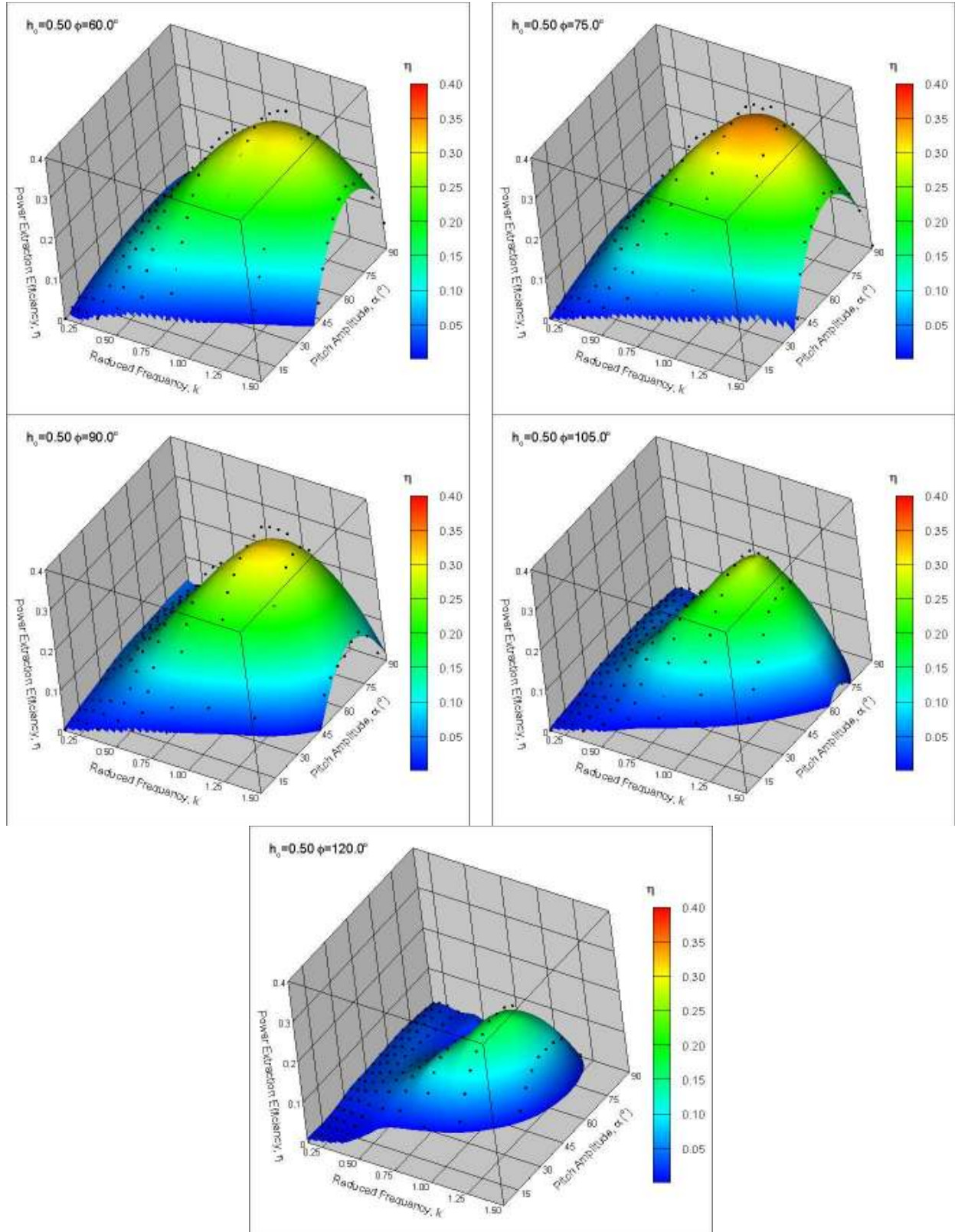
Şekil 23. $h_0=1.00$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



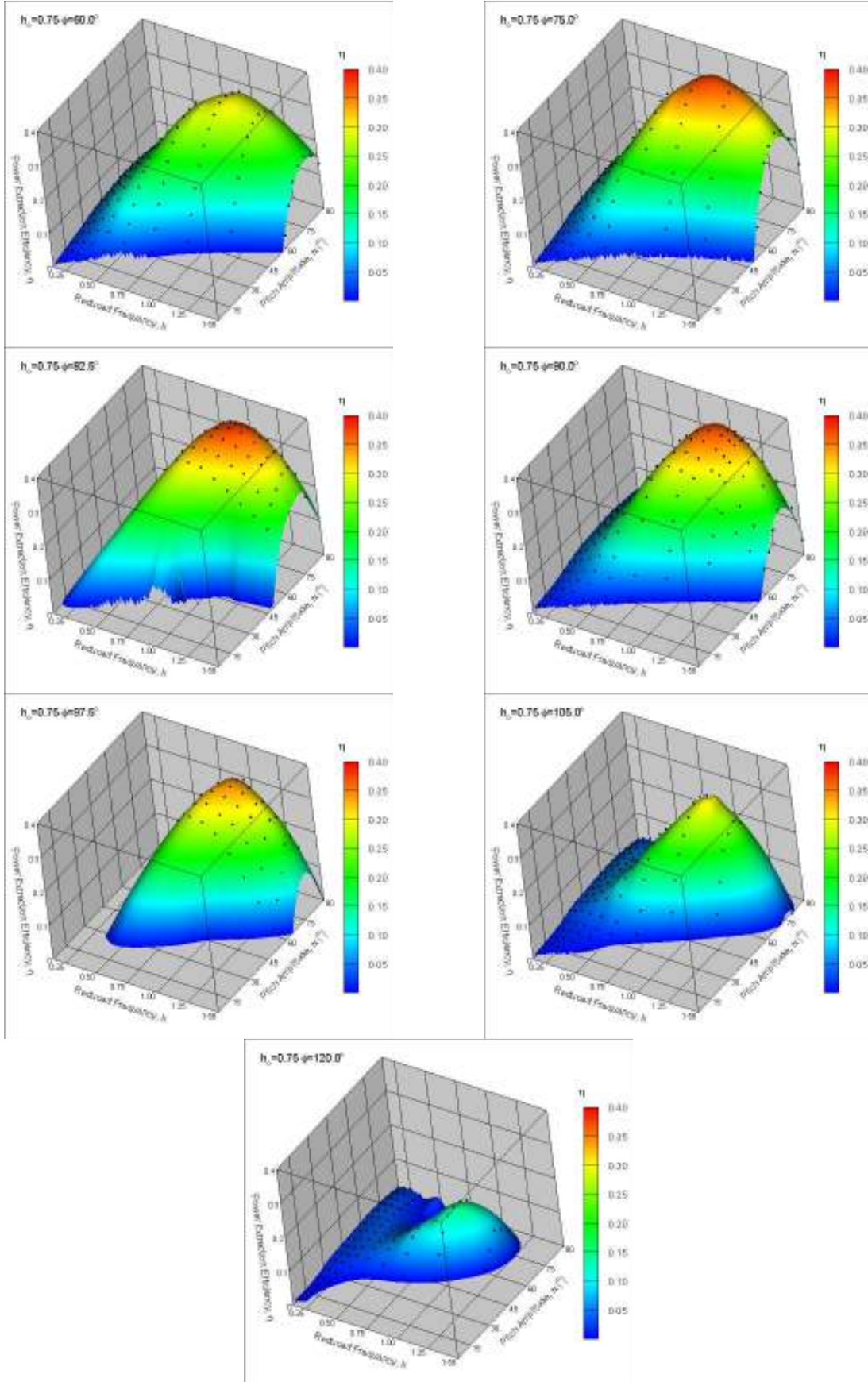
Şekil 24. $h_0=1.25$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



