
KAYSERİ PINARBAŞI RÜZGAR POTANSİYELİNE UYGUN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGAR TÜRBİNİ AERODİNAMİK TASARIMI

Onur KOŞAR, M. Serdar GENÇ, Gökhan ÖZKAN, İlyas KARASU

SUNUMUN İÇERİĞİ

- Rüzgar Türbini Teknolojisi
- Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi
- Metodoloji ve Doğrulama
- BEM Teorisi Hesaplamaları
- Tasarım ve Değerlendirme
- Sonuç ve Tartışma

Rüzgar Türbini Teknolojisi

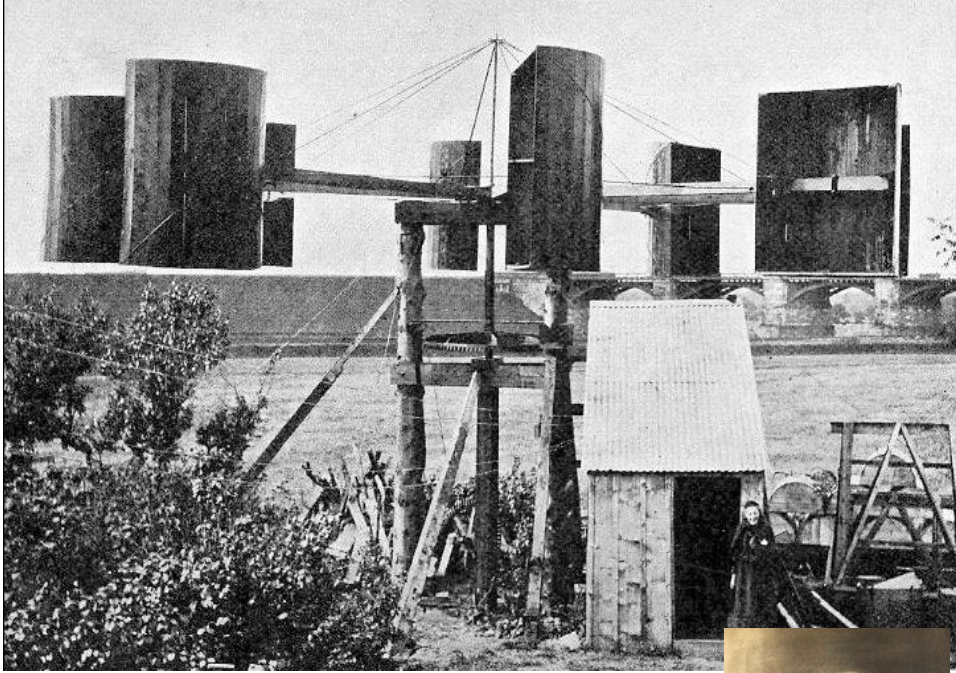


Rüzgar Türbini Teknolojisi

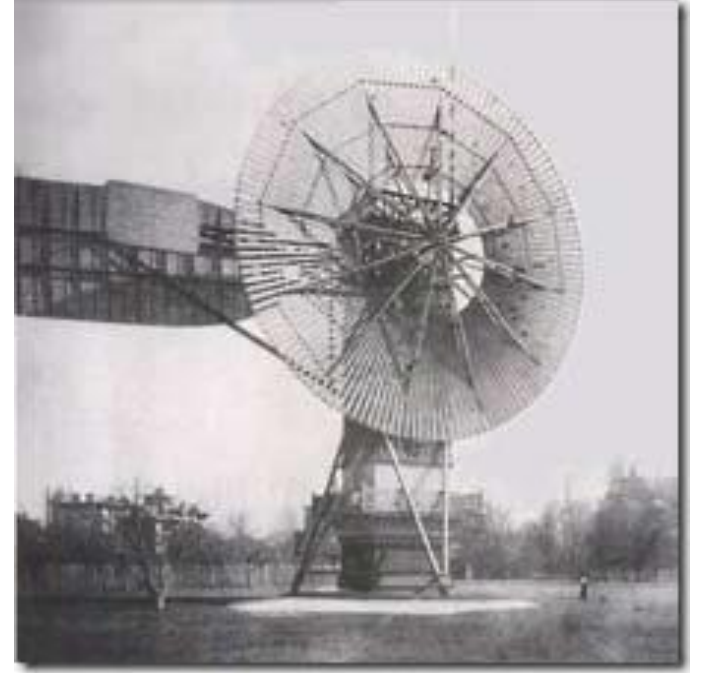
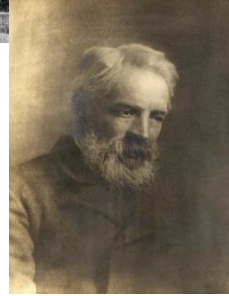
- İlk yazılı referans M.Ö 5. YY.
- İlk güvenilebilir kaynak 10. YY İran
- Elektrik üretim amacı için ilk kullanım 19 YY. İskoçya

Rüzgar Türbini Teknolojisi

Dünyanın Elektrik Üreten İlk Rüzgar Türbinleri



Prof. James Blyth tarafından
Glasgow'daki Royal College'de
kurulan ve 27 yıl işletilen rüzgar
türbini



A.B.D'de kurulan ilk rüzgar türbini

Rüzgar Türbini Teknolojisi

İlk Megawatt Tasarımları – Smith Putnam 1.25 MW (1942)



Rüzgar Türbini Teknolojisi

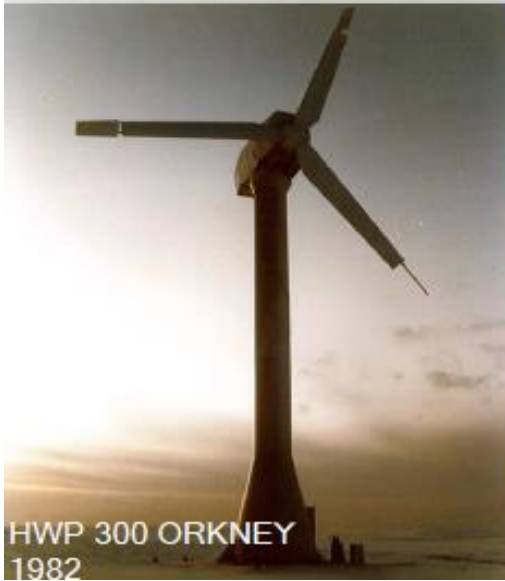
1980'lerde Ticari Rüzgar Teknolojisi



A.B.D'de kurulan dünyanın büyük ölçekli ilk rüzgar türbin çiftliği (Tehachapi, A.B.D)

Rüzgar Türbini Teknolojisi

1980'lerde Kullanılan Ticari Rüzgar Türbinleri



Rüzgar Türbini Teknolojisi

1980'lerden Günümüze Rüzgar Türbinlerindeki Gelişim



Rüzgar Türbini Teknolojisi

Günümüz Rüzgar Türbin Tasarımı

- **HAWT** tipi tasarım bütün temel konularda (enerji, ağırlık, maliyet) VAWT tipi tasarımlara üstünlük sağlamaktadır.
- **3 kanatlı tasarım** sonuçta galip çıkmıştır; 2 ve 3 kanatlı tasarımların teknik ve maliyet sorunları tartışmaları hala sınırdadır olsa da görsel etkiler sonuca götüren sebep olmaktadır.
- **Değişken hızlarda çalışan tasarımlar** az bir farkla enerji çıkarımı konusunda sabit hızla çalışan tasarımlara karşı galip çıkmaktadır.
- **Pitch düzenlemeli** değişken hızlı tasarımlar sabit hızla çalışan tasarımlara karşı daha iyi sonuçlar vermektedir.

