



## **Eşli Çalışan Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Yarı Karmaşık Bir Sahadaki Yıllık Enerji Üretimini Değerlendirilmesi**

### **Estimation of Annual Energy Production of Coupled Vertical-Axis Wind Turbines in a Semi-Complex Terrain**

**Ferhat Cem Başer<sup>1</sup>, Ziya Haktan Karadeniz<sup>2\*</sup>, İskender Kökey<sup>3</sup>, Alpaslan Turgut<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup> İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji ABD, İzmir, TÜRKİYE

<sup>4</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [zhaktan.karadeniz@ikcu.edu.tr](mailto:zhaktan.karadeniz@ikcu.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 20.05.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 25.07.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2020226420

*Atıf şekli/How to cite* BAŞER, F.C., KARADENİZ, Z.H., KÖKEY, İ., TURGUT, A. (2020). Eşli Çalışan Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinlerinin Yarı Karmaşık Bir Sahadaki Yıllık Enerji Üretimini Değerlendirilmesi. DEUFMD 22(64),199-208.

#### **Öz**

Bir alana rüzgâr türbinleri yerleştirmek için bir rüzgâr kaynağı değerlendirmesi (RKD) yapılması gerekmektedir. Bu değerlendirme, rüzgâr tarlasının yerleştirilmesi, boyutlandırılması ve tasarım detaylandırması için önemli girdiler sağlar. Sahanın doğru tespitine ek olarak, rüzgâr türbinlerini en verimli şekilde yerleştirmek de önemlidir. Bu konuda geliştirilen bir yazılıma gerekli veriler sağlandığında, yıllık enerji üretimi (YEÜ) hesaplamaları gerçekçi bir şekilde yapılabilmektedir. Fakat bu programlar yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT) için tasarlanmıştır. Bu yazılım paketlerini kullanarak düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) üzerinde yapılmış bir çalışma bulunmamasına rağmen, sadece türbin güç eğrisi tanımlanarak YEÜ hesaplanması mümkündür. Eşli çalışan türbinlerde ise türbinlerin arkalarında bıraktıkları rüzgâr gölgeleri performansı etkilediğinden, türbinlerin toplam yıllık enerji üretimi rüzgâr geliş yönünün bir fonksiyonudur. Bu nedenle türbinlerin yıllık enerji üretimi yıl boyunca rüzgâr geliş yönünün değişimi göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Bu çalışmada, öncelikle ayrı çalıştırılan iki DERT'in saha performansı incelenmiştir. Ayrıca etkileşim halinde eşli çalışan DERT'lerin bir rüzgâr tarlasına yerleştirilmesi ve YEÜ hesaplanabilmesi için bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem kullanılarak yapılan analizlerde eşli çalışan türbinlerin, ayrı çalıştırılanlara göre YEÜ bakımından %2'den %11'e kadar performans artışı gösterebileceği bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** WAsP, düşey eksenli rüzgâr türbini, eşli çalışan DERT, rüzgâr kaynak değerlendirmesi

#### **Abstract**

In order to site wind turbines in a field, it is necessary to do a wind resource assessment (WRA). This assessment provide important inputs for the placement, sizing and design detailing of the wind farm. In addition to the correct determination of the site, it is also critical to place the wind turbines in the

most efficient way. When the necessary data are provided to a software developed for this subject, the annual energy production (AEP) calculations can be made realistically. However, these programs are designed for horizontal-axis wind turbines (HAWTs). Although there is no study conducted on vertical-axis wind turbines (VAWTs) using these software packages, it is possible to calculate the AEP by simply defining a turbine power curve. In the case of coupled turbines, wake effect created by the turbines affect the performance of the wind turbines, thus the total annual energy production of the turbines is a function of the wind direction. For this reason, annual energy production of the turbines should be calculated by taking into consideration the change of wind direction during the year. In this study, firstly, the field performance of two VAWTs, which are separated, were investigated. In addition, a method has been proposed in order to place the coupled VAWTs in a wind farm and calculate their AEP. It was found that the turbines operating in this method could show performance increase from 2% to 11% compared to separated ones.