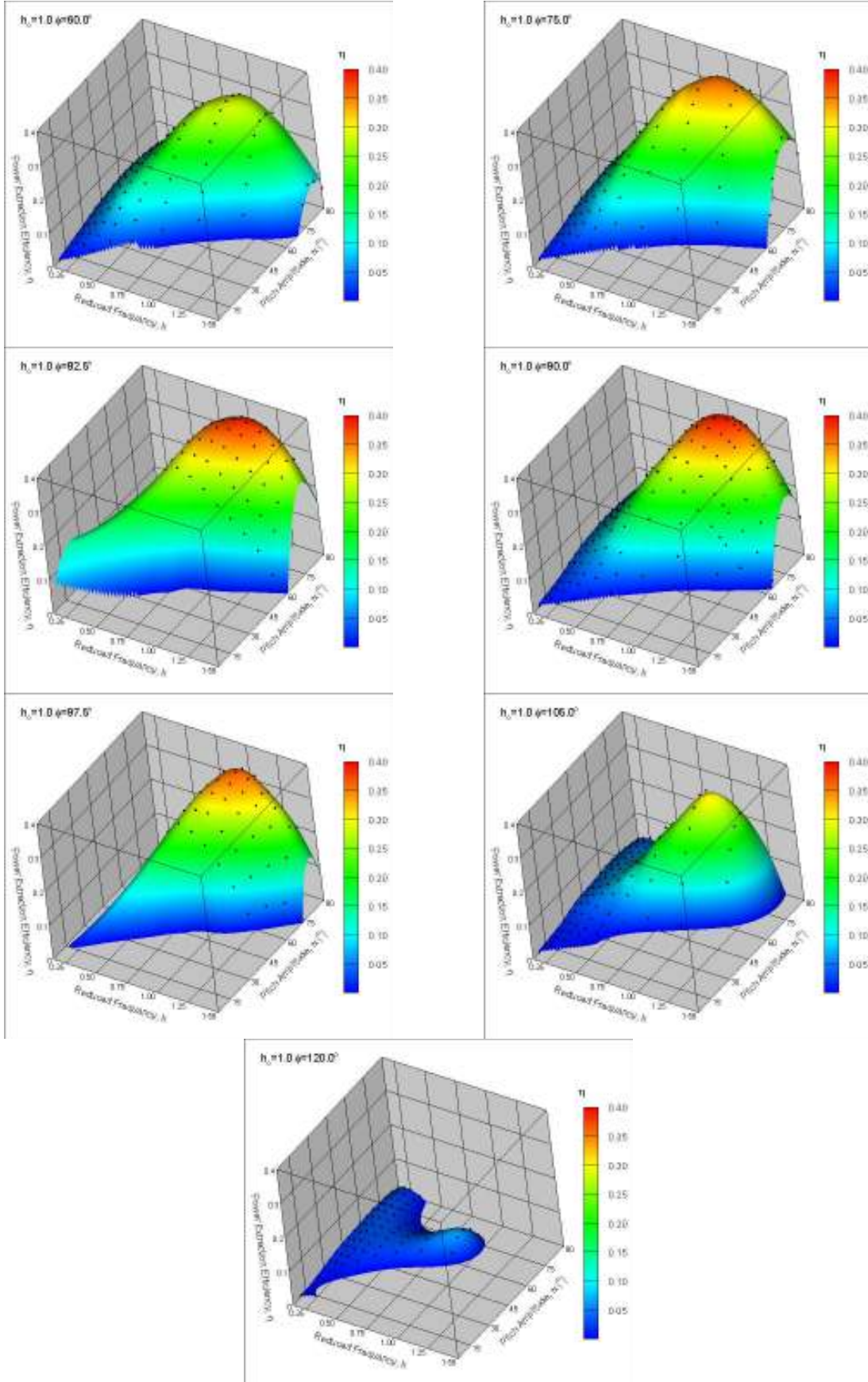
Şekil 25. $h_0=1.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç katsayısı, C_p , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



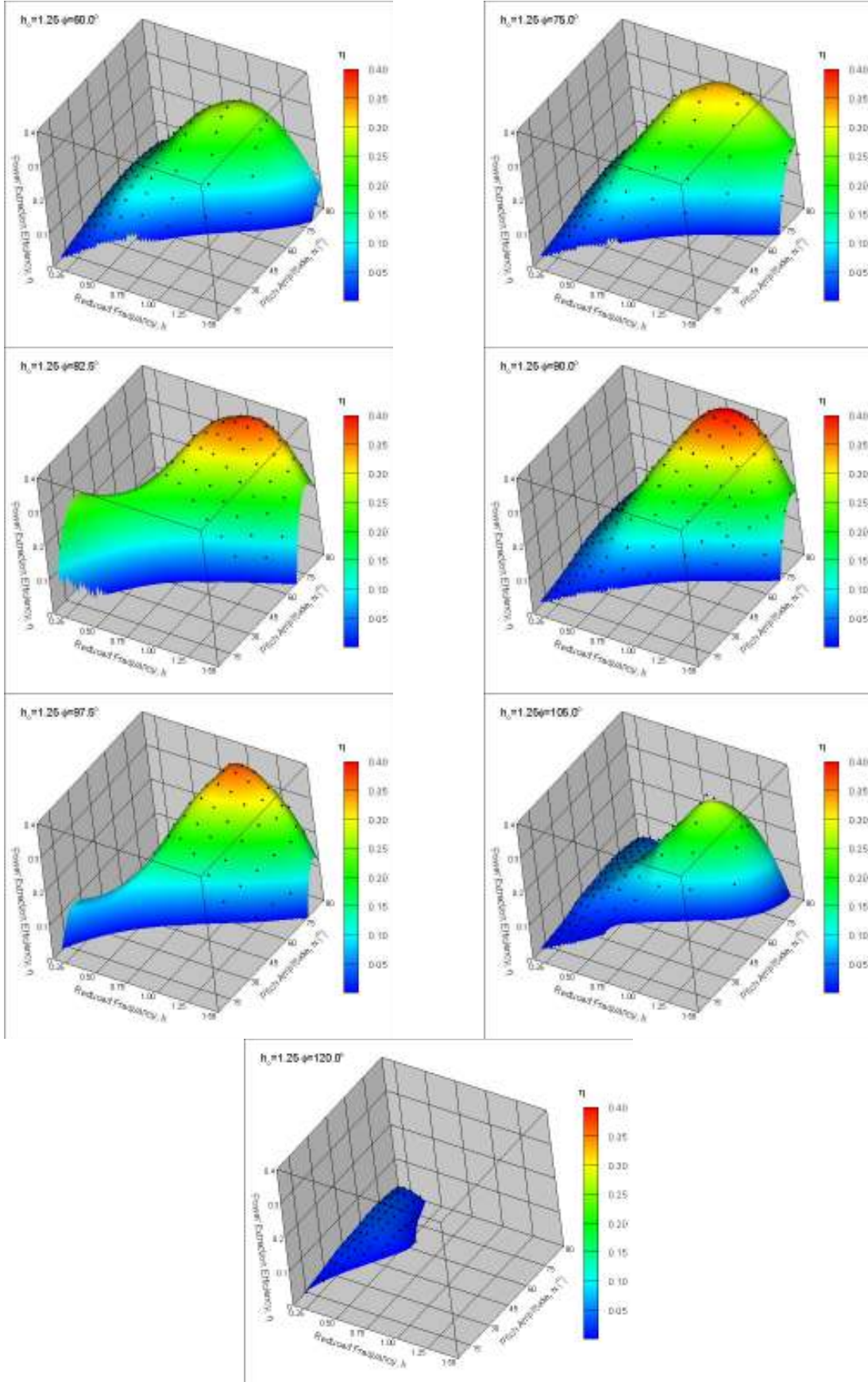
Şekil 26. $h_0=0.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



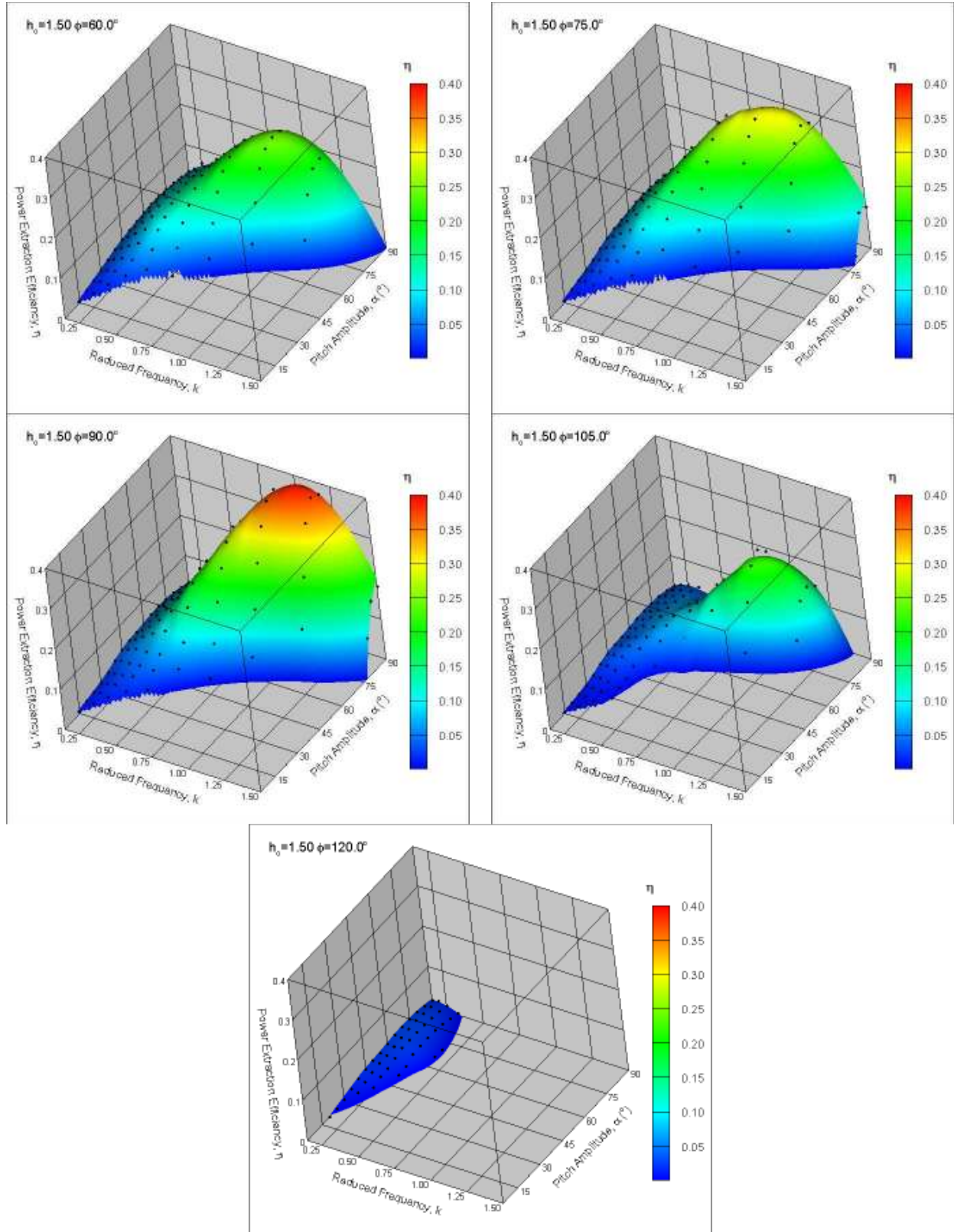
Şekil 27. $h_0=0.75$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



