

KAYSERİ-PINARBAŞI RÜZGÂR POTANSİYELİNE UYGUN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ AERODİNAMİK TASARIMI

Onur KOŞAR¹, M. Serdar GENÇ², Gökhan ÖZKAN³, İlyas KARASU⁴

^{1,2,3}Rüzgar Mühendisliği ve Aerodinamik Laboratuvarı, Enerji Sistemleri Mühendisliği
Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Melikgazi, Kayseri

⁴Uçak Mühendisliği Bölümü, Havacılık ve Uzay Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi,
Şhitkamil, Gaziantep

¹onurkosar@erciyes.edu.tr, ²musgenc@erciyes.edu.tr, ³gozkan_38@hotmail.com,
⁴ikarasu@gantep.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin Kayseri ilinin Pınarbaşı ilçesinin rüzgâr potansiyeline uygun olacak 3 metre rotor çapına sahip sabit hızlı küçük ölçekli rüzgâr türbininin aerodinamik açıdan tasarım ve eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılacak olan tasarımlarda rüzgâr hızına bağlı güç üretimi ve yıllık enerji üretimi maksimize edecek parametreler olarak seçilmiştir. Aerodinamik tasarımı gerçekleştirilecek olan türbinin performans eğrilerini elde etmek amacı ile Pal Elemanı Momentum Teorisi kullanılarak oluşturulan bir kod kullanılmıştır. Performans belirleyici kodun doğruluğunu kanıtlamak amacı ile deneysel performans verileri literatürde var olan üç ayrı rüzgâr türbinin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Türbin tasarımında, boyutsuz yarıçap boyunca değişim gösteren kort uzunluğu ve burulma açısı, türbin kanatlarının kanat profili tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir. Boyutsuz yarıçap boyunca kort uzunluğu ve burulma açısını veren formüllerin kullanılması ile elde edilen tasarımlar, optimizasyon algoritması ile elde edilen tasarımlar ile kıyaslanmıştır. Optimizasyon algoritması kullanılması ile elde edilen tasarımların diğer tasarımlara kıyasla daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır.

1.GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve sanayileşmenin ilerlemesine paralel olarak enerji kaynaklarına olan ihtiyaç da artmaktadır. Geleneksel enerji üretim yöntemlerinin bölgesel ve küresel düzeyde çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı çevre dostu kaynakların enerji üretiminde kullanılması önem arz etmektedir. Karbon salınımını azaltmak için birçok ülke tarafından Kyoto protokolü imzalanmış ve fosil yakıtlardan vazgeçilerek yenilebilir enerji kaynaklarına yönelim teşvik edilmiştir. Türkiye'nin enerji ihtiyacını yenilebilir enerji kaynaklarından temin etmek ve dış kaynaklı enerji tüketimini indirmek için Türkiye'nin mevcut enerji potansiyelinin maksimum düzeyde kullanılması gerekmektedir. Türkiye'de günümüzde kullanılan yenilebilir enerji kaynakları güneş, hidrolik, biokütle, jeotermal ve rüzgâr enerjisidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi de alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Farklı basınç değerlerine sahip komşu bölgeleri arasındaki basınç farkından dolayı yüksek basınç merkezinden alçak basınç merkezine doğru hareket eden hava akımı olan rüzgârın kinetik enerjisi rüzgâr türbinleri ile enerjiyi önce mekanik enerjiye ve sonrasında elektrik enerjisine dönüştürür.

Günümüzde rüzgâr türbini teknolojisi çok büyük ölçeklere ulaşmış ve deniz üstü rüzgâr türbini çiftlikleri kurulmaktadır. Bu büyük ölçekteki gelişmelerin yanında önemli olan diğer bir rüzgâr türbini çalışma konusu da bireysel evler için kendi kendine yetebilen ve bağımsız güç üretimi gerçekleştiren yeterli düzeyde güvenliğe sahip, kullanımı kolay olan küçük rüzgâr türbinleri çalışmalarıdır [1]. Sera gazı seviyesinin yükselmesine olan farkındalığın artması [2], küresel ısınma ve artan fosil yakıt fiyatları düşük maliyetli rüzgâr türbinlerine olan araştırma ilgisine

öncülük eden etmenlerdir. Basit olan yapısı, küçültülmüş tasarımı ve taşınabilir olması bu rüzgâr türbinlerinin kırsal alanlar, banliyö bölgesi ve hatta büyük çapta rüzgâr türbinlerinin çeşitli nedenler ile kabul alamadığı nüfuslu, şehir alanlarında hayati önem taşıyan güç üreticisi olmasını sağlamıştır [3].

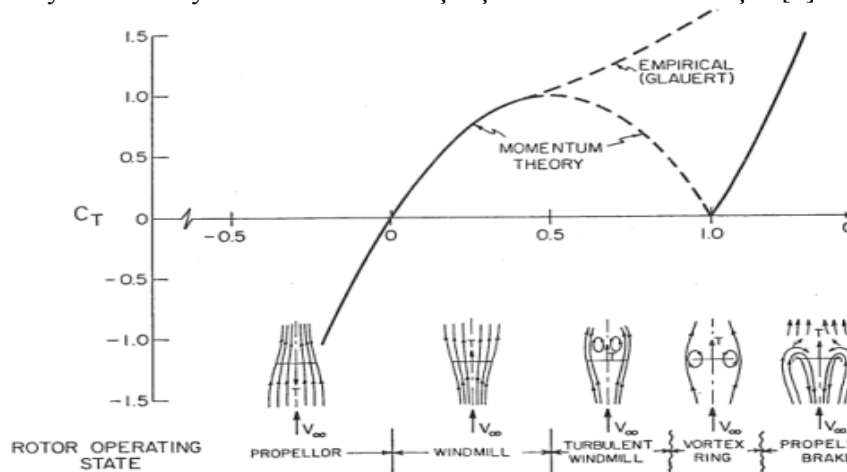
2. PAL ELEMANI-MOMENTUM (BEM) TEORİSİ

Pal Eleman-Momentum(BEM) Teorisi rüzgâr türbini başlangıç aerodinamik analizi, kavramsal tasarımı, yükleme durumu ve durağanlık analizi ve kontrol tasarımı uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir teoridir [4]. Bu teorinin temel olarak alınması ile yatay eksenli rüzgâr türbinleri için AeroDyn [5] ve WT_Perf [6] gibi çeşitli rüzgâr türbini analiz programları son yıllarda geliştirilmektedir.

BEM teorisinde önemli iki adet terim bulunmaktadır: aksel ve teğetsel etki faktörü. Aksel etki faktörü rotor diskten geçen hava miktarını belirler iken, teğetsel akış faktörü ise rotorun arkasındaki akışta çevrinti miktarını ölçer [7].

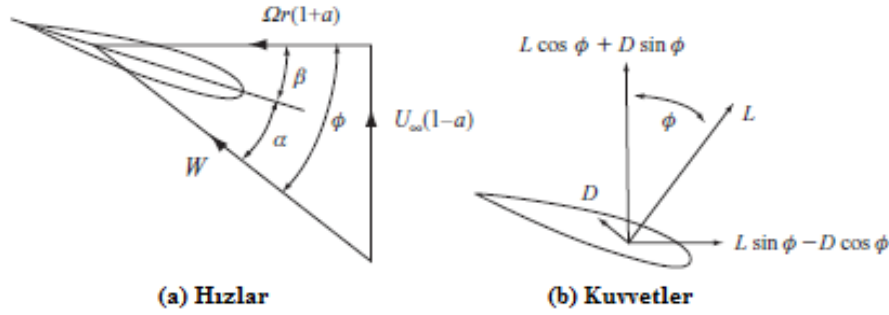
BEM teorisi bir pal elemanından elde edilen kuvvetin, bu pal elemanın dönmesinden meydana gelen ve sadece tek bir dairesel halkadan geçen akışkanın momentumundaki değişim oranından sorumlu olduğunu varsayar. BEM teorisi denklemleri rotor tarafından üretilen itki kuvvetinin aksel momentum değişim oranına eşit olduğu kabulü ile oluşturulur. Oluşturulan bu denklemler çoğunlukla aksel etki faktörüne bağlıdır. Aerodinamik torkun da açısal momentum değişim oranına eşit olarak alınması ile elde edilen denklemler ise öncelikle teğetsel akış faktörüne bağlıdır. BEM teorisi, akışın yerel hücum açısı ve kanat profili aerodinamik verilerini esas alarak kanatlar tarafından üretilen kuvvet ve momentlerin belirlenmesi için kullanılır. Momentum teorisi, ampirik veriler ile birlikte denklemlerin dengelenmesi için kullanılır.