**Keywords:** WASP, vertical axis wind turbine, coupled VAWT, wind resource assessment

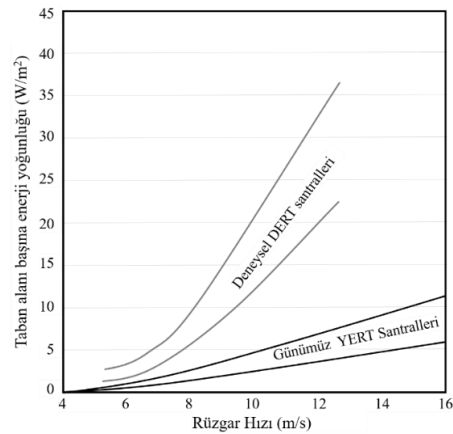
## 1. Giriş

Dünyanın gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı ile tükenmeye başlayan yeraltı kaynakları ve atmosferdeki karbon emisyonunun artışı ile geri dönülemez bir yola giden küresel ısınma sorunu insanlığı sürdürülebilir enerji kaynaklarına yöneltmeye başlamıştır. Bu sürdürülebilir enerji kaynaklarında rüzgâr enerjisi, teknolojinin ilerlemesiyle daha da güvenilir ve gelecek vaadeden hale gelmektedir. Rüzgârdaki mevcut enerji, rüzgâr hızının küpü ile orantılıdır ve bu sayede rüzgâr hızındaki küçük artmalar enerji üretiminde yüksek artışlar sağlamaktadır. Rüzgâr enerjisinin yenilenemeyen enerji kaynakları karşısında birçok sayıda yararı bulunmaktadır. Hava, su kirliliği ve çevreye zararlı atıklar oluşturmaz ayrıca doğada bulunan fosil yakıtlar gibi yeraltı kaynaklarını tüketmez. Bu yönleriyle, rüzgâr enerjisinin, yakın gelecekte enerji üretiminde tüm dünyada büyük bir paya sahip olacağı öngörülmektedir.

Çoğu rüzgâr türbini tarlası devasa yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden (YERT) oluşmaktadır. Bunun nedeni ise yüksek mekanik güç katsayılarına sahip olmalarıdır. Fakat YERT'ler birbirlerine yakın konumlara yerleştirildiklerinde, oluşturdukları art izi (wake), birbirlerinin güç katsayılarına olumsuz etki etmektedir. Bu nedenle mevcut arazi kaynağı sınırlanmaktadır.

Tek başına çalışan bir dikey eksenli rüzgâr türbininin (DERT) güç katsayısı bir YERT'e göre çok daha düşüktür. Günümüz dünyasının yüksek enerji ihtiyaçları göz önünde bulundurulduğunda, yüksek verimle büyük miktarlarda elektrik üretimi öncelikli olduğundan DERT'ler hakkında yapılan çalışma

sayısı YERT'lerle ilgili çalışma sayısına kıyasla çok azdır. Yapılan son araştırmalarda, iddia edildiği gibi taban alanı başına enerji yoğunluğu kavramı ile eşli ve gruplar halinde çalışan DERT verimlerinin artması olguları birleştirildiğinde rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yaklaşımlarında bir değişim yaşanması söz konusudur. Eşli çalışan dikey eksenli rüzgâr türbini dizilimleriyle rüzgâr tarlalarının güç yoğunluğunun artmasını konu alan öncü bir çalışmada [1], bu türbin dizilimlerinin günümüz YERT sahalarına göre 6-9 kat daha iyi performans gösterdiği gerçek rüzgâr koşulları altında deneysel olarak ortaya konmuştur (Şekil 1). Birbirine yakın yerleştirilmiş rüzgâr türbinlerinden biri tarafından yakalanamayan enerjinin yakınındaki diğer türbin tarafından yakalanması nedeniyle santral sahası daha verimli kullanılabilir [2].



**Şekil 1.** Taban alanı başına enerji yoğunluğunun ortalama serbest rüzgâr hızına bağlı değişimi [2]

Literatürde, eşli çalışan DERT'leri konu alan ilk ciddi bilimsel çalışma 2010 yılında yayınlanmıştır [3]. Taban alanı başına enerji yoğunluğu üzerinden yapılan karşılaştırmada, YERT santrallerine kıyasla önemli ölçüde artış sağlandığı açıklanmıştır. Ardından 2011 yılında Dabiri tarafından yapılan çalışmada [1], eşli çalışan ve eşlerin birbirlerine zıt yönde döndükleri Darrieus tipi DERT'ler kullanılarak kurulan deneysel santralde, gerçek rüzgar koşulları altında ölçümler yapılmıştır. Birçok farklı dizilimin denendiği bu çalışmada, önerilen santral ile günümüz YERT santrallerine göre, taban alanı başına enerji yoğunluğunun önemli ölçüde artırılabilirdiği görülmüştür. Kinzel ve ark., [4], 9 adet zıt yönlere dönen DERT çifti kullanan bir santral sahasındaki türbinler arasındaki enerji etkileşimini araştırmışlardır. Türbin art alanındaki rüzgar hızının serbest rüzgar hızının %95'i seviyesine ulaşabilmesi için gereken mesafenin 6 türbin çapı olduğu belirtilmiştir. Bu değer, modern YERT'ler için gereken mesafenin yarısı kadardır. Ancak, yapılan noktasal ve eş zamanlı olmayan ölçümler, ayrıntılı analizler yapılabilmesi için gerekli çözünürlükte ve yeterlilikte değildir. Bu nedenle türbinler arası enerji aktarım mekanizmalarının belirlenmesinden çok genel bir değerlendirme yapılabilmiştir.

Literatürdeki güncel durumdan anlaşıldığı gibi DERT'ler hakkında yapılan çalışmaların sayısı hızla artmaktadır. Yeni teknoloji ürünü deneysel ve sayısal yöntemlerin kullanımı ile farklı türbinlerin tekil kullanımdaki başarımları [5-7] ve birbirleriyle etkileşim halindeyken başarımları güncel çalışma alanlarıdır.