Şekil 28. $h_0=1.00$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



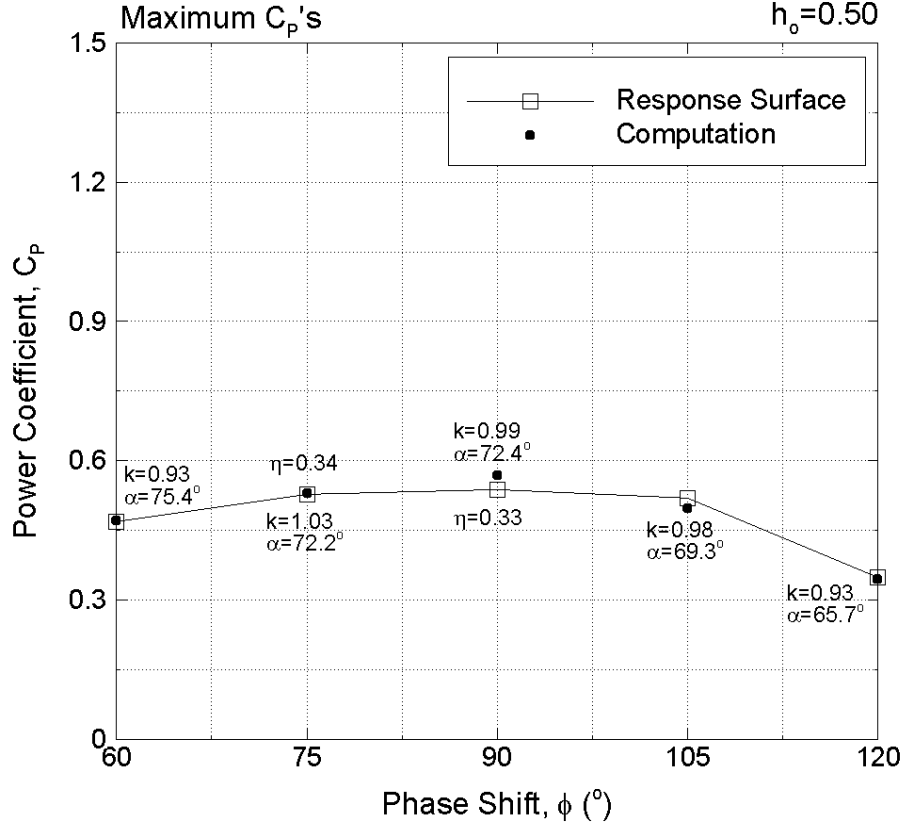
Şekil 29. $h_0=1.25$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ, 90.0^\circ, 97.5^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



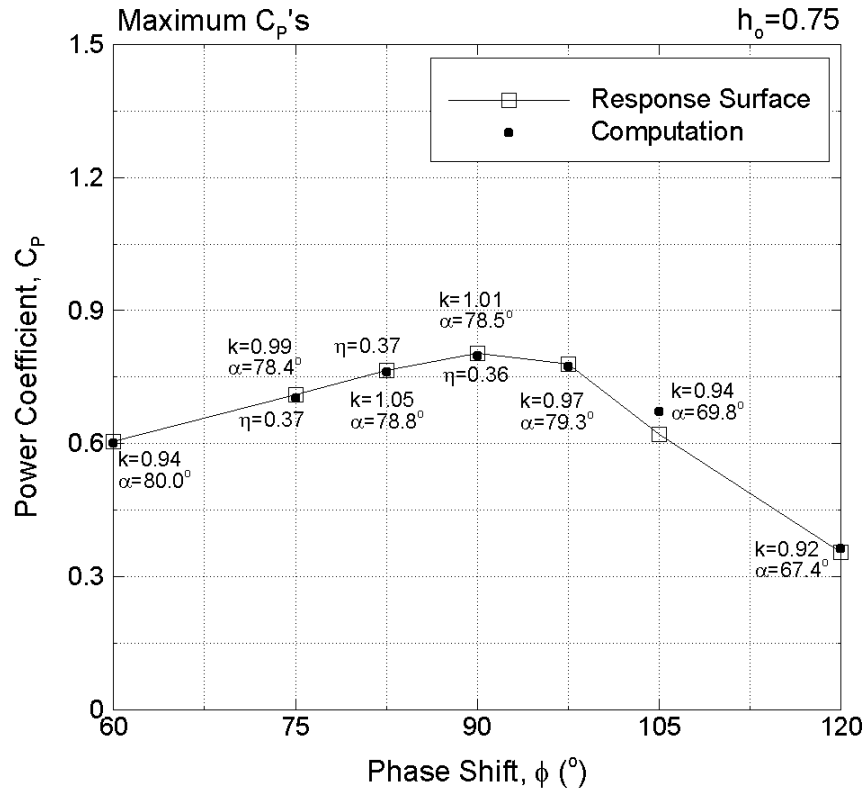
Şekil 30. $h_0=1.50$ ve $\phi = 60^\circ, 75^\circ, 90.0^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ değerleri için güç üretim verimi, η , cevap yüzeyi (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)

Şekillerden görüldüğü üzere, Navier-Stokes ile hesaplanan değerlere göre oluşturulan cevap yüzeyleri, birçok durum için Navier-Stokes sonuçlarına çok yaklaşmıştır. Bazı durumlarda ise cevap yüzeyinin zirve noktalarının, Navier-Stokes hesaplamasından gelen maksimum değerlerin biraz altında kaldığı gözlenmiştir. Ancak, cevap yüzeyi zirvesinin yer aldığı lokasyon ile ayrık (*Ing:discrete*) Navier-Stokes çözümünde gözlenen optimum $k-\alpha_o$ koordinatlarının yakın olması yani cevap yüzeyinin genel trendi başarıyla yakalamış olması yeterli olarak değerlendirilmiştir.

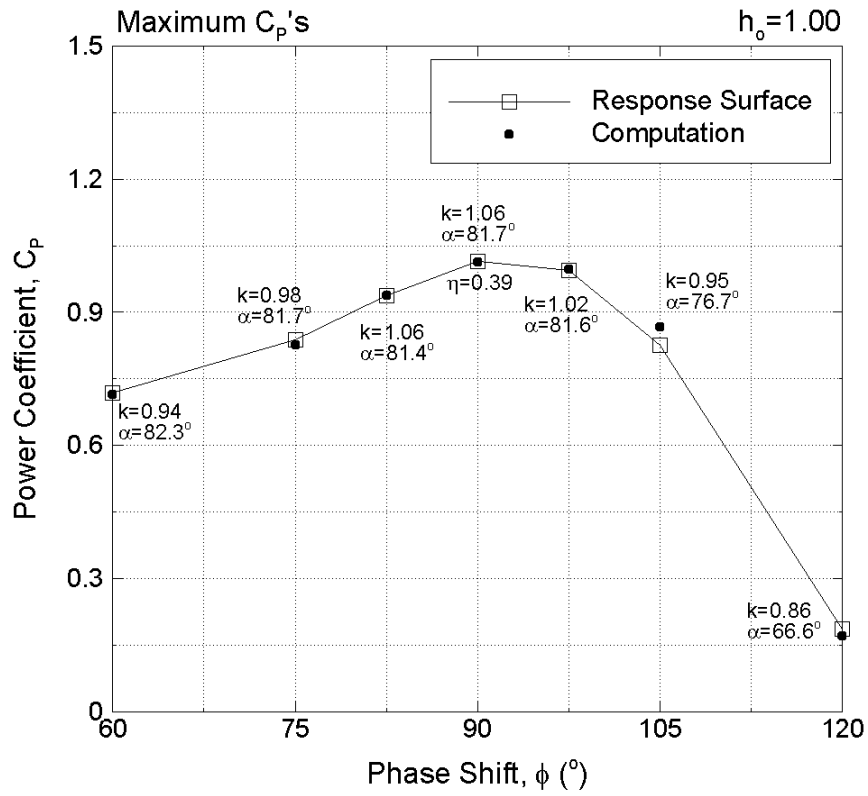
Sabit tutulan her bir dalma genliği, h_o , ve faz farkı, ϕ , ikilisi için bağımsız (*Ing: independent variable*) $k-\alpha_o$ değerlerine karşılık 2. dereceden polinom olarak oluşturulan C_P ve η cevap yüzeylerinin maksimum değerleri analitik olarak kolaylıkla hesaplanmıştır. Hesaplanan maksimumlar ve bunları sağlayan optimum $k-\alpha_o$ kombinasyonları grafik olarak sunulmuştur (Şekil 31-40). Şekiller, sabit bir dalma genliğinde maksimum C_P ve η değerlerinin faz farkına göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Cevap yüzeylerinin yaklaşım başarısını ölçmek amacıyla optimum olarak belirlenen ilgili salınma hareketi parametreleri için sonradan yapılan Navier-Stokes hesaplamasının sonuçları da grafiklere ayrıca eklenmiştir.