Şekil 1’de teğetsel etki ile değişen itki kuvveti değişiminin rotorun işletme durumu ile olan ilişkisini göstermektedir. Rotorun türbülanslı iz bölgesi bölgesine girdiği, aksel etki faktörünün 0,5 değerinden fazla olduğu durumlarda, momentum teorisi, itki kuvvetini olması gerekenden daha düşük değerlerde olacağını öngörür. Türbülanslı iz bölgesi tipik olarak rüzgâr hızının düşük olduğu değerlerde meydana gelir ve bu bölgede iz bölgesindeki akış ile dış akış arasındaki karışıklık oldukça fazla değerdedir. Bu viskoz karışıklık akım çizgilerinin iyi tanımlanamamasına, aynı zamanda viskoz olmayan durum kabullerinin geçerliliğini yitirmesine yol açar ve klasik momentum teorisi tarafından yürütülen çözümün gerçek değerlerden uzaklaşmasına sebep olur. Ampirik veriler(Glauert ampirik ifadesi), ölçülen itki kuvveti değerleri ile klasik momentum teorisi ile elde edilen itki kuvveti değerleri arasındaki farkın hesaplanması için kullanılır. Glauert’in deneye dayalı ifadesinin WT_Perf programı içerisindeki uygulamasına yönelik detaylı anlatımı Buhl’un çalışmasında ifade edilmiştir [8].



Şekil 1. Rotor İşletim Durumları [7]

Bir pal elemanı üzerine etkiyen eksenel ve teğetsel hız bileşenlerinin etki faktörlerinin çözümü için bir iterasyon işlemi kullanılır ve bu eleman üzerindeki kuvvetler, kanat kesit alanında kullanılan kanat profilinin aerodinamik kaldırma ve sürüklenme verilerine dayanarak hesaplanabilir. Şekil 2’de bir pal elemanı üzerinde oluşan hız ve kuvvet bileşenleri görülmektedir. İterasyon işlemi, itki kuvveti katsayısı, kaldırma katsayısı ve eksenel etki faktörünün bölgesel değerleri temel alınarak yürütülebilir. Eksenel ve teğetsel etki faktörlerinin girilen bir tolerans değerine gelene kadar iterasyon işleminin devam edilmesi gerekmektedir. Şekil 3’te tipik bir BEM teorisi iterasyon sürecinin akış şeması verilmiştir.



Şekil 2. Bir Pal Elemanı Üzerindeki Hız ve Kuvvet Bileşenleri [9]



Şekil 3. Tipik Bir BEM Teorisi İterasyon Süreci

Yerel hız oranı (λ_r), bir pal elemanının sahip olduğu teğetsel hızın serbest akış hızına oranını ifade eder.

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U_\infty} \quad (1)$$

Yerel akış geliş açısı, yerel hız oranının hesaplanmasının ardından aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\tan\phi = \frac{1 - a}{\lambda_r^2(1 + a')} \quad (2)$$

Bir sonraki işlemde, bölgesel hücum açısı yerel akış geliş açısı ve yerel geometrik hatve açısına bağlı olarak hesaplanır.

$$\alpha = \phi - \beta \quad (3)$$

Yerel hücum açısının belirlenmesinin ardından rüzgâr türbini kanadı kesitinde kullanılan kanat profili için aerodinamik veriler yerel hücum açısı ve Reynolds sayısına bağlı olarak elde edilir.

$$(C_l, C_d) = f(\alpha, Reynolds\ Sayısı) \quad (4)$$

Belirlenen aerodinamik katsayılar ve yerel akış geliş açısının kullanılması ile pal elemanı üzerindeki bölgesel kuvvet katsayıları hesaplanır.

$$C_t = C_l \sin(\phi) + C_d \cos(\phi) \quad (5a)$$

$$C_n = C_l \cos(\phi) - C_d \sin(\phi) \quad (5b)$$

Bu noktadan sonra, BEM teorisi ile Glauert düzeltmesinin Buhl tarafından düzenlenmiş deneye dayalı ifadelerinin birleştirilmesi ile oluşturulan düzenlenmiş BEM teorisi yardımıyla etki faktörleri hesap edilir. İlk önce iki adet boyutsuz parametre aşağıdaki formüller ile hesap edilir [4].

$$\kappa = \frac{\sigma' C_t}{4F \sin^2 \phi} \quad (6a)$$

$$\kappa' = \frac{\sigma' C_n}{4F \sin \phi \cos \phi} \quad (6b)$$

Buradaki F göbek ve kanat ucu kayıpları düzeltme katsayısıdır. Aşağıdaki denklemler ile elde edilir.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{-f} \quad (7)$$

$$f_{kanat\ ucu} = \frac{B R - r}{2 r \sin \phi} \quad (8)$$

$$f_{göbek} = \frac{B r - R_{hub}}{2 r \sin \phi} \quad (9)$$

$$F = F_{kanat\ ucu} F_{göbek} \quad (10)$$

Eksenel etki faktörünün hesaplanmasında yerel akış geliş açısı (ϕ) ve κ değerlerinin farklı değerleri için farklı denklemler uygulanır. Eğer $\phi > 0$ ve $\kappa \leq 2/3$ ise çözüm momentum teorisinin geçerli olduğu aralık içerisinde.

$$\alpha = \frac{\kappa}{1 + \kappa} \quad (11)$$

Eğer $\phi > 0$ ve $\kappa > 2/3$ ise çözüm ampirik bölge içerisinde.

$$\alpha = \frac{\gamma_1 - \sqrt{\gamma_2}}{\gamma_3} \quad (12)$$

Burada;

$$\gamma_1 = 2F\kappa - \left(\frac{10}{9} - F\right), \quad \gamma_2 = 2F\kappa - F\left(\frac{4}{3} - F\right), \quad \gamma_3 = 2F\kappa - \left(\frac{25}{9} - 2F\right) \quad (13)$$

Başka bir durumda, eğer $\phi < 0$ ve $\kappa > 1$ ise, çözüm pervane fren bölgesinde yer almaktadır.

$$\alpha = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \quad (14)$$

Eğer $\phi < 0$ ve $\kappa \leq 1$ ise, ϕ 'nin bu değeri için BEM denklemlerinde olası bir çözüm yapılamaz ve $\alpha=0$ olarak kabul edilir. Son olarak teğetsel etki faktörü aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\alpha' = \frac{\kappa'}{1 - \kappa'} \quad (15)$$