Rüzgar Türbini Teknolojisi

Teknolojik Gelişmeleri Engelleyen Kısıtlamalar

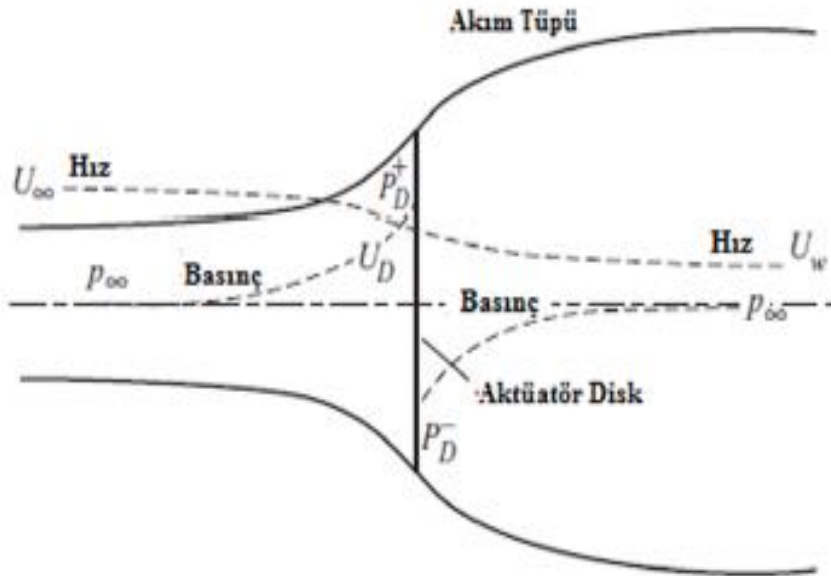
- **Yüksek kanat ucu hızları rüzgar türbini tork, ağırlık ve maliyetini minimize edecektir;** fakat yüksek kanat ucu hız değerleri akustik gürültü emisyonu tarafından sınırlanmaktadır ve yüksek hızlı makineler teknik olarak uygulanır olmakla beraber ticari açıdan başarısızlardır. Bu sistemler offshore sistemler için düşünülebilir.
- **İki ve üç kanatlı tasarımlarda teknik açıdan bir eşitlik vardır denilebilir;** fakat görsel etkiler hesaba katıldığında iki kanatlı tasarımlar rüzgar türbini marketinden neredeyse silinmiştir.
- **Pitch ve stall düzenlemeli rüzgar türbini tasarımlarında ekonomik açıdan bir eşitlik vardır denilebilir;** fakat şebeke taleplerini karşılamak adına değişik hızlarda çalışan pitch kontrolü sistemine sahip tasarımlar bir adım öndedir.

➤ Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi

- **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.
- Bu teorinin temel olarak alınması ile yatay eksenli rüzgâr türbinleri için AeroDyn [5] ve WT_Perf [6] gibi çeşitli rüzgâr türbini ön analiz programları son yıllarda geliştirilmektedir.
- BEM teorisinde **önemli iki adet terim** bulunmaktadır: **eksenel** ve **teğetsel etki faktörü**. Eksenel etki faktörü rotor diskten geçen hava miktarını belirler iken, teğetsel akış faktörü ise rotorun arkasındaki akışta çevrinti miktarını gösterir.

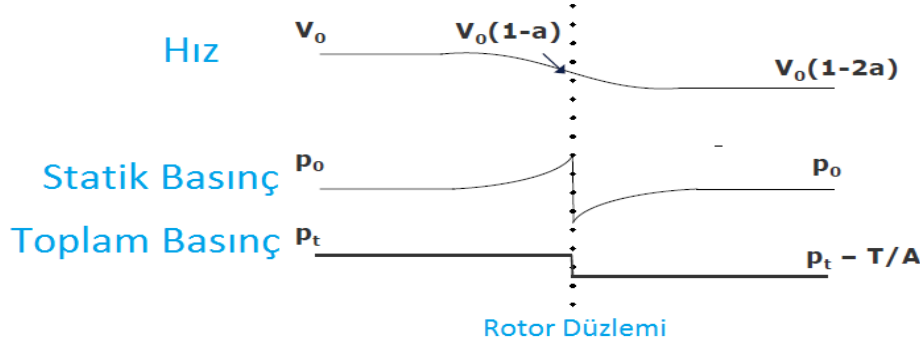
Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi

Akım Tüpü ve Taşıyıcı(Aktüatör) Disk Konsepti



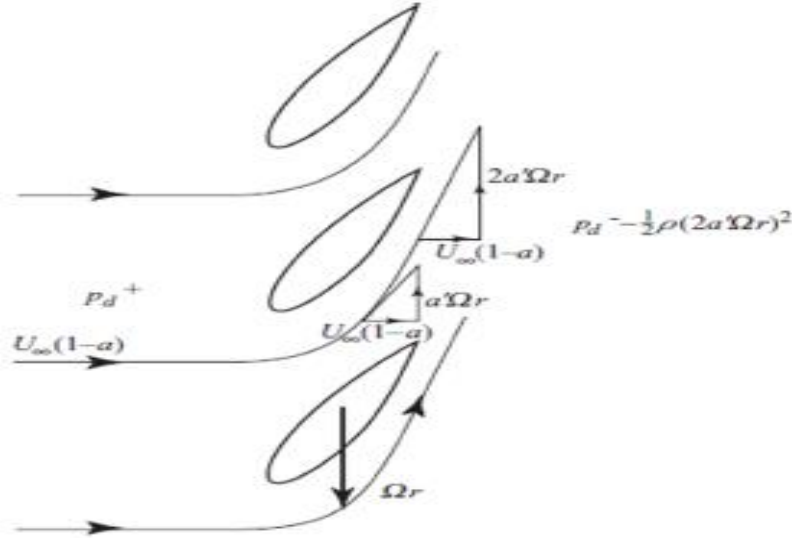
- **Rotorun varlığı sebebiyle havanın yavaşlaması**, hava rotora ulaşmadan gerçekleşmeye başlar ve havanın statik basıncı yükselir.
- **Basıncı farklılıkları** pal elemanları üzerinde kuvvetler oluşturur ve bu kuvvetler şaft milinde tork oluşturur.
- **Bölgesel olarak** bir rotor havanın kinetik enerjisinden değil basınç enerjisinden enerji çıkarımı yapar.
- **Genel olarak**, sistem giriş ve çıkışını kıyaslayacak olursak havanın statik basıncında bir değişim yoktur ve akışın kinetik enerjisinden enerji çıkarımı yapılmış olur.

Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi



Fiziksel Yasa : Enerjinin Korunumu

Bernoulli Denklemi : $p_t = p + \frac{1}{2} \rho V^2$



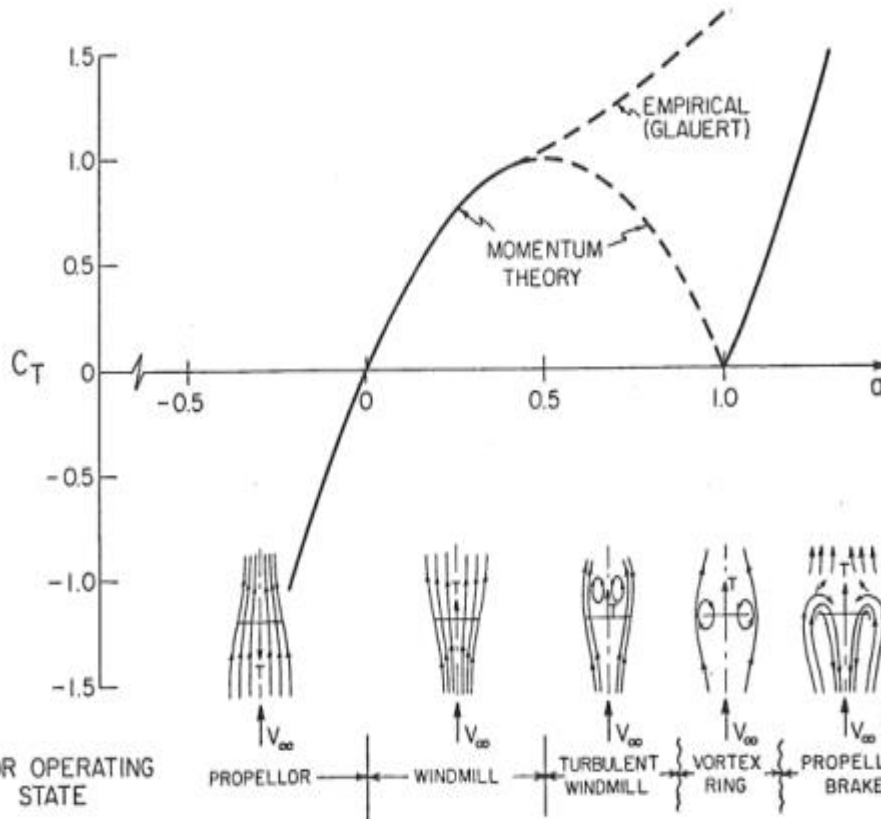
- BEM teorisi bir pal elemanından elde edilen kuvvetin, bu pal elemanının dönmesinden meydana gelen ve sadece tek bir dairesel halkadan geçen akışkanın momentumundaki değişim oranından sorumlu olduğunu varsayar.
- BEM teorisi denklemleri rotor tarafından üretilen itki kuvvetinin aksel momentum değişim 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.

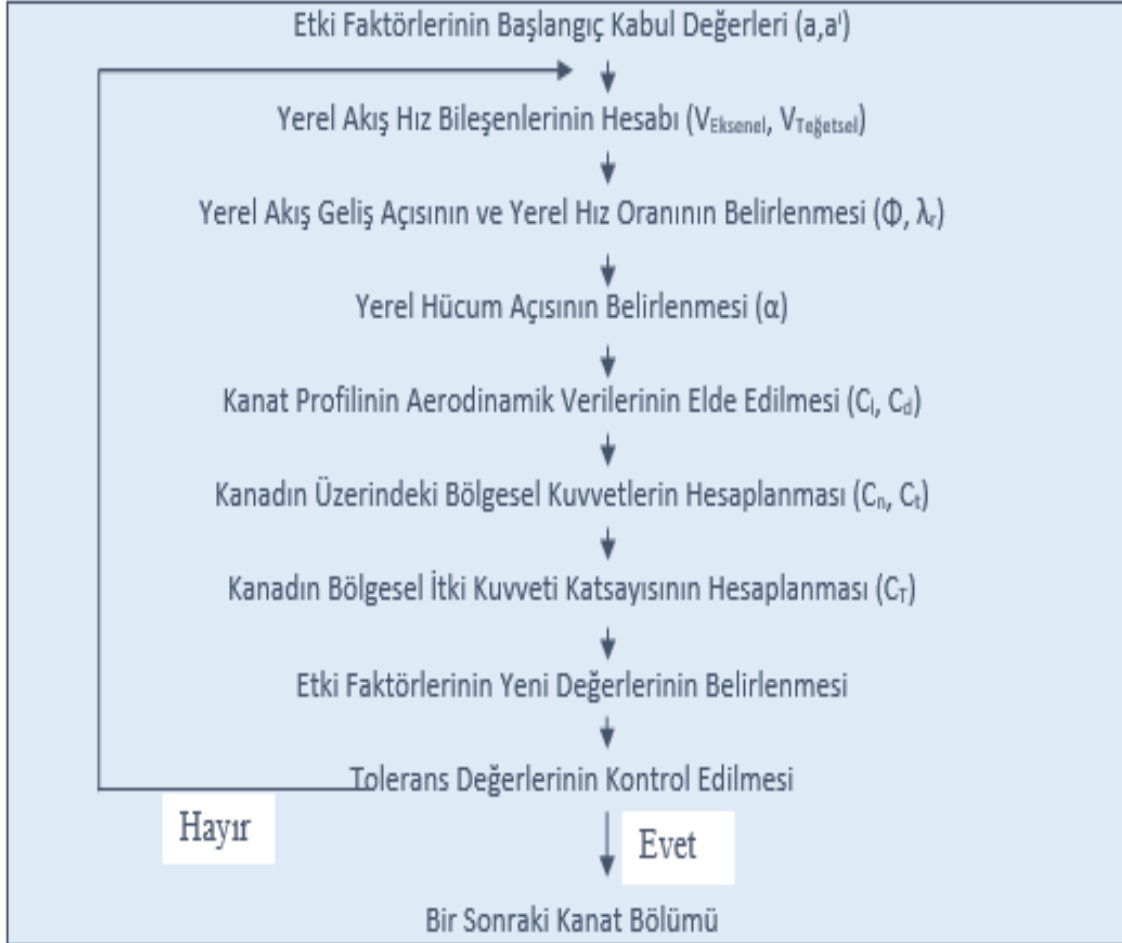
Momentum teorisi, ampirik veriler ile birlikte denklemlerin dengelenmesi için kullanılır.

Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi



- 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.

Pal Elemanı Momentum (BEM) Teorisi

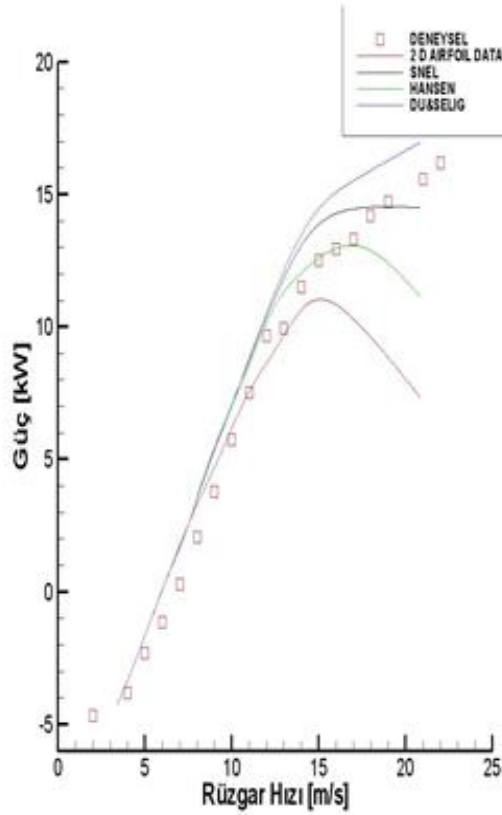


- Bir pal elemanı üzerine etkiyen eksenel ve teğetsel hızların etki faktörlerinin çözümü için bir iterasyon işlemi kullanılır ve bu eleman üzerindeki kuvvetler, kanat kesitinde kullanılan kanat profilinin aerodinamik kaldırma ve sürüklenme verilerine dayanarak hesaplanabilir.
- İterasyon işlemi, itki 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.