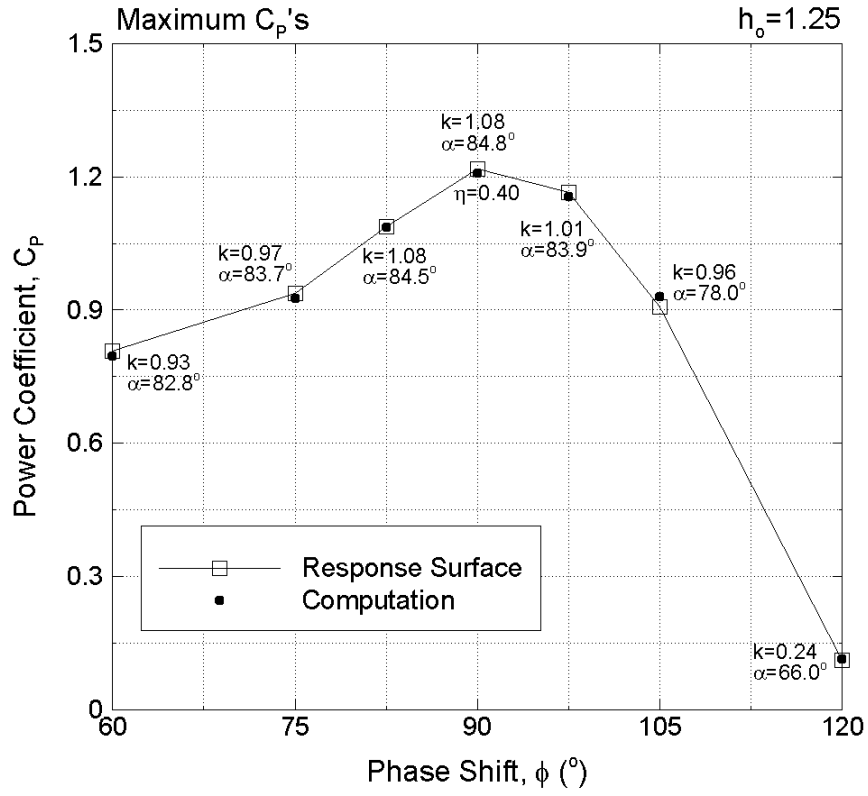
Şekil 31. $h_o=0.50$ için maksimum güç katsayıları, C_P (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



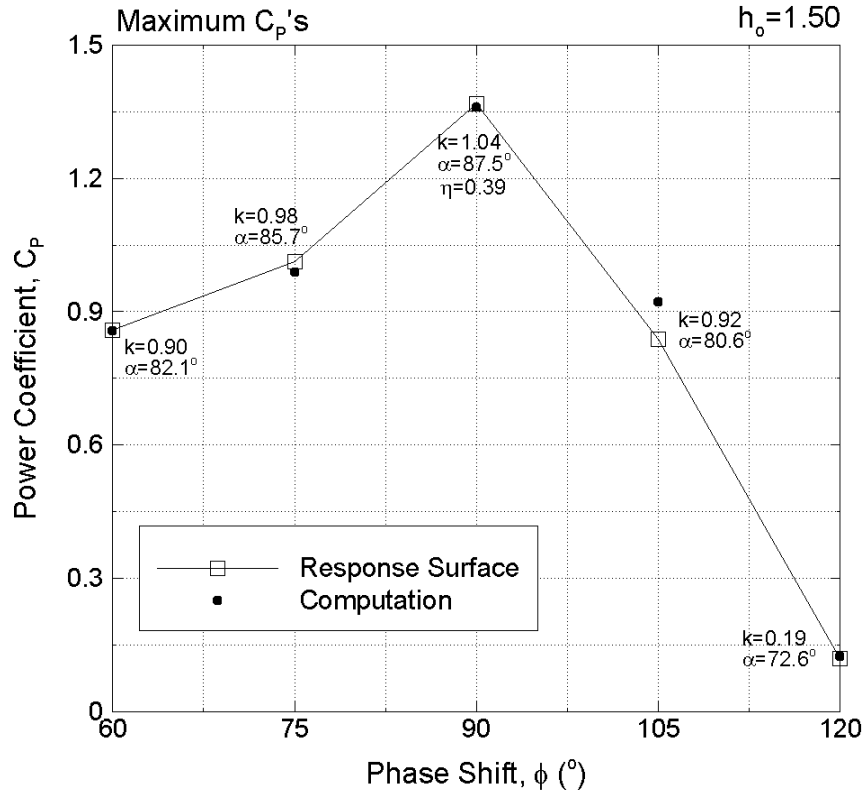
Şekil 32. $h_o=0.75$ için maksimum güç katsayıları, C_p (Navier-Stokes sonuçları, $\bullet$ ile gösterilmektedir)



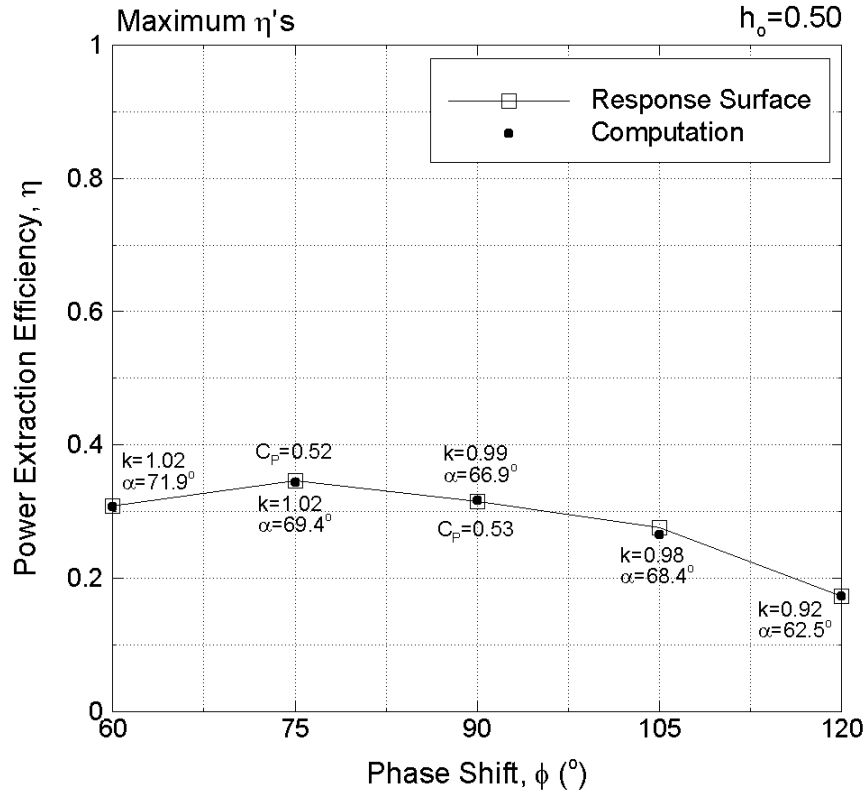
Şekil 33. $h_o=1.00$ için maksimum güç katsayıları, C_p (Navier-Stokes sonuçları, $\bullet$ ile gösterilmektedir)