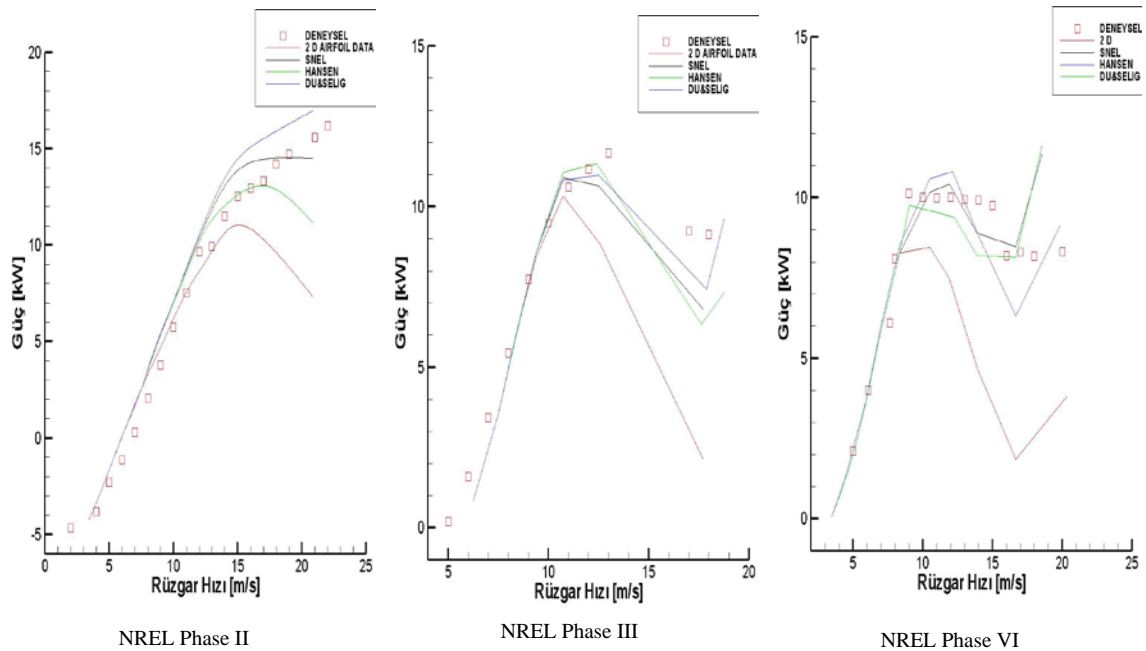
3. METODOLOJİ

BEM teorisinden elde edilen denklemlerin kullanılması ile oluşturduğumuz matematiksel modelin gerçek türbin modellerine kıyasla ne derece doğru olduğunu görebilmek ve kısıtlamalarını anlamak amacıyla üç adet gerçek rüzgâr türbini modeline uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu türbinlerin tasarım detayları ve deneysel sonuçları referans [10,11] 'den alınmıştır. Tablo 1'de bu türbinlerin temel özellikleri verilmiştir. National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından deneysel amaçlar çerçevesinde tasarlanan NREL Phase II, NREL Phase III ve NREL Phase VI türbinlerinin rotor kanatları üzerinde 18 adet pal elemanı seçilmiştir. Rotor kanatları üzerindeki bu noktalarda yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

Tablo 1. NREL Phase II-III-VI Temel Özellikleri

	NREL Phase II	NREL Phase III	NREL Phase VI
Kanat Sayısı	3	3	2
Rotor Çapı	10.06	10.06	11.064
Göbek Yüksekliği	17.03	17.03	12.192 m
Dönme Hızı	71.3 rpm	71.3 rpm	71.63 rpm
Çalışmaya Başlama Rüzgar Hızı	6 m/s	6 m/s	5~6 m/s
Nominal Güç	19 kW	19.8 kW	19.8 kW
Kanat Tipi	Sabit yerel kort uzunluğu ve burulma açısı	Sabit yerel kort uzunluğu ve değişken burulma açısı	Değişken yerel kort uzunluğu ve burulma açısı
Kanat Hatve Açısı	12°	3°	3°
Kanat Profili	NREL S 809	NREL S 809	NREL S 809

Şekil 4 NREL Phase II-III-VI rüzgâr türbinleri için yapılan BEM metodu hesaplamalarını ve deneysel veriler ile kıyaslamalarını göstermektedir. Her üç türbin içinde BEM metodu ile gerçek verilere oldukça yakın performans eğrileri elde edilmiştir. Daha basit yapıya sahip olan NREL Phase II rüzgâr türbininde deneysel verilere oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Kanat yapısının karmaşıklığının artması ile birlikte BEM metodunun gerçek sonuçlara uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 10 m/s ve daha üstü rüzgâr hızlarında iki boyutlu kanat aerodinamik verilerinin kullanıldığı BEM hesaplamalarında ani düşüşler gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bu rüzgâr hızlarından sonra rüzgâr türbini kanadına gelen akış kanat profilinin tutunma kaybı açısı değerlerinin üzerinde olmasıdır. Ama tutunma kaybı gecikmesi adı verilen olayın neticesinde iki boyutlu ölçümlerde gözlemlenen tutunma kaybı bölgesi rüzgâr türbini kanatlarında daha büyük derece değerlerinde gerçekleşmektedir. Bu etkilerin BEM metodunda hesaba katılması amacı ile literatürde var olan üç ayrı ampirik tutunma kaybı düzeltme denklemleri kullanılmıştır. Bu metotlar Snel, Chaviaropoulos-Hansen ve Du-Selig tarafından öne sürülen denklemleri içermektedir [12]. Bu metotların uygulanması ile BEM metodunda tutunma kaybı etkileri BEM denklemlerine eklenmiştir ve gerçek verilere yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. NREL Phase II-III-VI Test ve BEM Metodu Sonuçları Karşılaştırması

4. KAYSERİ-PINARBAŞI BÖLGESİNE UYGUN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİNİ TASARIMI

Gökçek ve Genç [13] çalışmalarında İç Anadolu Bölgesi'nde rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin maliyetini ve rüzgâr potansiyelinin değerlendirilmesi çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda Kayseri-Pınarbaşı bölgesinin araştırılması yapılan diğer bölgelere kıyasla önemli ölçüde daha iyi rüzgâr potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Genç ve Gökçek [14] daha önceki çalışmalarında, enerji maliyet analizini gerçekleştirmek amacı ile Pınarbaşı, Develi, Sarız, Tomarza, Kırıkkale, Niğde, Nevşehir, Kırşehir, Yozgat, Boğazlıyan, Çorum ve Sinop bölgelerinde rüzgâr potansiyeli belirleme çalışmaları yapmışlardır. 10 metre yükseklikte alınan rüzgâr verileri bu çalışmalarda verilmiştir. Yıllık ortalama rüzgâr hızı en yüksek 3.67 m/s, en yüksek Weibull skala parametresi 4.09 m/s ile Pınarbaşı bölgesinde olduğunu söylemişlerdir. Diğer bir deyişle Pınarbaşı bölgesi hem rüzgâr hızı hem de rüzgâr hızı değişimi açısından daha büyük değerlere sahiptir.

Türkiye Rüzgâr Atlas'ında Pınarbaşı bölgesi yıllık ortalama rüzgâr hızının 4,5 m/s ve 5 m/s arasında olduğu yeşil bölgede yer almaktadır. Pınarbaşı bölgesinde 50 metre göbek yüksekliğinde yıllık ortalama 5.08 m/s değerlerinde olduğu saptanmıştır.