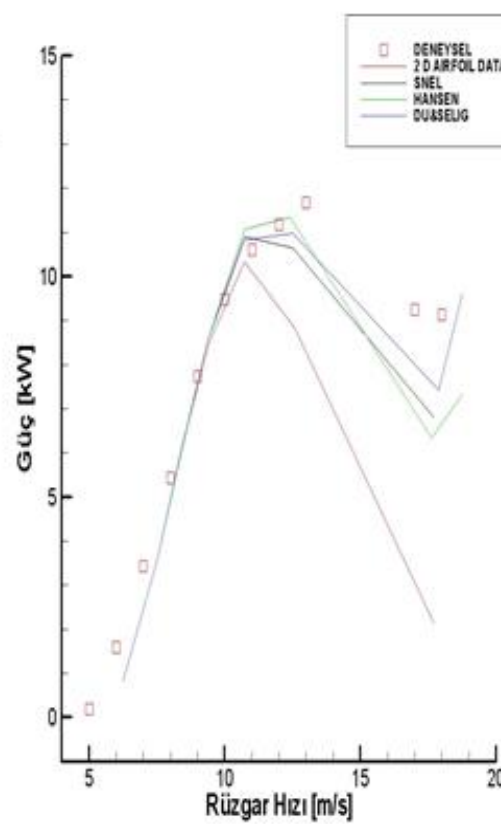
Metodoloji ve Doğrulama

	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

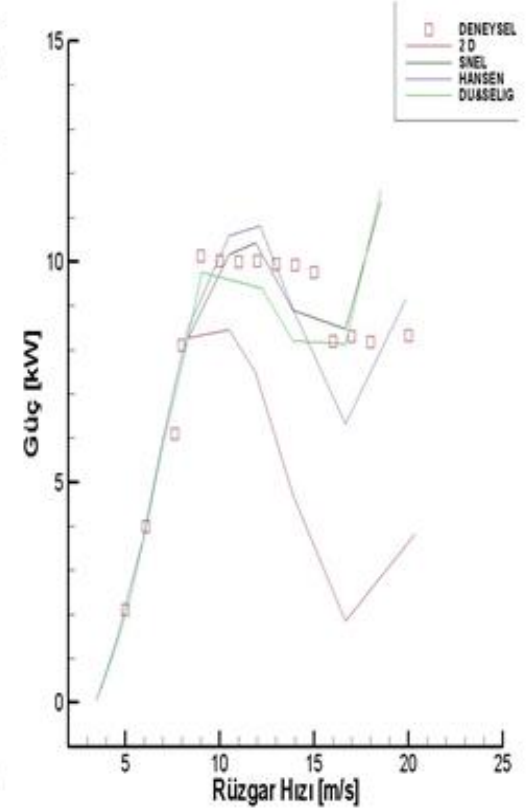
Metodoloji ve Doğrulama



NREL Phase II

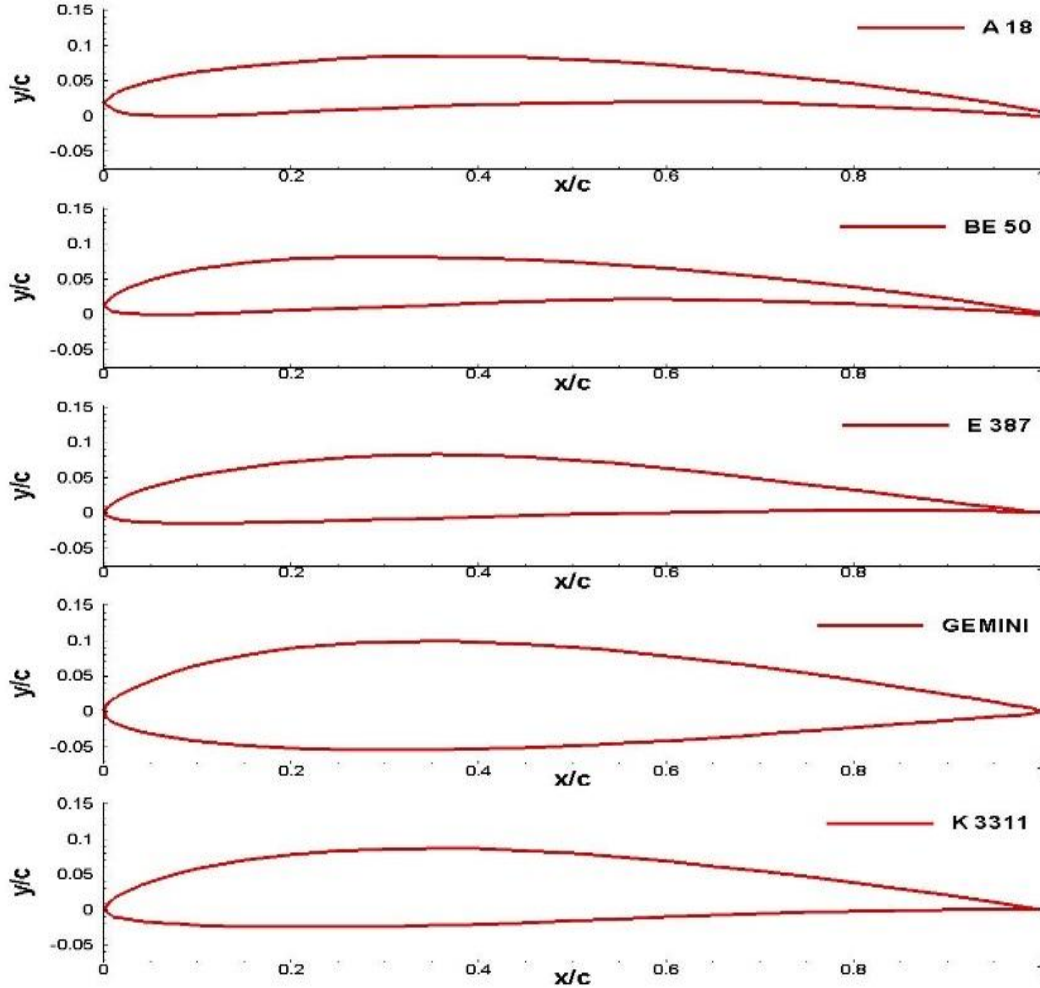


NREL Phase III



NREL Phase VI

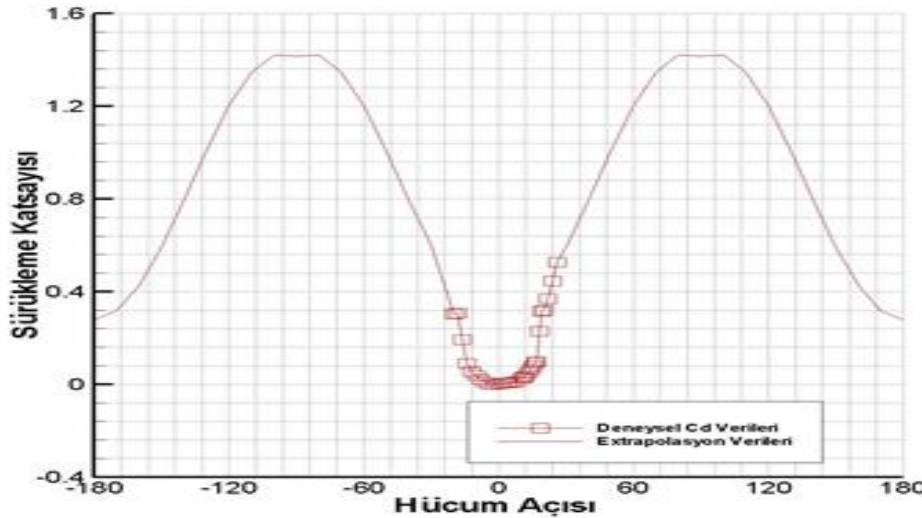
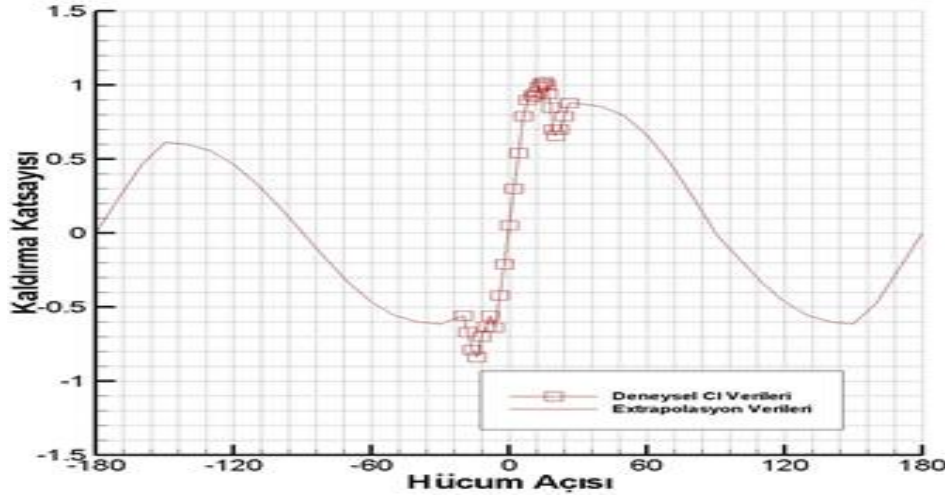
Metodoloji ve Doğrulama



- Pınarbaşı bölgesi için BEM teorisi temelli aerodinamik tasarımını mikro rüzgar 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.

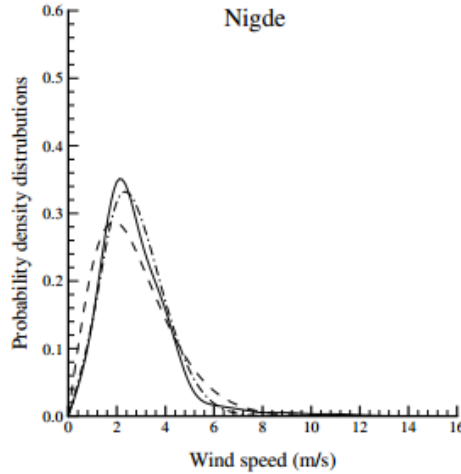
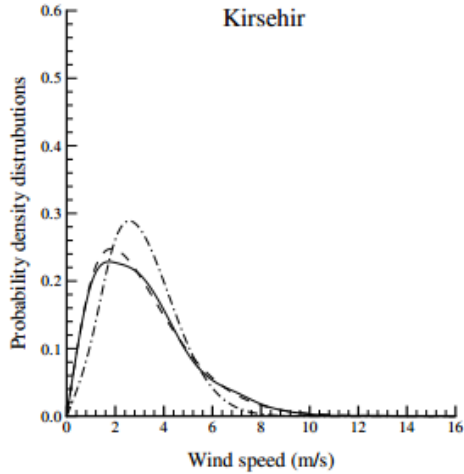
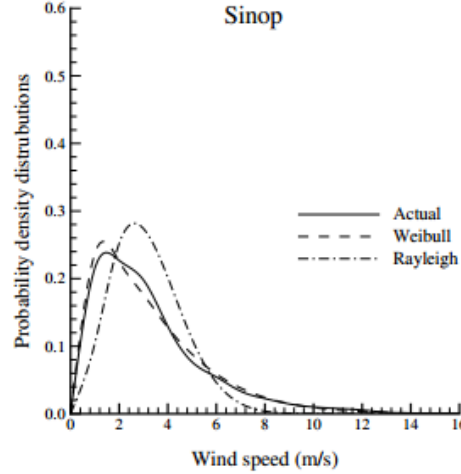
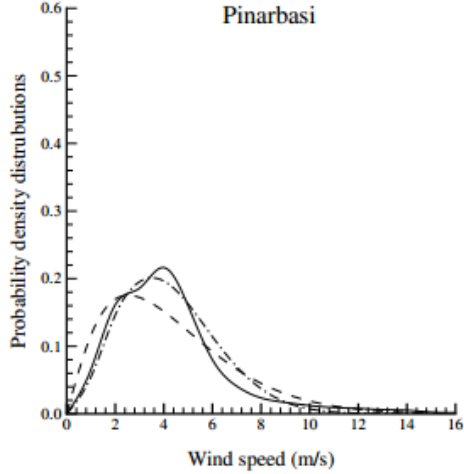
Kanat Profili	Reynolds Sayısı	Hücum Açısı
A 18	40400-303000	$-2^\circ < \alpha < 11^\circ$
BE 50	60300-302700	$-4^\circ < \alpha < 11^\circ$
E 387	101000-303000	$-5^\circ < \alpha < 10^\circ$
GEMINI	101600-304100	$-7^\circ < \alpha < 12^\circ$
K 3311	61100-302900	$-5^\circ < \alpha < 11^\circ$