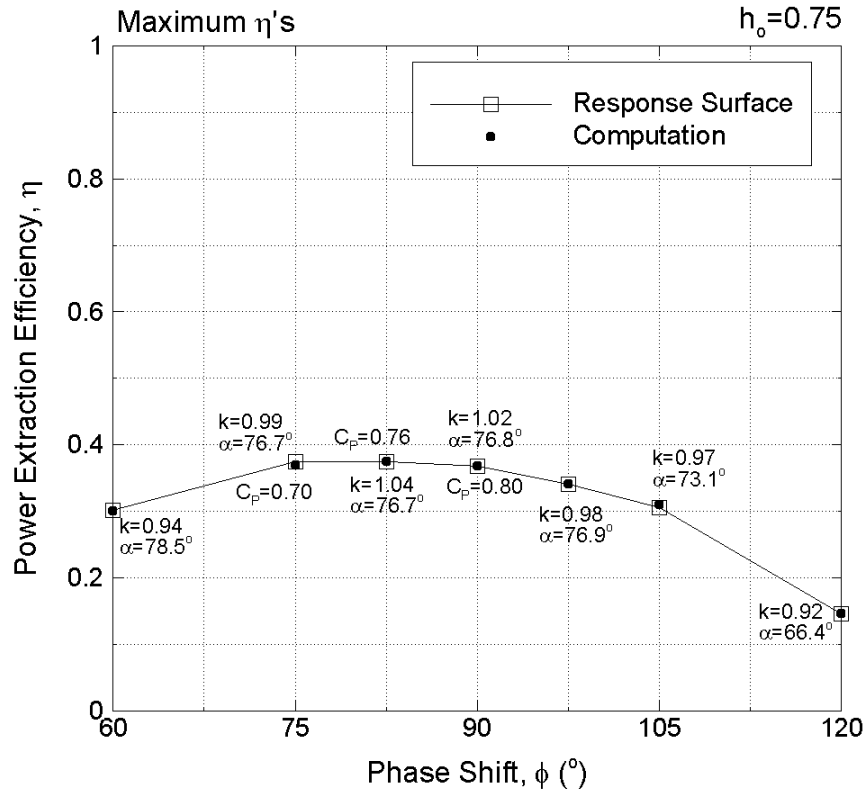
Şekil 34. $h_o=1.25$ için maksimum güç katsayıları, C_p (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



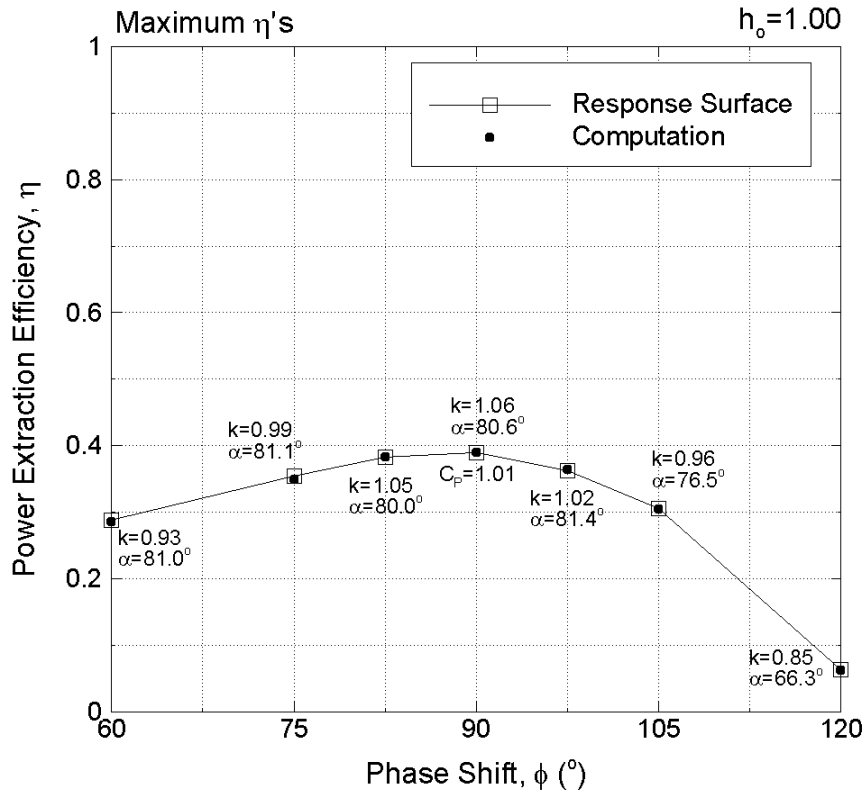
Şekil 35. $h_o=1.50$ için maksimum güç katsayıları, C_p (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



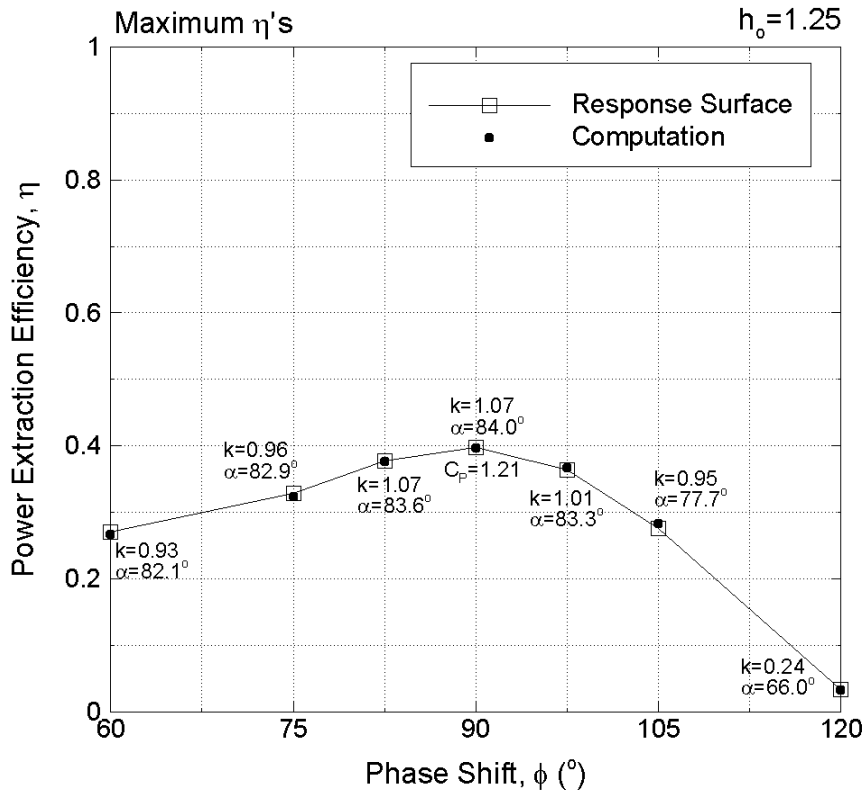
Şekil 36. $h_o=0.50$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, $\bullet$ ile gösterilmektedir)



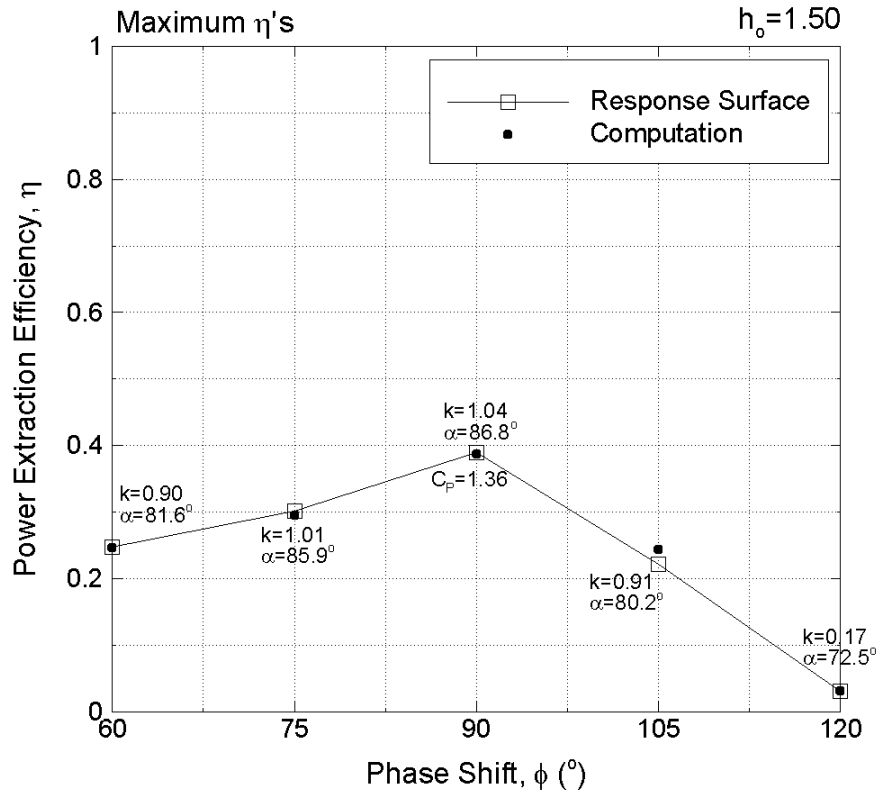
Şekil 37. $h_o=0.75$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, $\bullet$ ile gösterilmektedir)



Şekil 38. $h_o=1.00$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



Şekil 39. $h_o=1.25$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)



Şekil 40. $h_o=1.50$ için maksimum güç üretimi verimleri, η (Navier-Stokes sonuçları, • ile gösterilmektedir)

Maksimum güç katsayıları, $h_o = 0.50, 0.75, 1.00, 1.25$ ve 1.50 değerleri için sırasıyla Şekil 31, 32, 33, 34 ve 35'de gösterilmektedir. Şekil 36, 37, 38, 39 ve 40 ise maksimum güç üretimi verimlerini aynı sıra ile vermektedir. Sonuçların oldukça ilginç ve faydalı olduğu değerlendirilmiştir.