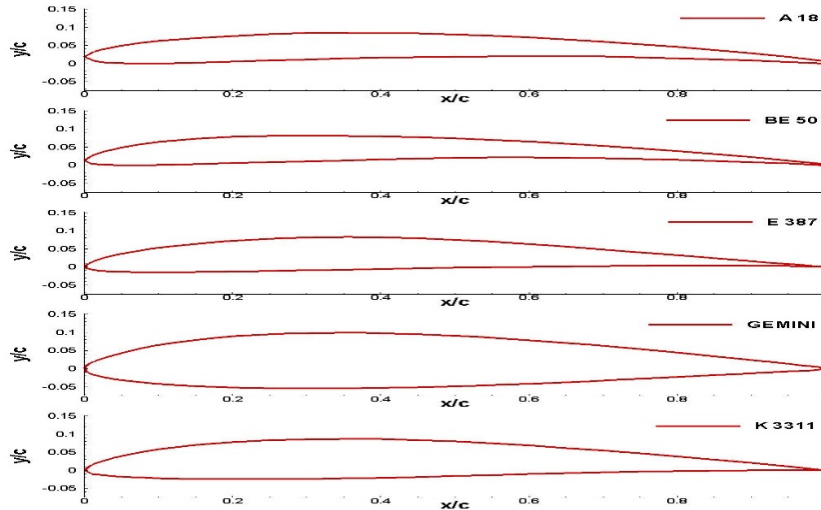
Genç [15] çalışmasında Pınarbaşı'nın sadece yıllık ortalama hızı açısından değil rüzgâr hızı frekans dağılımı açısından da diğer bölgelere kıyasla daha iyi olduğunu söylemişlerdir. Örnek olarak Pınarbaşı bölgesinin en sık frekans aralığı 0-10 m/s iken Kayseri için bu değer 0-5 m/s aralığındadır. Ayrıca Pınarbaşı için hazırladıkları rüzgâr olasılık yoğunluk grafiklerinde, Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilen verilerin gerçek verilere, Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilen verilere kıyasla daha yakın olduğunu göstermişlerdir. Bu yüzden bu çalışmada gerçekleştirilen yıllık enerji üretim hesaplamalarında olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplamalarında Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Rayleigh olasılık yoğunluk dağılımı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$f_R(U) = \frac{\pi U}{2\bar{U}^2} \exp\left[-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (16)$$

Burada U rüzgâr hızını, \bar{U} ise ortalama rüzgâr hızını ifade etmektedir.

B. Mikro Ölçekli Rüzgâr Türbini Tasarımı

Pınarbaşı bölgesi için BEM teorisi temelli aerodinamik tasarımını mikro rüzgâr türbini rotoru için temel özellikler 3 kanatlı, yatay eksenli, 3 metre rotor çapına, 0.2 metre göbek çapına sahip, 12 metre göbek yüksekliğine, 450 devir/dakika sabit açısal hız ile dönen, nominal güç çıkışı değeri 1 ila 2 kW arasında olacak şekilde seçilmiştir. Rotor kanatlarında kullanılması amacıyla literatürde var olan beş ayrı düşük Reynolds kanat profili seçilmiştir. Seçilen bu beş kanat profili Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Tasarım için Seçilen Kanat Profilleri

Önceki bölümlerde kanat profillerinin aerodinamik kaldırma ve sürüklenme katsayılarının BEM metodunda önemli bir yere sahip olduğunu söylemiştik. Seçilen bu beş ayrı düşük Reynolds kanat profilinin deneysel verileri ref[16]'ten alınmıştır. Ayrıca Tablo 2'de kanat profillerinin var olan deneysel Reynolds sayısı ve hücum açısı aralığı gösterilmiştir.

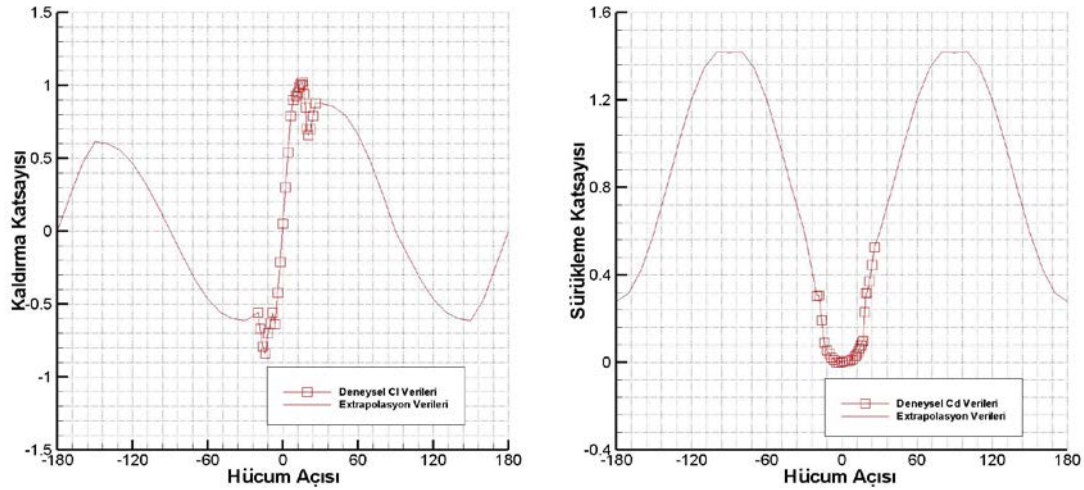
BEM analizi neticesinde elde edilecek sonuçların gerçeğe daha yakın sonuçlar verebilmesi için her bir pal elemanına denk gelen Reynolds sayısı ve hücum açısındaki aerodinamik katsayı

verilerinin gerçeğe mümkün olduğunca uygun olması gerekmektedir. Rüzgâr türbini kanadının spanı boyunca Reynolds sayısı ve hücum açısı değerleri değişim göstermektedir. Günümüzde kullanıma açık kanat profili aerodinamik katsayıları verileri sadece belirli Reynolds sayısı değerlerinde ve belirli hücum açılarında yapıldığı için, olmayan değerler elde edilmesi amacı ile bir interpolasyon ve extrapolasyon işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sebeple rüzgâr türbini uygulamalarında kullanılan kanat profillerinin çoğu yüksek hücum açılarında rüzgâr tünellerinde test edilmektedir.

Tablo 2. Tasarım için Seçilen Kanat Profillerinin Deneysel Veri Aralıkları

Kanat Profili	Reynolds Sayısı	Hücum Açısı
A 18	40400-303000	$-2^\circ < \alpha < 11^\circ$
BE 50	60300-302700	$-4^\circ < \alpha < 11^\circ$
E 387	101000-303000	$-5^\circ < \alpha < 10^\circ$
GEMINI	101600-304100	$-7^\circ < \alpha < 12^\circ$
K 3311	61100-302900	$-5^\circ < \alpha < 11^\circ$

Yine de BEM analizinde kullanılacak olan kanat aerodinamik katsayı verilerinin -180 dereceden $+180$ dereceye kadar extrapolasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu amaçla NREL tarafından geliştirilen ve bir ön işleme aracı olan AirfoilPrep yazılımı kullanılmaktadır [6,17]. Bu yazılım NREL'in aerodinamik analiz için geliştirdiği WT Perf ve AeroDyn gibi yazılımlarda kanat verilerinin extrapolasyonunda kullanılmaktadır. AirfoilPrep yazılımı bu extrapolasyon işlemi Viterna Metodu adı verilen bir model kullanarak gerçekleştirir [18]. Şekil 6'da NREL Phase II-III-VI rüzgâr türbinlerinin kanatlarında kullanılan NREL S 809 kanat profilinin aerodinamik katsayılarına, BEM metodunda kullanılmak amacıyla AirfoilPrep yazılımı ile uygulanan extrapolasyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 6. NREL S 809 Kanat Profili için Aerodinamik Katsayıların -180° ile 180° Değerleri Arasında Extrapolasyonu

Çalışmamızda öncelikle, her bir kanat profili için iki ayrı rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir ve her bir kanat profili önce kendi içerisinde kıyaslanmıştır. Birinci tasarım BEM teorisinden gelen ve optimum kort uzunluğu ve burulma açısının radyal mesafe boyunca değişimini veren denklemler ile oluşturulan tasarımlardır. Çalışmamızda yerel kort uzunluğu ve yerel burulma açısının belirlenmesinde referans [9]'da verilen aşağıdaki formüller kullanılmıştır.

$$c = \frac{\frac{16}{9} \pi R}{BC_{l,tasarım} \lambda_{Tasarım} \sqrt{\frac{4}{9} + \lambda_{Tasarım}^2 \mu^2 \left[1 + \frac{2}{9 \lambda_{Tasarım}^2 \mu^2}\right]^2}} \quad (17)$$