Metodoloji ve Doğrulama



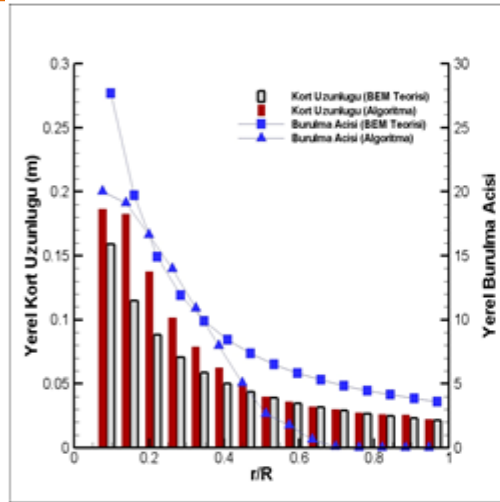
- BEM analizinde kullanılacak olan kanat aerodinamik katsayı verilerinin -180 dereceden +180 dereceye kadar extrapolasyonunun yapılması gerekmektedir.
- Bu amaçla NREL tarafından geliştirilen ve bir ön işleme aracı olan AirfoilPrep yazılımı kullanılmaktadır [6,17].
- Bu yazılım NREL'in aerodinamik analiz için geliştirdiği WT Perf ve AeroDyn gibi yazılımlarda kanat verilerinin extrapolasyonunda kullanılmaktadır.
- Şekilde 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.

Metodoloji ve Doğrulama

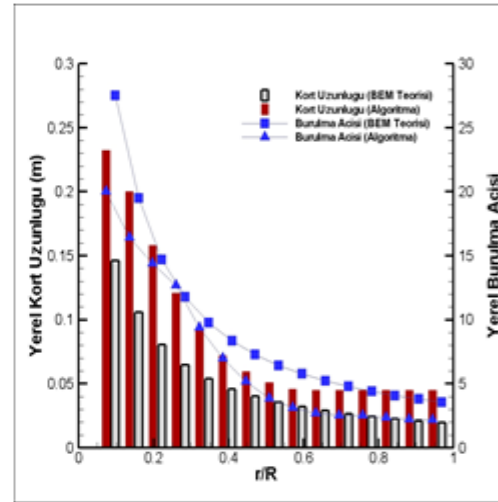


- Genç ve Gökçek [14] daha önceki çalışmalarında, enerji maliyet analizini gerçekleştirmek amacı ile çeşitli bölgelerde rüzgâr potansiyeli belirleme çalışmaları yapmışlardır.
- Yıllık ortalama rüzgâr hızı 10 metre yükseklikte en yüksek 3.67 m/s, en yüksek Weibull skala parametresi 4.09 m/s ile Pınarbaşı bölgesinde olduğunu söylemişlerdir.
- Genç [15] çalışmasında Pınarbaşı'nın sadece yıllık ortalama hızı açısından değil rüzgâr hızı frekans dağılımı açısından da diğer bölgelere kıyasla daha iyi olduğunu söylemiştir.
- Pınarbaşı için hazırladıkları rüzgâr olasılık yoğunluk grafiklerinde, Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonundan elde edilen verilerin gerçek verilere yakın olduğunu göstermişlerdir. Bu yüzden bu çalışmada gerçekleştirilen yıllık enerji üretim hesaplamalarında olasılık yoğunluk fonksiyonu hesaplamalarında Rayleigh olasılık yoğunluk fonksiyonu kullanılmıştır.