Faz farkına göre ayrı ayrı belirlenen maksimum güç katsayılarının veya maksimum güç üretimi verimlerinin arasında en yüksekini incelenen her dalma genliği, h_o , değeri için her defasında indirgenmiş frekansın, $k \sim 1$ durumunda sağlandığı gözlenmiştir. Bir salınma periyodu boyunca iki hücum kenarı girdabının oluştuğu ve yaklaşık serbest akış hızı ile iz bölgesinde yayıldığı göz önünde bulundurulduğunda, eniyi durum için girdapların yayılım dalga boyu (*İng: shedding wavelength*) yaklaşık π değerine eşit olmaktadır. Bir başka şekilde ifade edilecek olursa, maksimum güç katsayısını veya verimini sağlayan eniyi salınma hareketi için girdap yayılımı dalga sayısının (*İng: wavenumber*) değeri yaklaşık olarak yarı vater uzunluğunun tersine eşit olmalıdır. Akış penceresinin boyundan (Şekil 2'de görülen e parametresi) bağımsız olarak her dalma genliğinde bu durumun gözlenmiş olması maksimum C_p veya maksimum η elde etmek için genel bir kaide olarak değerlendirilebilir.

Her dalma genliği değeri için dalma ve yunuslama hareketlerinin arasındaki faz farkının $\phi=90^\circ$ olduğu durumlar, diğer faz farkı durumlarına kıyasla, maksimum C_P 'ler arasında en yüksekini 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.

Maksimum η 'lar arasında en yüksekinin, düşük dalma genlikleri için $\phi < 90^\circ$ ($75^\circ-90^\circ$ arası) durumunda, yüksek dalma genlikleri içinse $\phi=90^\circ$ durumunda gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunun sebebi, daha çok, verimin tanımından kaynaklanmaktadır (Denklem 7). Bu tanıma göre, yaklaşık aynı güç katsayısını sağlayan salınma hareketleri arasından en verimli, kanat kesitinin dalma eksenini boyunca en az alan kapladığı yani en küçük akış penceresine sahip olduğu durumdur. Düşük dalma genlikleri için dalma ve yunuslama hareketi arasındaki faz farkı $75^\circ \leq \phi < 90^\circ$ 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.

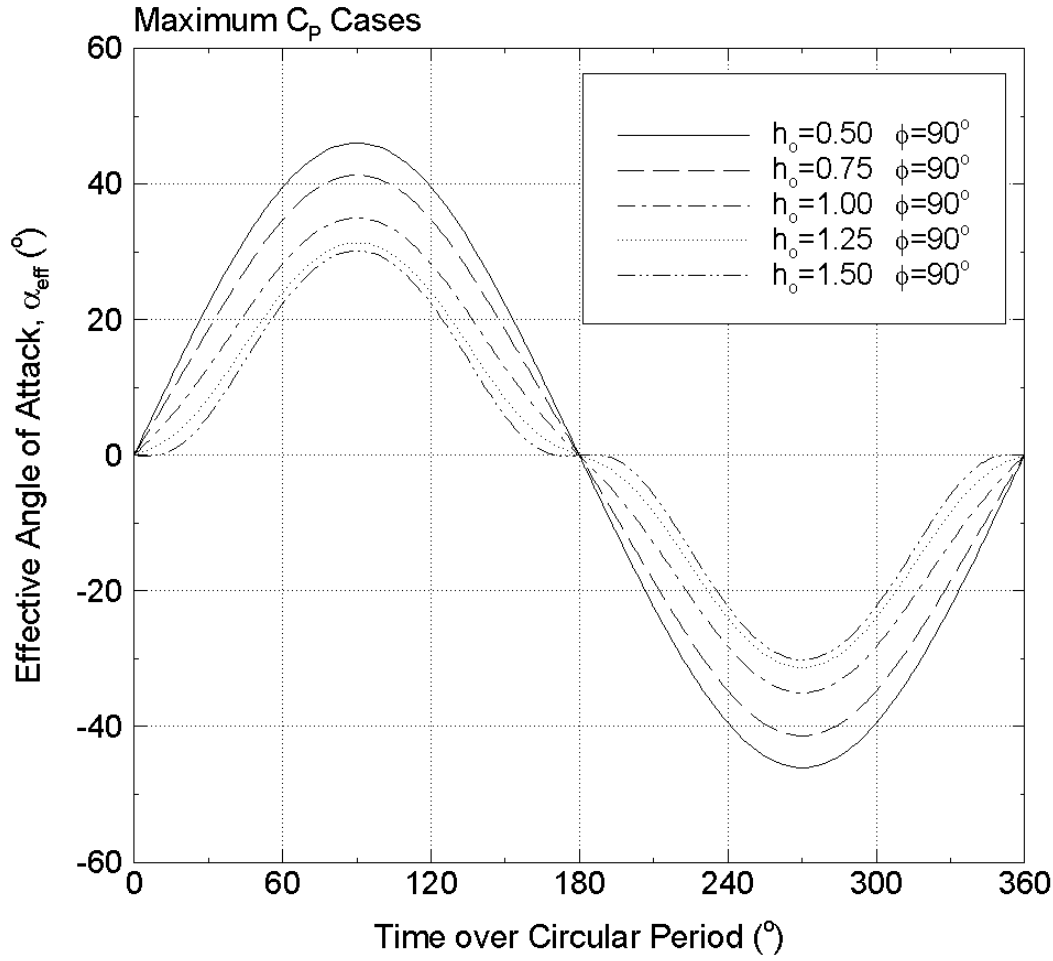
Gözlenen bir diğer sonuç da, dalma genliği arttıkça maksimum güç katsayısını ya da maksimum güç üretim verimini sağlayan yunuslama genliğinin de artmış olmasıdır.

Şekil 31-40'de verilen faz farkına göre maksimum C_P ve η değerleri arasında en yüksekleri, sayısal olarak da ayrıca Tablo-6'da verilmiştir. Yukarıda da bahsedildiği 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 $h_o=1.00$ ve $h_o=1.50$ durumları için hesaplanan maksimum güç üretim verimleri de bu değere çok yakındır ($\eta=\%39$). $h_o=0.75$ durumunda ise $\eta=\%37$ olarak hesaplanmıştır. Betz'in [6] viskozitesiz ortamda eyleyici teker (*Ing: actuator disk*) teorisi kullanarak hesapladığı limit değer $\eta=\%59$ olması göz önünde bulundurulduğunda $\eta=\%40$ gibi bir verimin sağlanabileceğinin sayısal olarak gösterilmesi, salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretilmesi çalışmalarını motive etmektedir. Aslında, pratikte $\eta>\%30$ durumunun sağlanmasının dahi salınır kanatları türbinlere karşı güçlü bir alternatif yaptığı değerlendirilebilir [Kinsey 2008].

Tablo 6. (Faz farkına göre en yüksek) maksimum güç katsayısı, C_p , ve güç üretim verimi, η , değerleri

		C_p	η (%)
λ_p	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 $\left(\begin{array}{l} \phi = 90^\circ \\ k = 1.04 \\ \alpha_o = 86.8^\circ \end{array} \right)$

Sayısal çalışmanın son değerlendirme safhasında, faz farkına göre en yüksek maksimum güç katsayısı durumlarını sağlayan salınma hareketlerine ait zamana bağlı etkin hücum açıları incelenmiştir (Şekil 41). Şekilden görüldüğü üzere, dalma genliği artarken zaman içerisindeki maksimum etkin hücum açısı değeri (etkin hücum açısı genliği) azalarak 30°ye doğru yakınsama eğilimindedir. Yukarda, maksimum güç katsayısı için dalma genliği artıkcâ yunuslama genliğinin de arttığı anlatılmıştı. Buna karşın, etkin hücum açısı genliği, yunuslama genliği artmasına rağmen dalma genliği ile ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 41. İncelenen bütün dalma genliklerinde maksimum güç katsayısı sağlayan salınma hareketleri için etkin hücum açısının bir salınma periyodu boyunca değişimi

4.3 Farklı Salınır Kanat Yapılandırmaları

Proje başvurusunda “salınan tek bir kanatın sayısal incelenmesine ek olarak, üst üste ve arka arkaya yerleştirilmiş salınır kanatların güç üretimine olan etkisinin araştırılması da değerlendirilecektir” denmiştir.