Rüzgâr türbini tarlalarının ve hatta tek bir rüzgâr türbininin bile kurulması için, öncelikle kurulacak arazinin karakteristiklerinin, rüzgâr yön ve hızlarının bilinmesi gerekmektedir. "Ne kadar enerji?" veya "ne kadar kapasite?" sorularını cevaplayabilmek için yapılacak olan rüzgâr kaynak değerlendirmesi (RKD) (wind resource assessment) büyük önem taşımaktadır. Rüzgâr kaynak değerlendirmesi, bir veya birkaç alan üzerinde rüzgâr kaynağı veya rüzgâr güç potansiyelini yaklaşık olarak hesaplama işlemidir. Bu değerlendirme çeşitli bilgisayar yazılımları ile düşük hata oranlarıyla yaklaşık olarak yapılabilir. Sahanın doğru belirlenmesinin yanında rüzgâr türbinlerini sahaya en verimli şekilde yerleştirilmesi de kritik öneme sahiptir. Böylece sahadaki

potansiyelin, kullanılan türbinlerle ne kadarının elektrik enerjisine çevrilebileceği belirlenebilmektedir. Bu konu için geliştirilmiş yazılımlara (WASP, WindPRO, WindSim vb.) gerekli veriler sağlandığında hesaplamalar gerçekçi şekilde yapılabilirler. Büyük bir oranla sadece YERT'ler için tasarlanmış bu yazılımlarla düşey eksenli rüzgâr türbinlerine (DERT) yönelik çalışma yapmak ancak bazı değişikliklerle mümkün olabilmektedir. Literatürde bu konuyu ele alan bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışma YERT'ler için kullanılan yazılımlarda, birbiriyle etkileşim halinde çalışan bir çift DERT'in yıllık enerji üretiminin belirlenmesi için bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntem, literatürde daha önceden denenmemiştir ve çalışma sonucunun eşli çalışan DERT'lere yönelik analizlerin yaygınlaşmasına öncülük edeceği öngörülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Uygulama sahasının karakteristikleri

Kullanılan saha İzmir'in kuzeyinde, Aliağa ilçesinde bulunmaktadır. Saha kuzey yönünden denize tamamen açık, küçük tepelere ve kısa bitki örtüsüne sahiptir (Şekil 2). Çok eğimli olmamakla birlikte neredeyse %0'lık engebellik (ruggedness) indeksine sahiptir. 70m rakımda bulunan saha, kuzey doğu tarafından gelen hakim rüzgâr yönüne sahiptir (Şekil 3).

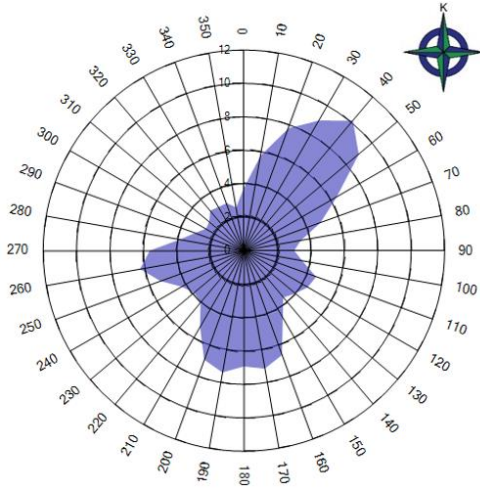
Türbinlerin konumlandırıldığı sahanın az eğimli ve küçük tepelere sahip olması ayrıca kıyı şeridinde bulunması sahayı yarı karmaşık olarak tanımlanan sınıfa sokmaktadır (Şekil 2).



**Şekil 2.** Sahanın kuş bakışı görüntüsü (38.862526 Enlemi, 27.047738 Boylamı)

Sahanın rüzgâr karakteristiklerini belirlemek için, 26 Haziran 2012 ve 1 Kasım 2013 tarihleri

arasında kaydedilen yaklaşık 15 aylık rüzgâr yön ve hız verileri, 10 dakikalık ortalamalarla, türbin konumu ile aynı noktada bulunan 60m'lik ölçüm direğinden alınmıştır. Direk üzerinden 30, 58 ve 60m yüksekliklerden ölçüm yapılmıştır. Rüzgâr verileri ölçülürken, kullanılacak türbinin göbük yükseliğine (hub-height) en yakın yerden alınması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda 10m yüksekliğe en yakın yükseklik olan 30m'deki verilerin kullanılması sonuç açısından büyük farklara yol açmayacağı öngörülmüş ve kullanılacak yazılımın da bu değerleri belirli istatistiksel metodlar ile 10m yüksekliğe taşıyabileceği bilindiğinden bu verilerin kullanılması uygun görülmüştür.