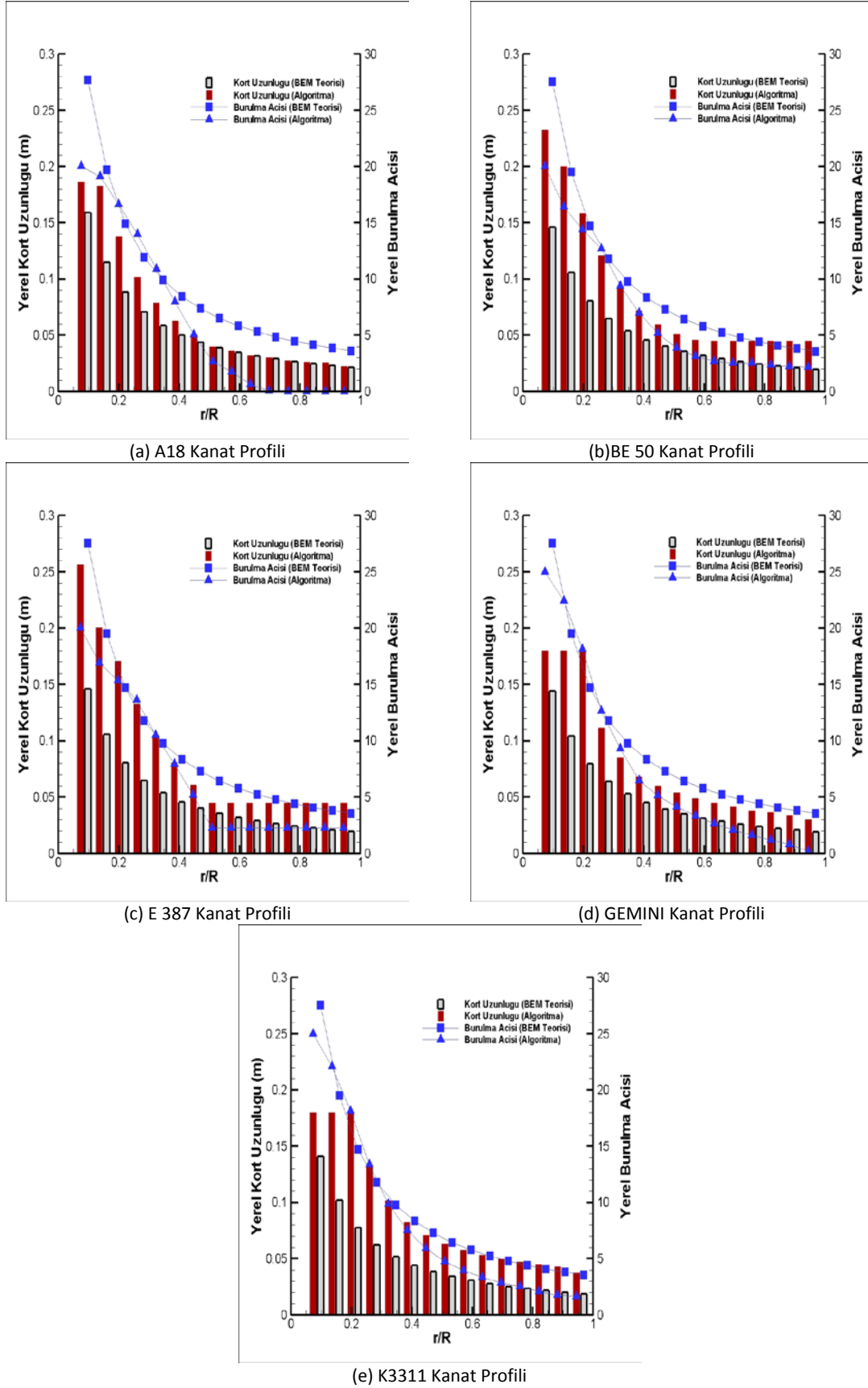
$$\tan \phi = \left[\frac{\frac{2}{3}}{\lambda_{Tasarım} \mu \left(1 + \frac{2}{9 \lambda_{Tasarım}^2 \mu^2}\right)} \right] \quad (18)$$

Burada $\lambda_{Tasarım}$ ve $C_{l,Tasarım}$ tasarım için seçilen kanat ucu hız oranı ve kanat profilinin kaldırma katsayısı değerini, $\mu=r/R$ ise kanadın kök kısmından kanat ucuna kadar boyutsuz radyal konumunu, B ise rotordaki kanat sayısını belirtmektedir.

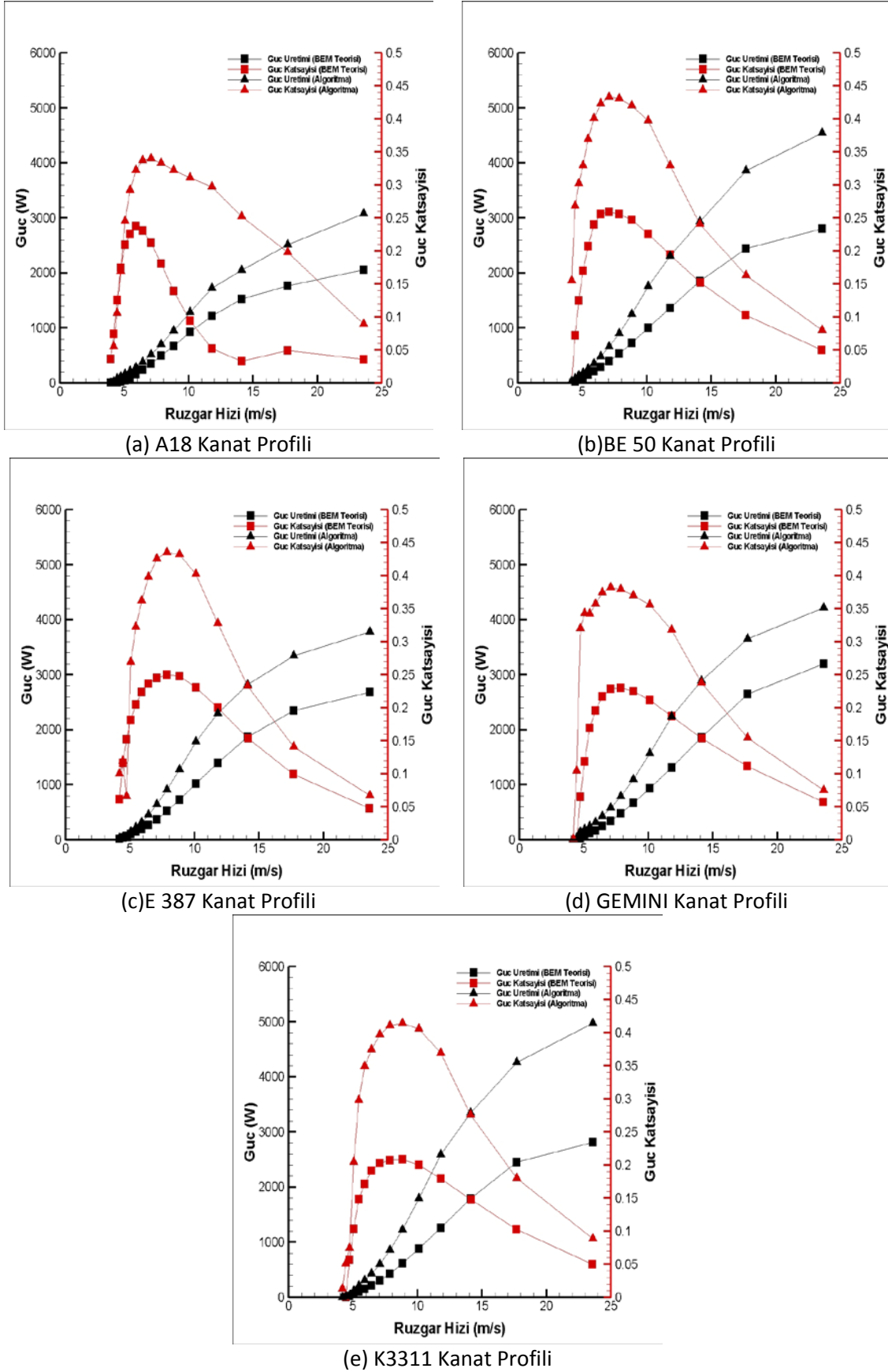
Her bir kanat profili için gerçekleştirilen ikinci tasarım ise referans [19]'da verilen ve optimum yerel kort uzunluğunu ve yerel burulma açısını, çok amaçlı bir farksal gelişim algoritması kullanarak hesaplayan bir bilgisayar kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bir rüzgâr türbini kanadının tasarımı kanat ucu hız oranının ve kanat kesit profilinin seçilmesi ile güç çıkışının maksimum değeri için denklemler vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Fakat maksimum güç çıkışı değeri optimizasyon yapılacak bir kanat için sadece önemli parametrelerden biridir. Örnek verilecek olursa, büyük kanatlar gürültü seviyesi açısından en düşük değere göre tasarlanmalı, küçük kanatlar ise genellikle düşük rüzgâr hızlarında çalıştıkları için düşük hızlarda çalışmaya başlama süresine göre tasarlanmalıdır. Böyle tasarımlar genellikle tek bir denklem vasıtası ile gerçekleştirilemezler. Bu tarz tasarımların gerçekleştirilmesi için kullanılan çeşitli çok amaçlı optimizasyon metotları mevcuttur. Bunlardan biri evrimsel algoritma mantığı ile çalışan optimizasyon metodudur. Bu yöntemde bir popülasyon etrafında sınırlı sayıda oluşturulan ve geliştirilen jenerasyonlardan en uygun çözüme ulaşmaya çalışan bir doğal seçim süreci uygulanır. Başlangıçta rastgele oluşturulan ilk popülasyon yeni yavruların oluşturulmasını sağlar. Var olan ve yeni doğan bireylerin uygunluk değeri ile hangisinin öleceği ve hangisinin hayatta kalacağı seçilmiş olur. Popülasyondaki her bir birey bir kanat tasarımını ve bu bireyi oluşturan genler ise her bir pal elemanındaki yerel kort uzunluğunu ve yerel dönme açısını temsil etmektedir. Algoritmadan elde edilen optimum yerel kort uzunluğu ve yerel burulma açısı değerlerine sahip tasarımların performans analizi tekrardan kendi hazırlamış olduğumuz BEM metodu tarafından gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7'de her bir kanat profili için BEM teorisi ve algoritma tasarımı ile elde edilen yerel kort uzunluğu ve burulma açısı değerleri gösterilmiştir. Bütün tasarımlarda neredeyse bütün radyal konumlarda algoritma tasarımları, BEM teorisi tasarımlarına kıyasla daha uzun kort uzunluğu değerleri hesaplamıştır. Ancak, yerel burulma açısı değerlerine bakıldığında ise tam tersi değerler elde edildiği gözlemlenmiştir. Neredeyse bütün tasarımlarda her bir radyal konumda BEM teorisi tasarımları algoritma tasarımlarına kıyasla daha fazla yerel kort uzunluğu değerine sahiptir.