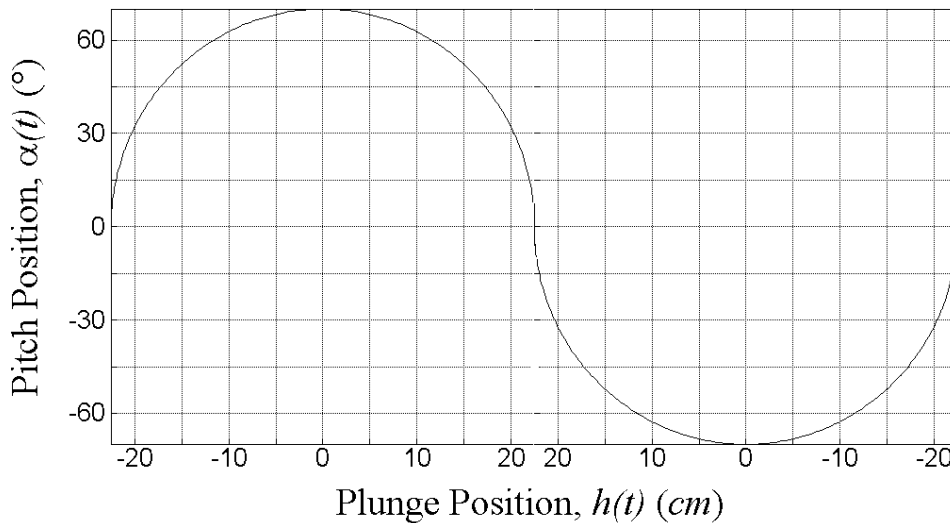
Bölümü 3.2’de de anlatıldığı gibi rüzgâr tüneli kısıtları sebebiyle kanatlar çok düşük kanat açıklığına ve dolayısıyla kısa veter uzunluğuna sahip olarak üretilebilmiştir. Bu zorlayıcı koşullar neticesinde deneysel çalışmada incelenmesi planlanan üst üste ve arka arkaya yerleştirilmiş salınır kanat yapılandırmaları üretilememiştir. Deneysel çalışmada bu durumun incelenemeyecek olması başvuruda belirtilen konunun araştırılıp araştırılmayacağı hususundaki değerlendirmenin sonucunu olumsuz karara yönlendirmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI

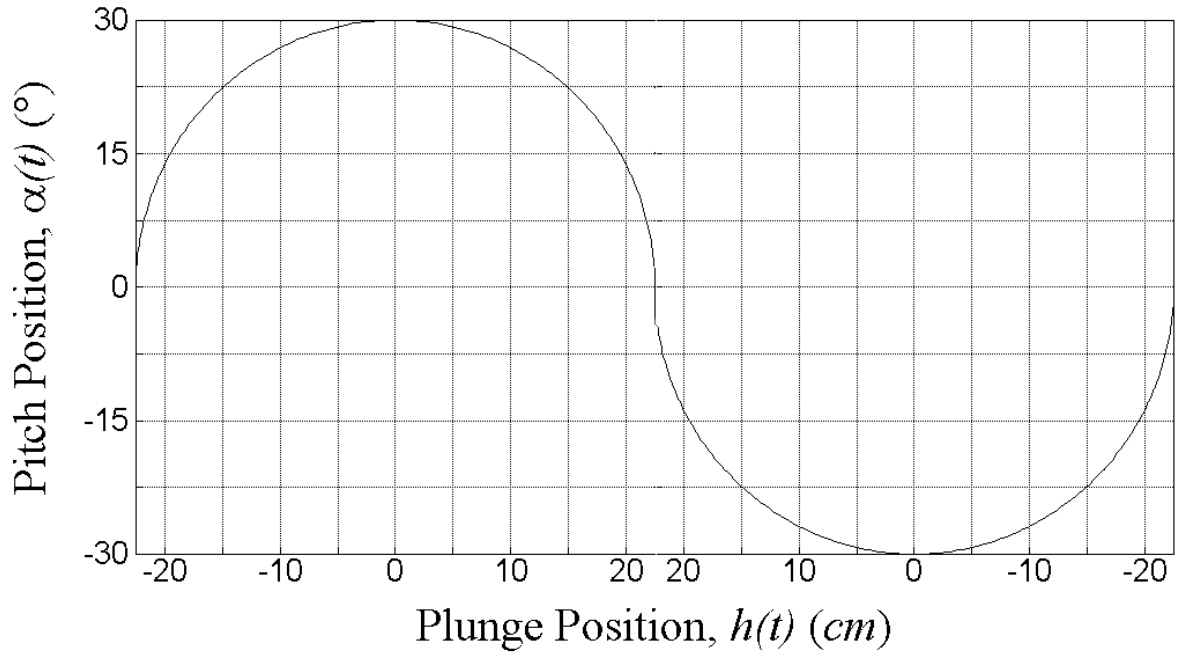
5.1 Giriş

Projenin sayısal çalışma safhasında yapılan eniyileme sonuçlarına göre dalma ve yunuslama hareketleri arasındaki faz farkının, $\phi=90^\circ$ olması durumunda güç üretim katsayısı maksimum değere ulaşmaktadır. Ayrıca, yüksek dalma genliği değerleri ($h_o>0.75$) için de $\phi=90^\circ$, maksimum güç üretim verimini sağlamaktadır. İncelenen dalma genliği aralığı ($0.50 \leq h_o \leq 1.50$) için güç katsayısı ve güç üretimi verimini maksimum yapan yunuslama genliği, α_o , değerleri 70° - 85° arasında değişmektedir. Bu durumdaki indirgenmiş frekans değerleri de $k \sim 1$ 'dir.

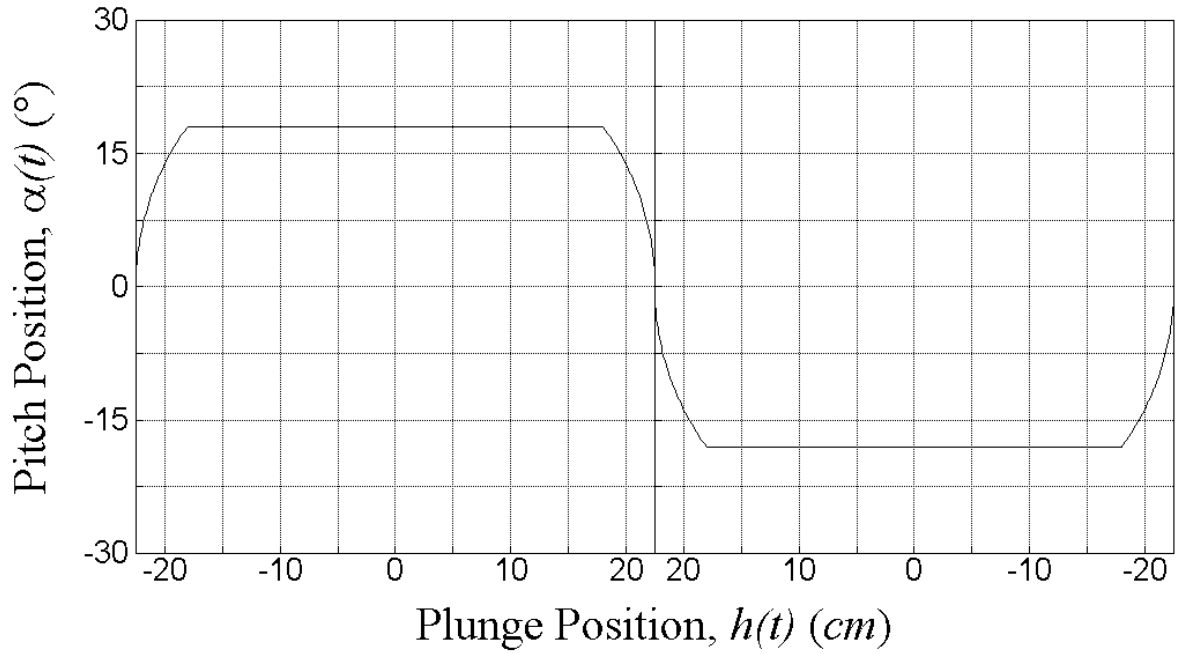
Salınma hareketi esnasında oluşacak olan sürtünme ve mekanizmanın ataleti sebebiyle aerodinamik kuvvetlerin bir kısmının bu sürtünme ve atalet direncine karşı harcanacağı göz önünde bulundurularak salınır kanatların tutunamamazlık (*Ing: stall*) yaşaması ihtimalini düşürmek amacıyla yunuslama genliği fazla büyük seçilmemiştir. Şekil 6'da görülen eliptik yol, $\alpha_o=70^\circ$ için ürettirilmiş tir. Ancak, bu yunuslama genliği için deneylerde salınır kanatların hareketin belli safhalarında takıldığı ve durduğu gözlenmiştir. Bu gözlem neticesinde iki yeni mekanizma hareket yolu daha ürettirilmiştir. Birinci yol Şekil 6'daki gibi yine eliptiktir ve ilgili yunuslama genliği, $\alpha_o=30^\circ$ dir. İkinci yol, belli dalma konumu aralığı için sabit yunuslama açısı sağlamaktadır. İkinci yolda maksimum yunuslama genliği, $\alpha_o=18^\circ$ dir. Şekil 42, 43 ve 44, ürettirilen mekanizma hareket yollarında kullanılan dalma ve yunuslama bağıntılarını vermektedir.