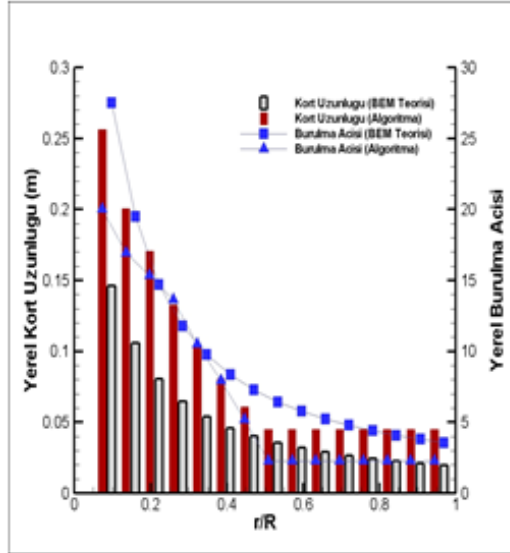
Tasarım ve Değerlendirme



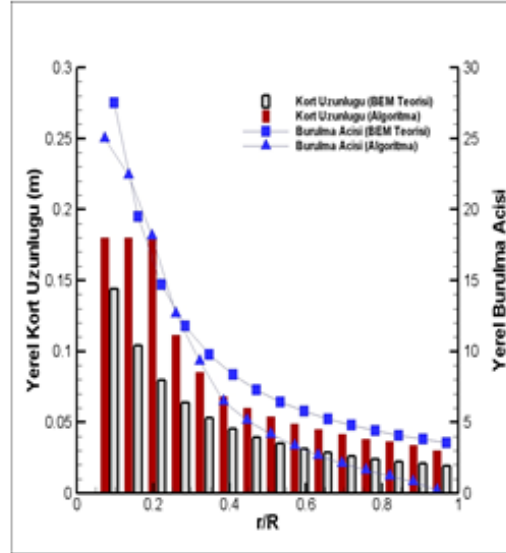
(a) A18 Kanat Profili



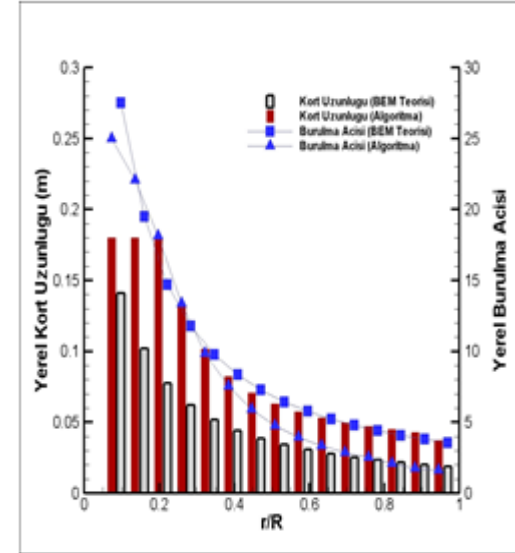
(b) BE 50 Kanat Profili



(c) E 387 Kanat Profili

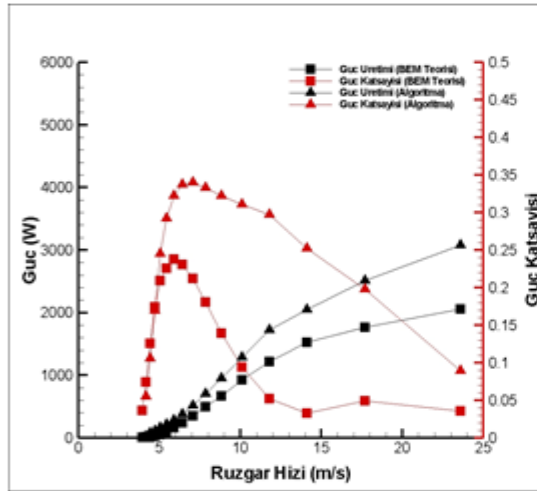


(d) GEMINI Kanat Profili

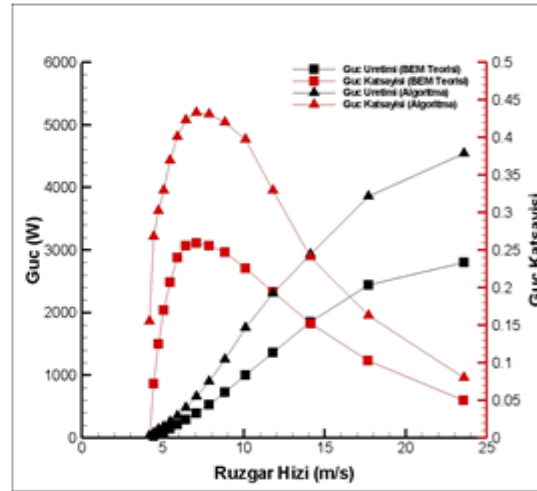


(e) K3311 Kanat Profili

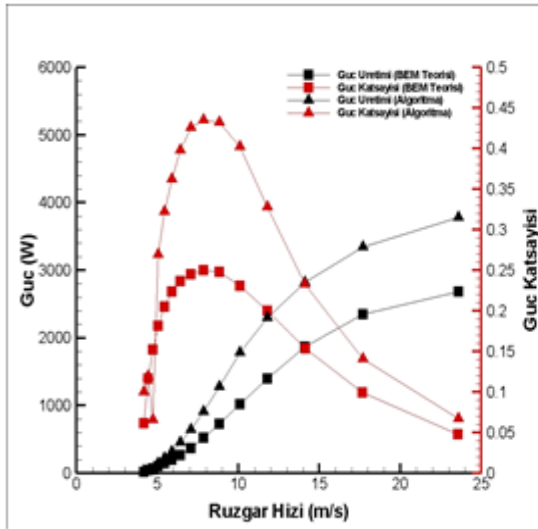
Tasarım ve Değerlendirme



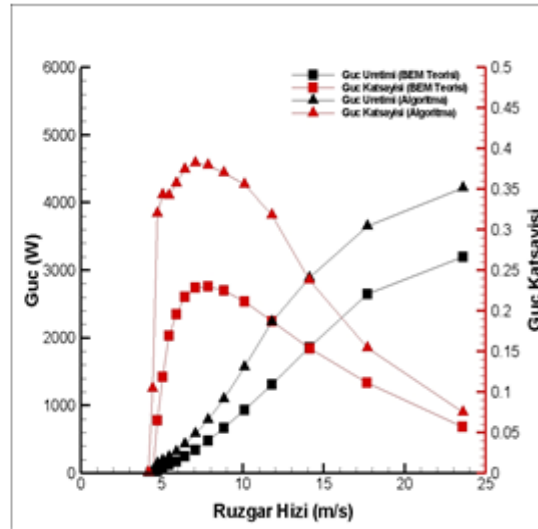
(a) A18 Kanat Profili



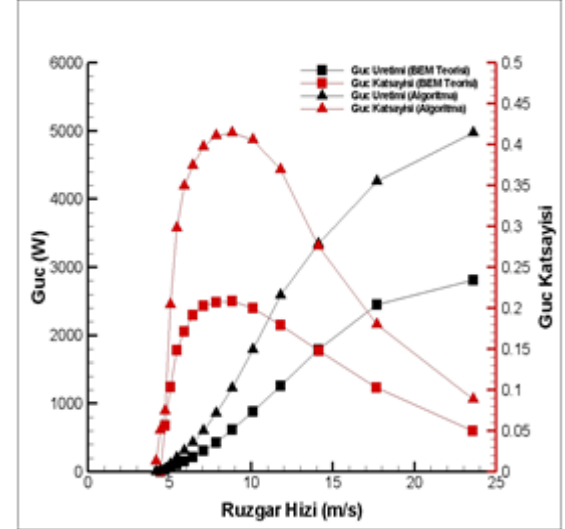
(b) BE 50 Kanat Profili



(c) E 387 Kanat Profili

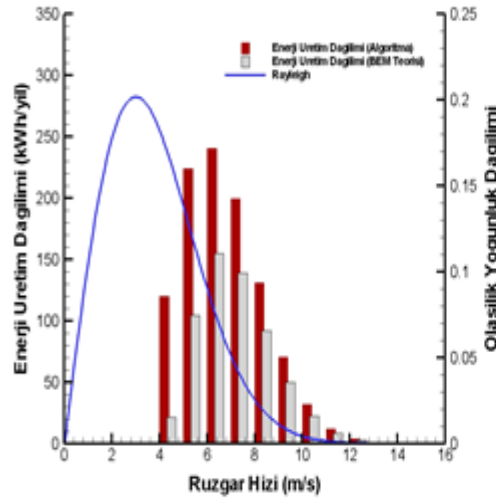


(d) GEMINI Kanat Profili

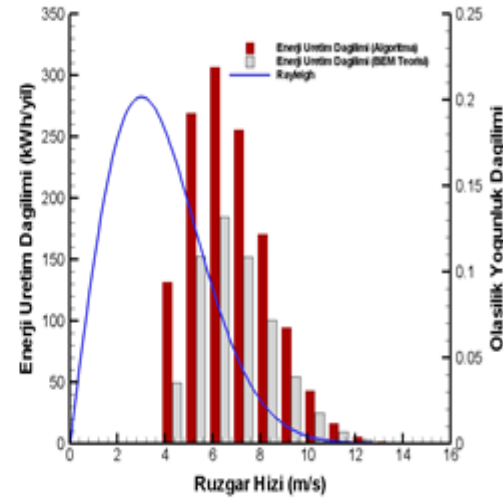


(e) K3311 Kanat Profili

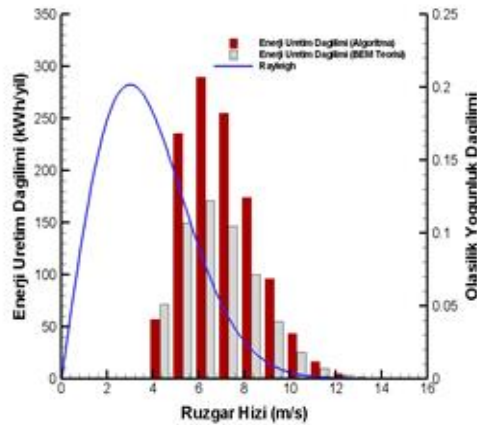
Tasarım ve Değerlendirme



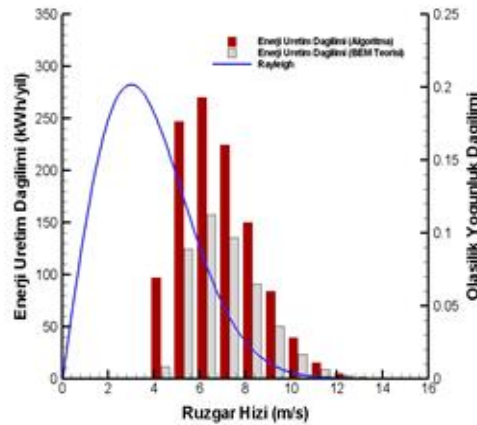
(a) A18 Kanat Profili



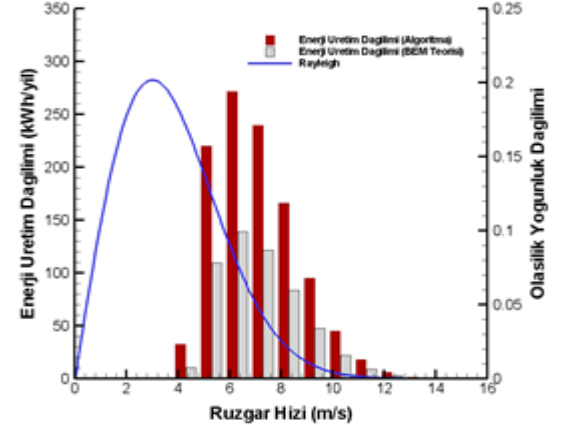
(b) BE 50 Kanat Profili



(c) E 387 Kanat Profili

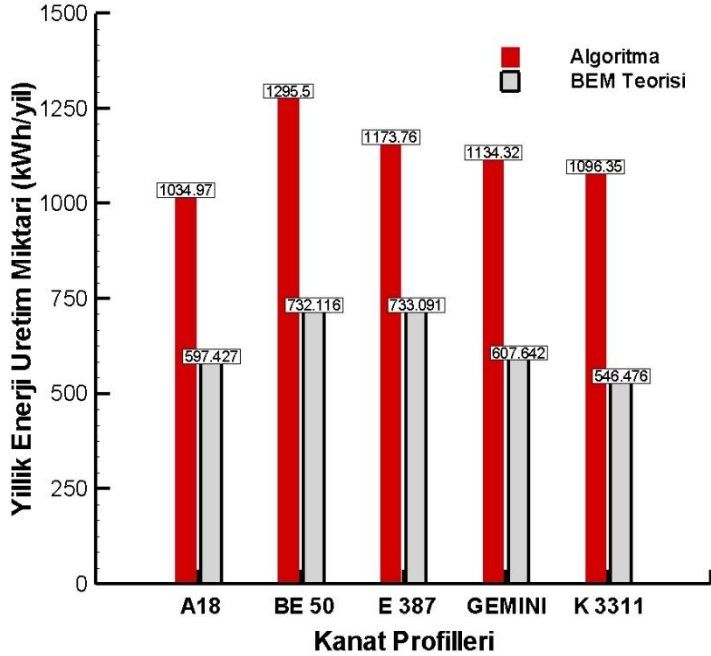


(d) GEMINI Kanat Profili