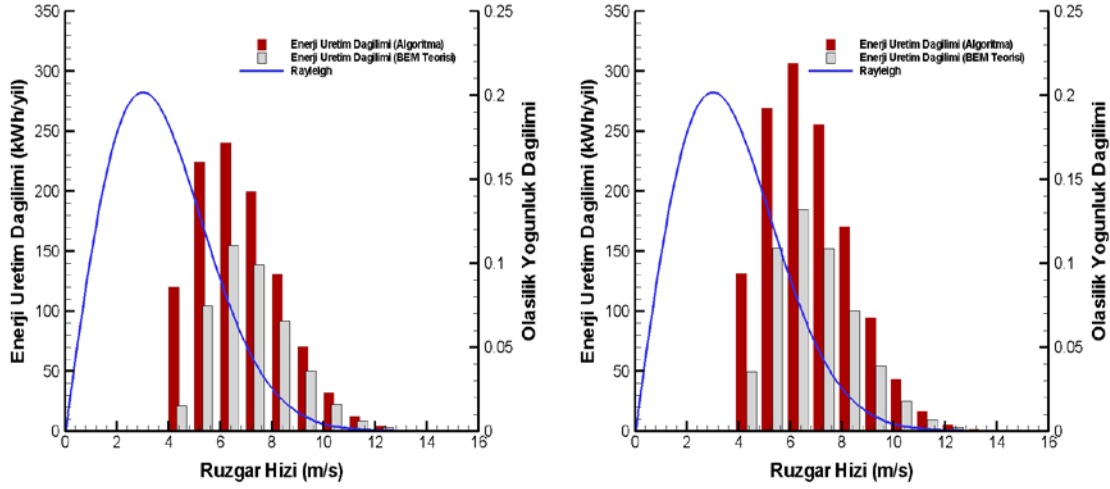
Şekil 8'de, Şekil 7'de optimum yerel kort uzunluğu ve yerel burulma açıları verilen tasarımların performans kıyaslamaları verilmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde bütün kanat profilleri için, algoritma tasarımları BEM teorisi formülleri ile yapılan tasarımlara oranla daha iyi performans göstereceği hesaplanmıştır. Elimizdeki kanat profillerinin hücum açısı aralığında tutunma kaybı aralığı olmadığı için BEM hesaplamaları rüzgâr hızının artmasıyla beraber kanadın tutunma kaybı bölgesine girmesine rağmen bir performans düşüklüğü öngörememektedir. Bu rüzgâr hızlarında daha doğru performans eğrileri elde etmek için deneysel verilerin genişletilmesi gerekmektedir.



Şekil 7. Her Bir Kanat Profili İçin BEM Teorisi Ve Algoritma Tasarımı İle Elde Edilen Yerel Kort Uzunluğu Ve Burulma Açısı Değerleri

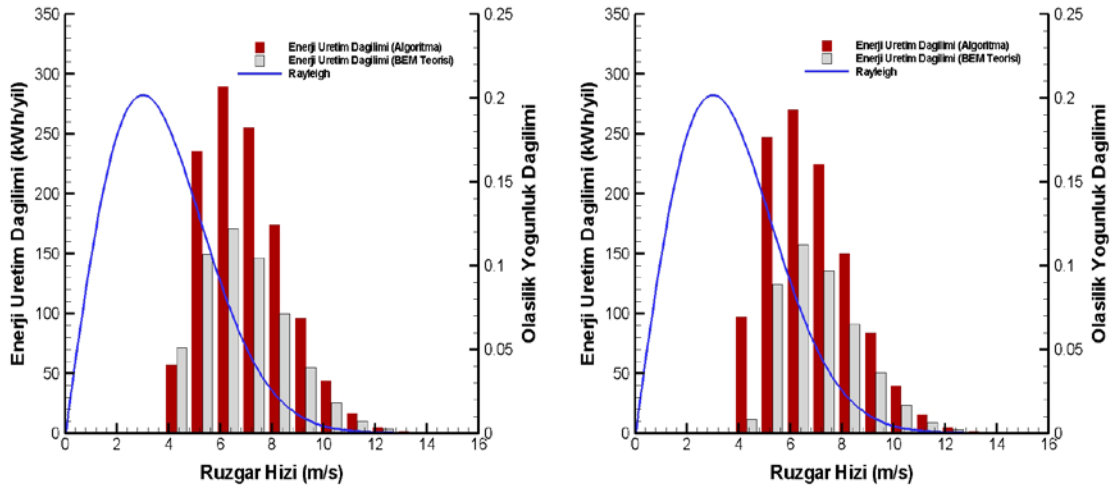


Şekil 8. Her Bir Kanat Profili İçin BEM Teorisi Ve Algoritma Tasarımlarının Performans Kıyaslaması