Şekil 42. İlk mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı (başarısız deney)



Şekil 43. İkinci mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı



Şekil 44. Üçüncü mekanizma hareket yolunda kullanılan dalma ve yunuslama bağıntısı

Deneyisel çalışmada yunuslama genliğinin 70° - 85° aralı ğından uzakta olan $\alpha_o=30^{\circ}$ olarak kullanılmak zorunda kalınması, sayısal çalışmada eniyi salınma hareketini veren durumların incelenmesi engellemiştir. Deney olarak incelenen durumlar Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7. Deneysel çalışmada incelenen durumlar (AR: kanat açıklık oranı)

Durum No	Salınır Kanat	Mekanizma Hareket Yolu	Yunuslama Merkezi	Rüzgâr Hızı (m/s)	İndirgenmiş Frekans, k	C_P	η (%)
	Hepsi	1 ($\alpha_o=70^\circ$)	Hepsi	Hepsi	-	-	-
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=1.3 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	11.2837			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=1.3 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	12.57898			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=1.3 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	17.94456			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=1.3 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	18.33597			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	12.70565			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	14.39144			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	16.08101			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	17.49655			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	2 ($\alpha_o=30^\circ$)	1/3	6.5???			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	8.345338			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	3.498432			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	11.15494			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	12.77111			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6 ($h_o=1.25$)	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	14.52375			
	$c=15.0\text{ cm}$, AR=2.6	3 ($\alpha_{maks}=18^\circ$)	1/3	16.23448			

	$(h_o=1.25)$						
	$c = 15.0 \text{ cm},$ $AR=2.6$ $(h_o=1.25)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/2	11.32961			
	$c = 15.0 \text{ cm},$ $AR=2.6$ $(h_o=1.25)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/2	10.5118			
	$c = 15.0 \text{ cm},$ $AR=2.6$ $(h_o=1.25)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/2	12.31704			
	$c = 15.0 \text{ cm},$ $AR=2.6$ $(h_o=1.25)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/2	14.01488			
	$c = 15.0 \text{ cm},$ $AR=2.6$ $(h_o=1.25)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/2	16.06201			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	2 $(\alpha_o=30^\circ)$	1/3	6.1298			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	2 $(\alpha_o=30^\circ)$	1/3	11.20946			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	2 $(\alpha_o=30^\circ)$	1/3	12.56242			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	2 $(\alpha_o=30^\circ)$	1/3	13.92536			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/3	9.553906			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/3	10.95863			
	$c = 22.5 \text{ cm},$ $AR=2.0$ $(h_o=1.00)$	3 $(\alpha_{maks}=18^\circ)$	1/3	12.04222			

5.2 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Parametrik uzayı geren deney tasarımının durumları, indirgenmiş frekansın, k , yunuslama genliğinin, α_o , dalma genliğinin, h_o ve dalma ile yunuslama arasındaki faz farkının, ϕ , belli aralıklardaki değerlerinin taranması ile elde edilen kombinasyonlardır. k , 0.15-1.50 arasında logaritmik olarak değişirken, α_o , 5° - 90° arasında doğrusal değişmiştir. h_o ve ϕ değerleri de doğrusal değişmiştir. Bu son iki parametrenin aralıkları, sırayla, 0.5-1.50 ve 60° - 90° dir. Gerilen parametrik uzay Tablo-4'te verilmiştir.

5.3 Farklı Salınır Kanat Yapılandırmaları

Proje başvurusunda “çeşitli üst üste ve arka arkaya yerleştirilmiş salınır kanat yapılandırmaları için de rüzgâr tüneli testleri yapılacaktır” denmiştir.

Bölüm 3.2 ve 4.3'te de anlatıldığı gibi rüzgâr tüneline test bölümünün boyut kısıtları sebebiyle üretilen kanatların kanat açıklıkları oldukça düşüktür. Bu durum kanatların veter uzunluklarının da düşük olmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, deneysel çalışmada incelenmesi planlanan üst üste ve arka arkaya yerleştirilmiş salınır kanat yapılandırmalarının üretilmesi mümkün olmamıştır. Sonuç olarak, deneysel aşamanın bu çalışma planı iptal edilmek zorunda kalmıştır.

KAYNAKLAR

- Ashraf, M. A., Young, J., Lai, J. C. S. and Platzer, M. F. 2011. "Numerical Analysis of an Oscillating-Wing Wind and Hydropower Generator", AIAA Journal, 49(7), 1374-1386.
- Betz, A. 1920. "Das Maximum der Theoretisch Möglichen Ausnützung des Windes Durch Windmotoren", Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen, 26, 307-309.
- Jones, K. D., Davids, S. and Platzer, M. F. 1999. "Oscillating-Wing Power Generator", Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM'99, 1.
- Jones, K. D., Lindsey, K. and Platzer, M. F. 2003. "An Investigation of the Fluid-Structure Interaction in an Oscillating-Wing Micro-Hydropower Generator", Fluid Structure Interaction 2, 73-82.
- Kaya, M. and Tuncer, I. H. 2007. "Nonsinusoidal Path Optimization of a Flapping Airfoil", AIAA Journal, 45(8), 2075-2082.
- Kaya, M. and Tuncer, I. H. 2008. "Path Optimization of Thrust Producing Flapping Airfoils Using Response Surface Methodology", 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering.
- Kaya, M. 2008. "Path Optimization of Flapping Airfoils Based on Unsteady Viscous Flow Solutions", Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Kaya, M., Tuncer, I.H., Jones, K.D. and Platzer, M.F. 2009. "Optimization of Flapping Motion Parameters for Two Airfoils in a Biplane Configuration", Journal of Aircraft, 46(2).
- Kinsey, T. and Dumas, G. 2008. "Parametric Study of an Oscillating Airfoil in a Power-Extraction Regime", AIAA Journal, 46(6), 1318-1330.
- Kinsey, T. and Dumas, G. 2012. "Optimal tandem configuration for oscillating-foils hydrokinetic turbine", Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 134(3).
- Kinsey, T. and Dumas, G. 2012. "Three-dimensional effects on an oscillating-foil hydrokinetic turbine", Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 134(7).
- McKinney, W. and DeLaurier, J. 1981. "TheWingmill: An Oscillating-Wing Windmill", Journal of Energy, 5(2), 109-115.
- Platzer, M. F., Ashraf, M. A., Young, J. and Lai, J. C. S. 2010. "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, 2.9.1.
- Roux, W.J., Stander, N. and Haftka, R.T. 1998. "Response Surface Approximations for Structural Optimization", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42, 517-534.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. MUSTAFA KAYA
Proje No:	112M933
Proje Başlığı:	Rüzgar Enerjisinden Güç Üretimi İçin Salınır Kanatların Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	MONİER ELFARRA
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	TÜRK HAVA KURUMU Ü. HAVA ULAŞTIRMA F. PİLOTAJ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/03/2013 - 15/03/2015
Onaylanan Bütçe:	164512.0
Harcanan Bütçe:	89864.3
Öz:	Yürütülen bu proje ile hava akışı içerisinde yerleştirilmiş salınır kanatlardan güç üretilmesi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada, 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. Sayısal olarak incelenen durumlar için dalma genliği arttıkça elde edilen maksimum güç katsayısının arttığı ve eniyi güç üretim veriminin de %40 seviyelerinde olduğu gösterilmiştir. İncelenen her dalma genliği için yaklaşık değeri 1'e eşit olan indirgenmiş frekanslar eniyi hareketi sağlamıştır. Maksimum güç katsayısı için faz farkının 90° civarında olması gerektiği gözlenmiştir. Salınır kanatlar ile rüzgâr enerjisinden güç üretililebileceği deneysel olarak da gösterilmiştir. Üretilen gücün, rüzgâr hızına, veter boyuna, kanat açıklığına ve yunuslama merkezine göre nasıl değiştiği deneysel çalışmada araştırılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmada, 2-B (iki boyutlu) ve laminar akış varsayımı ile hesaplanan salınır kanat çözümleri doğrulanmıştır. İncelenen durumlar neticesinde salınır kanatların türbinlere karşı bir alternatif olabileceği değerlendirilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Rüzgâr enerjisi, salınır kanatlar, zamana bağlı akışlar, eniyileme, deneysel aerodinamik
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- RÜZGAR ENERJİSİNDEN MAKSİMUM GÜÇ ÜRETİMİ VE VERİMİ İÇİN SALINIR KANAT KESİTLERİNİN SALINMA HAREKETİ ENİYİLEMESİ (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),