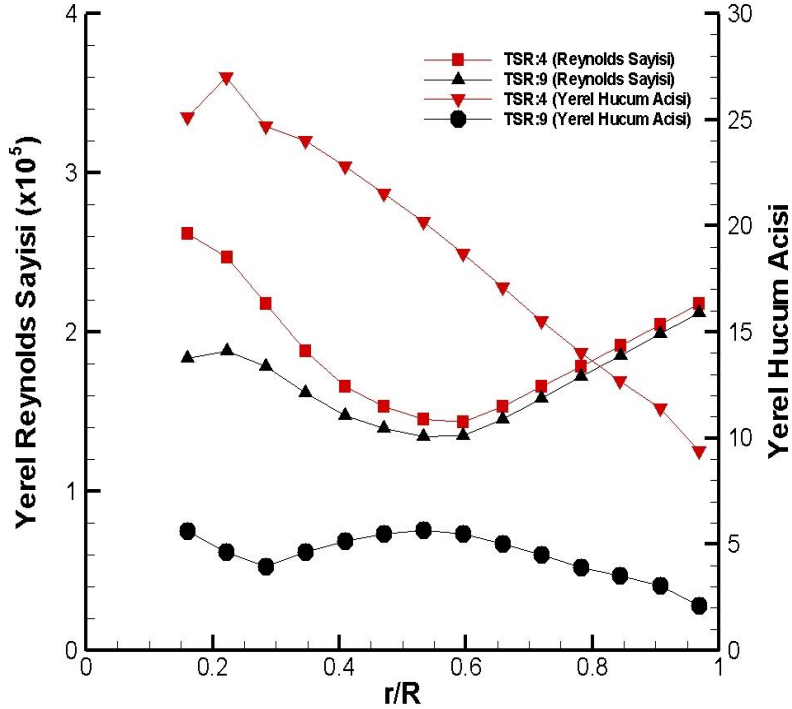
(e) K3311 Kanat Profili

Tasarım ve Değerlendirme



- 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 gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir.
- 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. 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 da söylenebilir.

Tasarım ve Değerlendirme



- Şekilde 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.
- Rüzgâr 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 düşük Reynolds sayılarında 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.

Sonuç ve Tartışma

- Çalışmamızda rüzgâr türbinlerinin aerodinamik tasarımında geniş ölçüde kullanılan Pal Elemanı-Momentum(BEM) Teorisinin kısaca bir açıklamasını gerçekleştirdik ve bu teoriyi temel alarak hazırladığımız BEM kodunun doğruluğunu inceledik.
- 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 rüzgar 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.
- 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.

Sonuç ve Tartışma

Dinlediğiniz için teşekkür ederim.