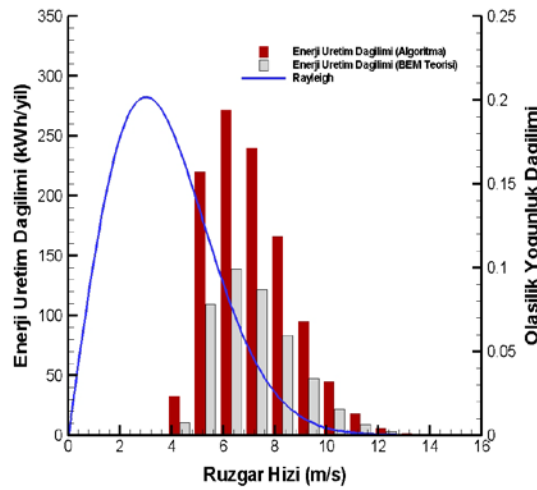
(a) A18 Kanat Profili

(b) BE 50 Kanat Profili



(c) E 387 Kanat Profili

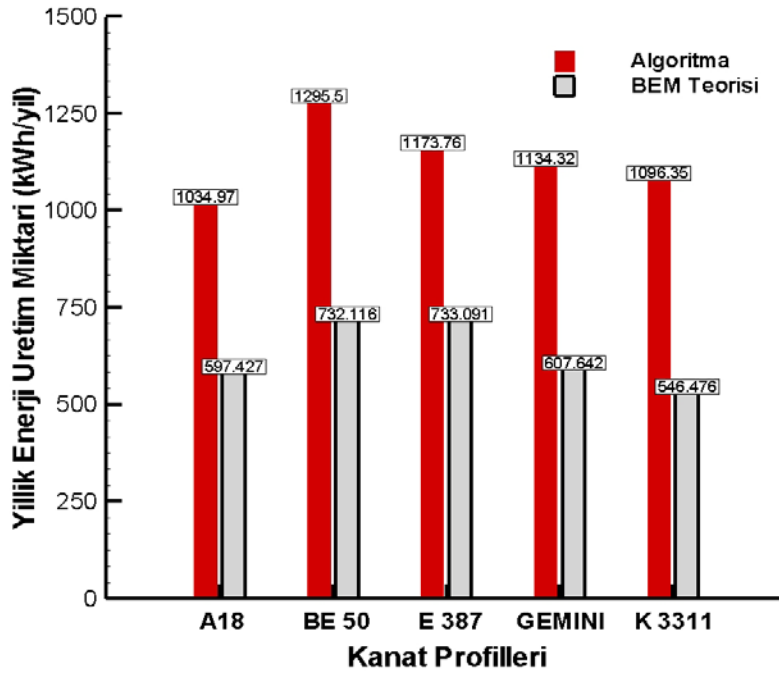
(d) GEMINI Kanat Profili



(e) K3311 Kanat Profili

Şekil 9. Pınarbaşı Bölgesi için Rüzgâr Hızlarına Göre Yıllık Enerji Üretim Miktarı Kıyaslaması ve Pınarbaşı için Rayleigh Olasılık Yoğunluk Dağılımı

Şekil 9'da her bir kanat profili için BEM teorisi ve algoritma tasarımlarının Pınarbaşı bölgesinde rüzgâr hızına bağlı yıllık enerji üretim miktarı kapasite kıyaslaması ve yine Pınarbaşı rüzgâr potansiyelinin Rayleigh olasılık yoğunluk dağılımı verilmiştir. Bütün tasarımlar için en fazla enerji üretilen rüzgâr hızının 6,5 m/s olacağı hesaplanmıştır. Şekil 8'i irdelerken bahsettiğimiz tutunma kaybına yol açacak hızlara Pınarbaşı bölgesinde çok fazla rastlanmadığı için o hızlar için muhtemel olarak hesaplanan aşırı güç üretim değerleri burada önemini yitirmiştir. Yine Şekil 9'dan yıllık enerji üretim aralığında en fazla değerleri elde ettiğimiz rüzgâr hızları ise 5,5 m/s ile 8,5 m/s olduğu ve dolayısıyla yapılacak olan tasarımın özellikle bu rüzgâr hızlarında iyi bir rotor performansına sahip olması gerektiği söylenebilir.

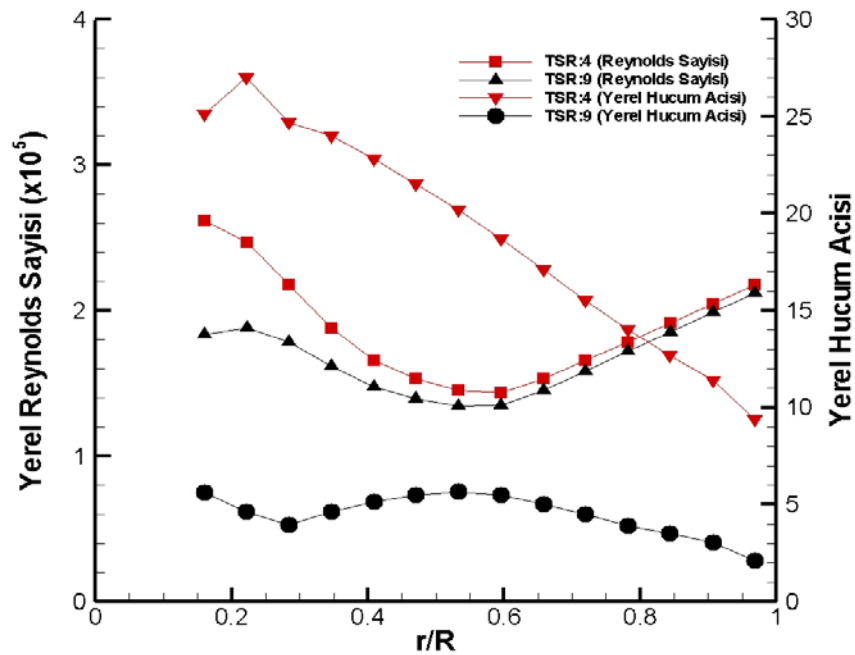


Şekil 10. Kayseri-Pınarbaşı için Yıllık Enerji Üretim Miktarı Kıyaslamaları

Şekil 10'da elde edilen bütün tasarımların Kayseri-Pınarbaşı bölgesinde üretebilecekleri yıllık enerji miktarı kıyaslaması görülmektedir. Yapılan hesaplamalar neticesinde bu tasarımlar içerisinde bu bölge için en iyi tasarımın BE 50 kanat profilinin algoritma ile elde edilen tasarımı olduğu görülmektedir. Böyle bir tasarımın Kayseri-Pınarbaşı bölgesine uygulanması ile yıllık olarak 1295,5 kWh enerji üretimi gerçekleştirebileceği öngörülmektedir. Bu çalışmanın amacı, gerçekleştirilen tasarımların seçilen bölge için aerodinamik açıdan uygunluğunun araştırılması olması sebebi ile göbek ve kanat ucu kayıpları dışındaki diğer kayıplar hesaba katılmamıştır. Mekanik ve elektriksel kayıpların etkisi ve rüzgârın düzensizliği gibi etkenlerin hesaba katılması ile hesaplanan enerji üretim miktarı değerlerinin düşeceği aşikârdır. Ülkemizde bir evin yıllık enerji tüketimi ortalama olarak 2800-3500 kWh olarak hesaplanmaktadır [20,21]. Bu rakamlara kıyasla en iyi olan tasarımımızın dahi tek başına bir evin yıllık enerji ihtiyacını karşılayamayacağı söylenebilir. Fakat iyi tasarlanmış küçük boyutlu rüzgâr türbinlerinin, özellikle şehir yerleşiminden uzak elektriğin olmadığı bölgelerde belirli sürelerdeki enerji ihtiyacının giderilmesi konusunda önemli bir alternatif olduğu söylenebilir [22].