**Şekil 3.** Sahanın rüzgâr yön dağılımını gösteren rüzgâr frekans gülü

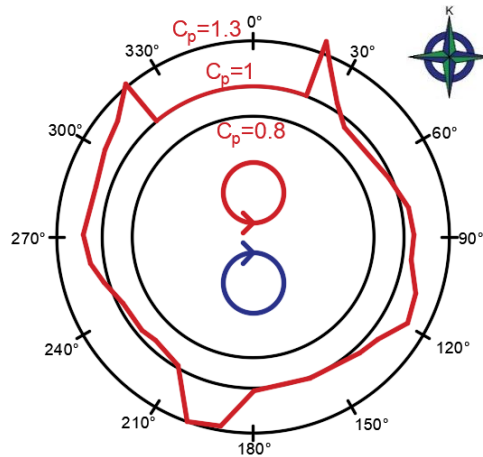
## 2.2. Temel veriler

Günümüzde, YEÜ hesaplamalarında kullanılan yazılımlar (örneğin WAsP ve WindPRO) YERT'lere yönelik tasarlanmıştır. Fakat belirli parametreler göz önüne alındığında DERT'lerin de bu yazılımlarla incelenebileceği görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan yazılım olan WAsP, art izi analizlerini YERT'lere özgün şekilde yapmaktadır. İtme katsayısı olarak adlandırılan parametre sayesinde art izi analizleri gerçeğe yakın şekilde yapılabilmektedir. Ancak, art izi analizi yalnızca birden fazla türbin sahaya konumlandırılacaksa önem taşımaktadır. Çünkü bu analiz sahadaki türbinlerin birbirleri ile olabilecek aerodinamik etkileşimlerini hesaplamada kullanılmaktadır. Bu çalışma sadece bir çift DERT için yapılmıştır.

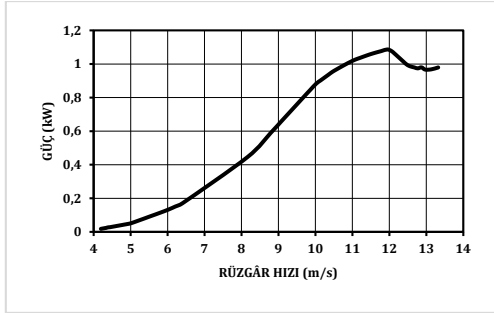
Bunların birbiriyle etkileşimi bilindiğinden bu DERT çifti tek bir türbin gibi tanımlanabilmektedir. Böylece WAsP'ın türbin etkileşimi ile ilgili hesaplamaları sonucu etkilememektedir.

Eşli çalışan türbinlerde türbinlerin arkalarında bıraktıkları rüzgâr gölgeleri performansı etkilediğinden, türbinlerin YEÜ değeri rüzgâr geliş yönünün bir fonksiyonudur. Bu nedenle türbinlerin YEÜ değeri yıl boyunca rüzgâr geliş yönünün değişimi göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Bu hesaplamada kullanılacak literatürde önerilen veya ticari olarak satılan herhangi bir araç bulunmamaktadır. Ancak eşli çalışan DERT çiftinin toplam güç katsayısının (iki türbinin eşdeğer güç katsayısı) rüzgârın geliş yönüne göre değişimini inceleyen deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır [1,3-8]. Böyle bir çalışmadan [1] alınan polar diyagram (Şekil 4), bu çalışmada eşli çalışan DERT performansı için ana veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Seçilen veri 10° çözünürlüğe sahiptir.

Çalışmada kullanılan türbin şu anda ticari olarak piyasada da bulunan, 1,2m rotor çapına ve 10m yüksekliğe sahip Mariah Windspire 1,2-kW adlı türbinin modifiye edilmiş halidir. Bu türbinin karakteristik güç verileri (Şekil 5) NREL'in (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı) uluslararası standartlara (IEC 61400-12-1) uygun olarak yapılan saha testlerinin teknik raporundan [9] ve Dabiri [1] tarafından sunulan saha incelemesinden alınmıştır.



**Şekil 4.** Gelen rüzgâr yönüne karşı (açısal koordinat) normalize edilmiş güç katsayısının (radyal koordinat) değişimi (Kırmızı ve mavi daireler türbinleri göstermektedir.) [1]



Şekil 5. Mariah Windspire 1.2-kW DERT güç eğrisi [9]

### 2.3. Veri analizi

Güç katsayısının rüzgâr yönüne bağlı olmadığı durumda, tek bir ortalama güç eğrisi ile hesaplamalar yapılabilir. Eşli çalışan türbinlerde türbinlerin güç katsayısı rüzgâr geliş yönünün de bir fonksiyonudur. Ancak kullanılan programda (WASP) türbin güç eğrisinde böyle bir tanımlama mümkün değildir. Bu nedenle rüzgâr yönüne bağlı türbin güç katsayısı (Şekil 4) açısal koordinatlarda ayrıklaştırılmalıdır. Bu veri kullanılarak oluşturulan güç eğrileri ile her bir sektör için hesaplamalar yapılabilir.

Verilerin analizi yapılırken, türbinlerin, rüzgârın geliş yönüne bağlı davranışlarını inceleyebilmek için, Şekil 4'teki diyagram sektörlerle ayrılır. Sektör sayısı  $n$  olmak üzere açısal aralıklar;

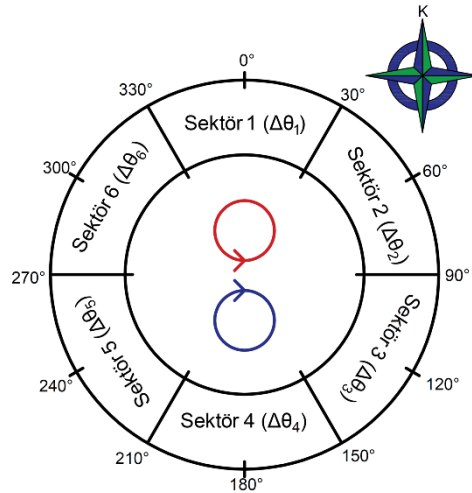
$$\Delta\theta = \frac{360}{n} \quad (1)$$

şeklinde belirlenir. Sektör sayısı ve açısal aralık değerleri belirlendikten sonra, sektörlerin türbinlerin çevresindeki konumlarının belirlenmesi gerekir. Şekil 6'da kuzey yönü referans alındığında, sektörlerin türbin çiftinin çevresindeki konumları gösterilmiştir.

Her bir  $\Delta\theta_i$  sektörü için ortalama  $C_p$ -normalize değeri ( $\overline{C_{p,i}}$ ), sektöre ait  $C_p$ -normalize veri sayısı  $m$  olmak üzere;

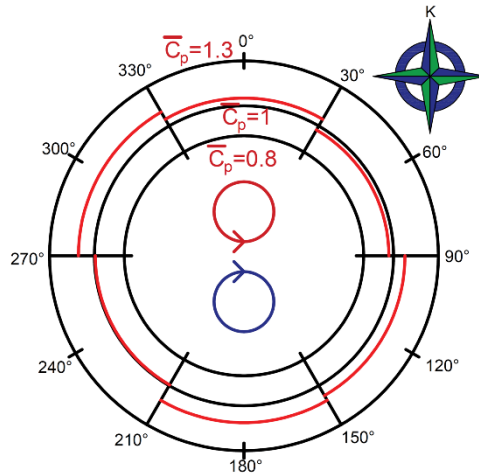
$$\overline{C_{p,i}} = \frac{\sum_{j=1}^m C_{p-normalize,j}}{m} \quad (2)$$

denklemlerle elde edilir ve tüm hesaplamalarda her  $\Delta\theta_i$  sektörü için  $\overline{C_{p,i}}$  değeri sabit kabul edilir.



Şekil 6. Sektörlerin grafiksel gösterimi

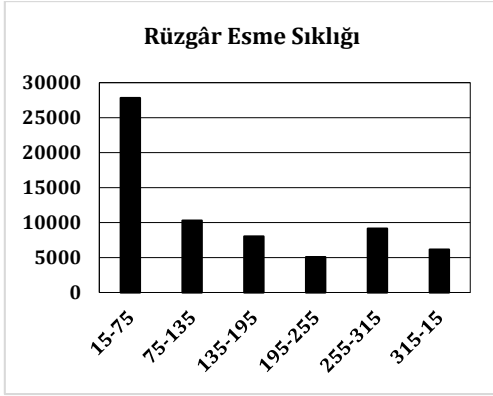
Sektör sayısının ( $n$ ) artırılmasıyla  $\Delta\theta$  küçültülerek açısal çözünürlük artırılıp analizlerin doğruluğu artırılabilir. Bu çalışmada kaynak olarak kullanılan veri,  $10^\circ$  açısal çözünürlüğe sahip olduğundan,  $\Delta\theta$ 'nın değeri en küçük  $10^\circ$  olabilir. Bundan büyük değerler için  $\overline{C_{p,i}}$  değerini hesaplamak mümkündür. Şekil 7'de  $n=6$  durumu için  $\overline{C_p}$  değerinin  $\Delta\theta$  aralıklarıyla değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Hesaplanan  $\overline{C_{p,i}}$  değerlerinin örnek grafiksel gösterimi

Türbinlerin maksimum ve minimum performans sergiledikleri sektörler açısal aralıkların konumlarını belirlemek için kullanılabilir. Örneğin türbinlerin maksimum performans sergiledikleri bölge ile (örn; Şekil 7,  $150^\circ$ - $210^\circ$ )

sahanın maksimum potansiyelinin bulunduğu bölge (hakim rüzgâr yönü) (Şekil 3, 15°-75°) karşılaştırılarak gerçekleştirilen bu konumlandırma esnasında,  $\overline{C_{p,i}}$  değerleri diğer sektörlerde de yer değiştirilmekte ve bunun sonucunda her bir türbin yerleşimi için türbin çiftine tüm yönlerden gelen rüzgârın etkisinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle hesaplanan  $\overline{C_{p,i}}$  değerleri, tekil türbinin güç üretim değerleriyle çarpılarak, her açısız aralığa yeni bir türbin güç eğrisi tanımlanır.