Şekil 11'de BE 50 algoritma tasarımının 7,85 m/s ve 17,67 m/s değerlerine denk gelen, kanat ucu hız oranının 4 ve 9 değerlerinde kanat boyunca değişen Reynolds sayısı ve hücum açısı değerleri verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü üzere BE 50 kanat profilinin elimizdeki Reynolds sayısı aralığı hesaplanan Reynolds sayısı aralığı ile örtüşmektedir. Bu BEM metodunun

doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Kanat boyunca hücum açısı değişimine bakılacak olursa 7,85 m/s rüzgâr hızında işletilen tasarımda 0° - 6° açıları arasında olduğu görülmektedir. Yine Tablo 2'den elimizdeki deneysel verinin hücum açısı aralığı -4° ile 11° aralığını kapsamaktadır. Bu rüzgâr hızında elde edilen BEM metodu sonuçlarının doğruluğu açısından yine oldukça önemli bir parametredir. Rüzgar hızının 17,67 m/s olduğu durum için ise hücum açısı değerleri 9° ile 27° aralığında değişmektedir. Bu rüzgâr hızlarında daha doğru hesaplamalar yapılması amacıyla deneysel verilerin aralığı bu aralığı kapsamaması gerekmektedir. Özellikle rüzgâr aralığının yıllık enerji üretiminde önem arz ettiği koşullarda daha da önem kazanır. Özellikle düşük Reynolds sayısı seviyelerinde çalışan küçük ölçekli rüzgâr türbinlerinin ayrılma kabarcıkları ve tutunma kayıpları sebebi ile performansları düşmektedir. Bu yüzden özellikle bu türbinlerde kullanılacak olan düşük Reynolds kanat profillerinin aerodinamik karakteristikleri iyi anlaşılmalıdır.



Şekil 11. BE50 algoritma tasarımında Kanat Ucu Hız Oranı 4 ve 9 için Kanat Boyunca Reynolds Sayısı ve Hücum Açısı Değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada, deneysel amaçlar ile kurulan üç ayrı rüzgâr türbini üzerinde bir doğrulama gerçekleştirilmiştir ve kısıtlamaları irdelenmiştir. Türkiye'nin Kayseri-Pınarbaşı bölgesinin rüzgâr potansiyelinden bahsedilmiştir ve bu bölgeye uygun mikro ölçekli bir rüzgâr türbinin aerodinamik tasarımı amacı ile beş ayrı düşük Reynolds aerodinamiği kanat profili seçilmiştir. Başlıca teknik özellikleri verilen rüzgâr türbininin, her bir kanat profili için hem BEM teorisine dayanan optimum yerel kort ve burulma açısını veren tasarımı hem de literatürde var olan çok amaçlı bir farksal gelişim algoritması ile elde edilen tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bütün tasarımların performans tahmini hazırlamış olduğumuz BEM teorisi temelli kod ile hesaplanmıştır. Yapılan kıyaslamalar neticesinde algoritma temelli tasarımların daha iyi performans göstereceği hesaplanmıştır. Kayseri-Pınarbaşı bölgesi için yıllık rüzgâr olasılık yoğunluk değerlerinin hesaplanmasında Rayleigh yöntemi kullanılmıştır ve BEM kodundan gelen performans verileri ile yapılan hesaplar neticesinde BE 50 kanat profilinin algoritma ile elde edilen tasarımının en iyi olacağı hesaplanmıştır. Bu bölgede böyle bir tasarımın mekanik ve elektriksel kayıplar olmaksızın yıllık 1295,5 kWh enerji üreteceği hesaplanmıştır.

TEŞEKKÜR

Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne FYL-2014-4989 kodlu yüksek lisans araştırma projesine desteğinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] **Ameku, K., Nagai, B.M., Roy, J.N.**, 2008. Design of a 3 Kw Wind Turbine Generator With Thin Airfoil Blades, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32 - 1723–1730.
- [2] **Cooper P., Kosasih PB., Ledo L.**, 2011, Roof Mounting Site Analysis for Micro-wind Turbines, *Renewable Energy*, 36(5), pp 1379-1391.
- [3] **Hirahara H, Hossain MZ, Nonomura Y.**, 2005, Testing Basic Performance of a Very Small Wind Turbine Designed for Multi-purposes, *Renewable Energy*, 30(8), pp.
- [4] **S. A. Ning, G. Hayman, R. Damiani, and J. Jonkman**, 2015, Development and Validation of a New Blade Element Momentum Skewed-Wake Model within AeroDyn, *AIAA Science and Technology Forum and Exposition 2015 Kissimmee, Florida January 5–9*.
- [5] **Moriarty, P.J. and Hansen, A.C.**, 2005, *AeroDyn Theory Manual*, Technical Report, NREL/TP-500-36881
- [6] **M. L. Buhl Jr.**, 2005, The NWTTC Design-Codes Suite: An Overview, *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 10-13 January Reno, Nevada*.
- [7] **David C. Maniaci**, 2011, An Investigation of WT_Perf Convergence Issues, *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2011, Orlando, Florida*.
- [8] **Buhl L. Jr.**, 2005, A New Empirical Relationship Between Thrust Coefficient And Induction Factor For The Turbulent Windmill State, Technical Report NREL/TP-500-36834.
- [9] **Burton T., Jenkins N., Sharpe D. and Bossanyi E.**, 2011, *Wind Energy Handbook*, Second Edition, John Wiley and Sons, Ltd..
- [10] **Scheper, J.G. et al.**, 2002, Enhanced Field Rotor Aerodynamics Database, Final report of IEA AnnexXVIII: ECN-C--02-016.
- [11] **M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood**, 2001, Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns, NREL/TP-500-29955.
- [12] **Breton SP, Coton FN, Moe G.**, 2008, A Study on Rotational Effects and Different Stall Delay Models Using a Prescribed Wake Vortex Scheme and NREL Phase VI Experiment Data. *Wind Energy*. 2008. 11: 459-482.
- [13] **Gökçek, M., Genç, M.S.**, 2009, Evaluation Of Electricity Generation And Energy Cost Of Wind Energy Conversion Systems (Weccs) In Central Turkey, *Applied Energy*, 86, pp.2731-2739.
- [14] **Genç, M.S., Gökçek, M.** (2009). Evaluation Of Wind Characteristics And Energy Potential In Kayseri, Turkey, *J. Energy Engineering-ASCE*, 135, pp. 33-43.
- [15] **Genç, M.S.**, 2010, Economic Analysis Of Large-Scale Wind Energy Conversion Systems In Central Anatolian Turkey, Eguchi, K. (Eds.), *Clean energy systems and experiences*, p.131-154.
- [16] **Selig M.S., Guglielmo J.J., Broeren P., Giguere P.**, 1995, *Summary of Low-Speed Airfoil Data, Volume 1*, SolarTech Publications, Virginia Beach, Virginia.
- [17] **Ö. Ceyhan**, 2008, Aerodynamic Design And Optimization Of Horizontal Axis Wind Turbines By Using Bem Theory And Genetic Algorithm, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 119pp.
- [18] **J. L. Tangler, J. D. Kocurek**, 1993, Wind Turbine Post Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines For Blade-Element Momentum Methods, *Proc. of 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (591)*, 1-10,1993.

- [19] **Wood, D.**, 2011, Small Wind Turbines Analysis, Design and Application, Springer-Verlag London Limited.
- [20] **Yiğit F., Kabul A.**, 2014, Isparta Yöresinde Bir Evin Elektrik İhtiyacının Rüzgar Enerjisi İle Karşılanmasının Ekonomik Analizi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 11, No: 2, 2014 (1-9).
- [21] **Çifci A., Kırbaş I., İşyarlar B.**, 2014, Güneş Pili Kullanılarak Burdur'da Bir Evin Ortalama Elektrik İhtiyacının Karşılanması, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5 (1): 14-17.
- [22] **Koşar, O.**, 2014, Kayseri-Pınarbaşı Rüzgar Potansiyeline Uygun Mikro Ölçekli Rüzgar Türbini Aerodinamik Tasarımı ve Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.