**Şekil 8.** Sektörlere göre rüzgâr esme sıklığı sayıları. 15°-75°'ler arası hakim rüzgâr yönü olduğu gözükmemektedir.

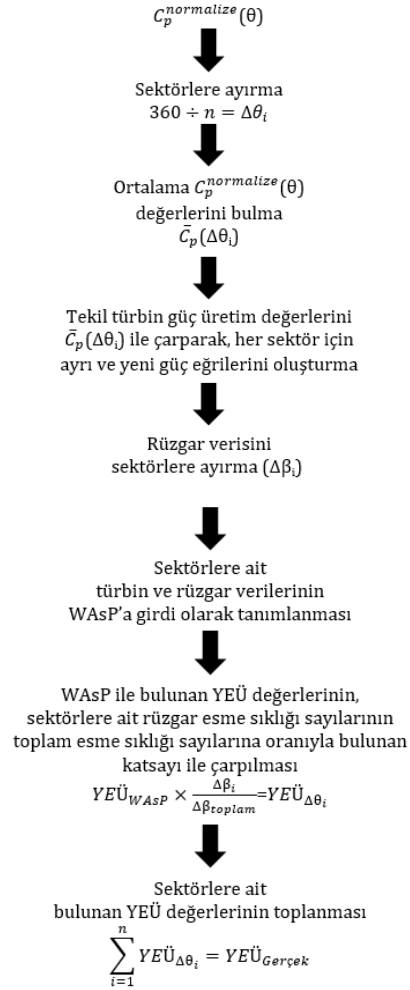
WASP, YEÜ hesaplaması yaparken, sahadaki türbinleri YERT olarak kabul etmekte ve bu da her yönden gelen rüzgârın hesaba katılmasına neden olmaktadır. YERT'lerdeki dönme mekanizması (yaw) sayesinde bu durum gerçek koşullar altında da sağlanabilmektedir. Bu hesaplamayı eşli çalışan DERT çifti dizilimlerine uyarlamak için, her yönden gelen rüzgârın da sektörlerle ( $\Delta\beta_i$ ) ayrılması ve kendine ait olan  $\Delta\theta_i$  sektöründeki güç eğrisi ile analize sokulması gerekir. WASP'ın her ayrı sektöre ait bulunduğu YEÜ değeri, sadece o sektörde bulunan rüzgâr esme sıklığı sayısının ( $\Delta\beta_i$ ) sahanın her yönden gelen toplam esme sıklığı sayısına ( $\Delta\beta_{toplam}$ ) oranıyla bulunan katsayı ile çarpılarak (Denklem 3) hesaplama yapılan sektöre ait gerçek YEÜ değeri bulunur.

$$YEÜ_{WASP,i} \times \frac{\Delta\beta_i}{\Delta\beta_{toplam}} = YEÜ_{\Delta\theta_i} \quad (3)$$

Tüm sektörler için hesaplanan YEÜ değerleri toplanarak gerçek YEÜ bulunur.

$$\sum_{i=1}^n YEÜ_{\Delta\theta_i} = YEÜ_{Gerçek} \quad (4)$$

Uygulama sahası için yöne bağlı rüzgâr esme sıklığı sayıları Şekil 8'de, hesaplama yönteminin akış diyagramını Şekil 9'da verilmiştir.



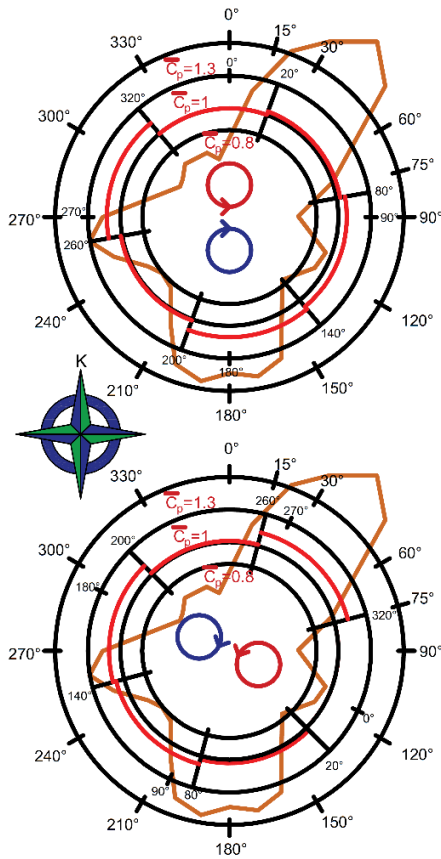
**Şekil 9.** Kullanılan yöntemin akış diyagramı

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Örnek uygulama

Önerilen yöntemin örnek türbin tipi kullanılarak sahaya uygulanması için Şekil 4'teki diyagramda, polar koordinatlarla belirtilen güç katsayısı

çizgisi (kırmızı çizgi), türbinlerin farklı performans göstermesi beklenen sektörlerde, 6 adet 60°lik açısall bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler için hesaplanan  $\overline{C_{p,i}}$  değerleri (Şekil 7) ile sahanın rüzgâr yön dağılımı verisi (Şekil 3) birleştirilerek türbin saha eşleşmesi Şekil 10'da görselleştirilmiştir. Şekil 10'da verilen iki ayrı türbin yerleşimi durumu, YEÜ değerini en yüksek değere getirebilmek için, türbin çiftinin performansının yöne bağlı değişiminin saha verileri ile birleştirildiği bir optimizasyon çözümü yapılması gerektiğini göstermektedir.

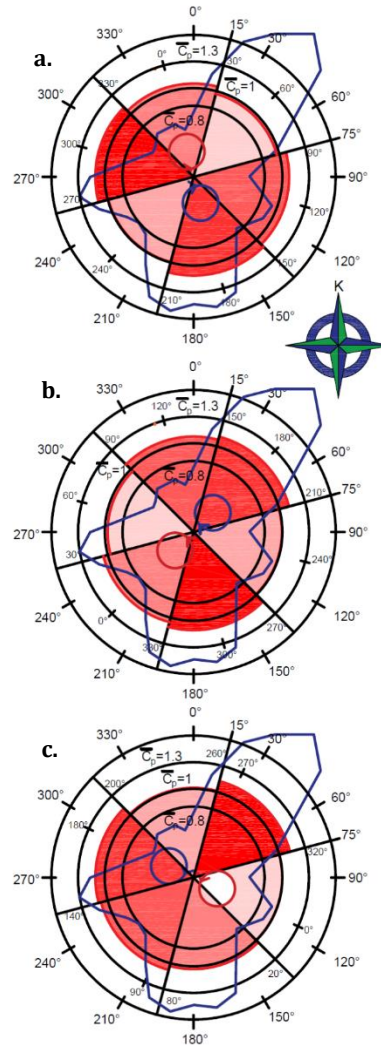


**Şekil 10.** Güç katsayısı çizgisi ve türbinlerin hakim rüzgâr yönünü karşıdan alacak şekilde dönüştürülmesi. Kırmızı çizgiler  $\overline{C_{p,i}}$ , kahverengi çizgi ise rüzgâr yön dağılımını göstermektedir.

Türbin çiftinin sahadaki performansın değişimini göstermek için örnek olarak, türbinlerin iyi veya kötü performans sergiledikleri 3 bölge seçilmiştir. Bunlar;

- 30°-90° arası (kötü performans)
- 150°-210° arası (iyi performans)
- 260°-320° arası (çok iyi performans)

Bu bölgeler seçilirken, 270°-330° yerine 260°-320° diziliminin özel olarak seçilmesinin nedeni, bu açı aralığının en yüksek  $\overline{C_p}$  değerine sahip olunan 60°lik aralık olmasıdır.



**Şekil 11.** Farklı açısal konumların sektörlere göre performansının şematik gösterimi. (Renk koyulaştıkça  $C_p$  değeri artmaktadır.) (a: 30°-90°, b: 150°-210°, c: 260°-320°)

Türbin çiftinin sahaya yerleşiminde oluşabilecek farklı olasılıkları değerlendirebilmek için, bu bölgelerin hakim rüzgâr yönünü (15°-75° arası) karşıdan alacak şekilde yerleştirildiği farklı

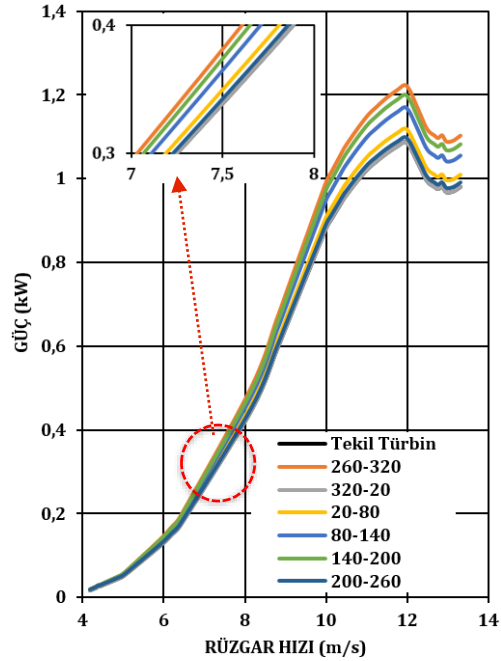
durumlar için karşılaştırma yapılmıştır. Hesaplama yapılan yerleşimler Şekil 11'de gösterilmiştir. Örnek olarak, en yüksek  $\overline{C_{p,i}}$  değerine sahip sektör olan 260°-320° yerleşimi oluşturulurken (Şekil 11-c), 260°-320° arası hakim rüzgâr yönünü karşıdan alacak şekilde yer değiştirirken kalan diğer 60°'lik bölgeler de birlikte yer değiştirmektedir. Bu farklı yerleşimlerin sonucu, saha üzerinde aynı konumda bulunan ve ayrı çalışmayan (birbirleriyle etkileşime girmeyecek kadar uzak yerleştirilmiş) iki adet DERT'in performansı ile karşılaştırılmıştır.

Farklı sektörlerde türbinlerin tepkisini ayırt edebilmek için açısız aralıklara karşılık gelen ortalama normalize güç katsayısı değerleri, izole türbinin güç üretim değerleri ile çarpılmıştır. Analizler yapılırken her 60°'lik açısız bölge için kullanılan türbin güç eğrileri Şekil 12'de gösterilmiştir. Şeklin ayrıntısında da görüldüğü gibi düşük rüzgâr hızlarında türbin güç eğrileri arasındaki fark sektörel güç katsayısı ile orantılı olarak değişmektedir.

Yapılan analizler sonucu ayrı çalışmayan iki DERT'in toplam YEÜ 2990 kW's bulunmuştur. Eşli çalışmayan DERT çiftleri en kötü senaryoda (30°-90°) bile %2,25'lik YEÜ artışı ile ayrı çalışmayan iki türbinden yüksek performans gösterebilmektedir. Eşli çalışmayan türbinler en iyi durumda (260°-320°) %11'i aşan performans artışı göstermiştir (Tablo 1). Türbinin ürettiği yıllık ortalama gücün türbinin anma gücüne oranı olan kapasite kullanım faktörü [10] açısından değerlendirildiğinde türbinlerin sahadaki ticari performansı daha net olarak

anlaşılabilmektedir. Tablo 1'de farklı yerleşimler için kapasite kullanım faktörü de verilmiştir.

Tek bir çiftte görülen %10'un üzerindeki artış hem teknik hem de ticari açıdan tatmin edici bir sonuçtur. Sektör sayısının (n) artırılmasıyla açısız aralık ( $\Delta\theta$ ) küçültülerek açısız çözünürlük artırılıp analizlerin doğruluğu artırılabilir.



**Şekil 12.** 260°-320° diziliminin sektörler için güç eğrisi değişimleri (320°-20° arası temsil eden güç eğrisi, tekil türbinin güç eğrisine eşit olduğundan siyah çizgi ve gri çizgi çakışmıştır.)

**Tablo 1.** Eşli çalışmayan DERT çifti dizilimlerinin YEÜ'lerinin, ayrı çalışmayan iki DERT'in toplam YEÜ'ne göre performans artışı

Dizilim	YEÜ (kW's)	Performans Artışı	Kapasite Faktörü
Ayrı Çalışan	2990	-	%28,4
30°-90°	3059	%2,25	%29
150°-210°	3349	%10,73	%31,8
260°-320°	3374	%11,37	%32



### 3.2. Belirsizlik analizi

Çalışmada kullanılan 30m'deki rüzgâr verileri 10m'ye ekstrapole edilirken WASP 10'un rüzgâr iklim tahmin algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma 5m'ye kadar tahmin yapabilmektedir fakat doğruluğu açısından kesin bir bilgi literatürde bulunmamaktadır. Ancak WASP'a ait öğretici dökümanlarda, düşey hız profili ekstrapolasyonunun hata oranının %0-5 arasında olduğu belirtilmektedir [11].

Rüzgâr verilerinin ekstrapolasyonunun doğruluğunu test etmek için, türbinin göbek yüksekliği 10m'den 30m'ye çıkarılarak analizler tekrar yürütülmüştür. Sonuç olarak, izole edilmiş tek bir türbin için YEÜ, 543 kW's artış ile, 1495 kW's'ten 2038 kW's'e çıktığı görülmüştür (Tablo 2). WASP 10'un ekstrapolasyon algoritmasının 10m yüksekliğin altında belirli düzeyde çalıştığı fark edilmiştir; ancak doğruluğunun daha ayrıntılı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

**Tablo 2.** Tekil türbinin farklı yüksekliklerdeki YEÜ değerleri

Yükseklik	YEÜ (kW's)
10m	1495
30m	2038

Hesaplamalar yapılırken, 70m rakımda bulunan ve ortalama hava sıcaklığı yıl boyu 18°C olan sahanın hava yoğunluğu değeri yaklaşık 1,2 kg/m<sup>3</sup> alınmış olup bu değerdeki yıl boyu görülen sapmalardan ötürü doğabilecek belirsizlikler göz önünde bulundurulmamıştır.

### Teşekkür

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü tarafından 2017.KB.FEN.031 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

### Kaynakça

- [1] Dabiri, J. 2011. Potential Order of Magnitude Enhancement of Wind Farm Power Density via Counter-Rotating Vertical-Axis Wind Turbine Arrays, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Cilt. 3. DOI: 10.1063/1.3608170
- [2] Karadeniz, Z.H., S. 2015. Düşey Eksenli Rüzgâr Türbini Araştırmalarında Son Gelişmeler, VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 15-16 Ekim, Adana, 151-155.
- [3] Whittlesey, R. W., Liska, S., Dabiri, J. 2010. Fish Schooling as a Basis for Vertical Axis Wind Turbine Farm Design, *Bioinspiration & Biomimetics*, Cilt. 5, s. 1-6. DOI: 10.1088/1748-3182/5/3/035005

Kullanılan vektör haritasının çözünürlüğü de hesaplama yaparken büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, internet üzerinde bulunabilecek en iyi çözünürlükteki harita olan, 1 ark-saniye (30m) çözünürlükteki topografik harita kullanılmıştır.

### 4. Sonuç

Farklı çalışma şekilleri ve etkileşimleri nedeniyle DERT'ler ve eşli çalışan DERT'ler için YEÜ hesaplanmalarında yeni yaklaşımlar geliştirilmesi gerektirmektedir. Bu çalışmada, eşli çalışan tek bir DERT çiftinin YEÜ hesaplamaları için kullanılabilecek bir yöntem önerilmektedir.

Yapılan örnek çalışmada sahaya konumlandırmanın ne kadar önemli olduğu incelenmiş ve doğru konumlandırma ile YEÜ'nin %11'e kadar artırılacağı gösterilmiştir. Kullanılan hesaplama yazılımı YERT'ler için geliştirilmiş olduğundan bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bunun sonucunda oluşabilecek hataların incelenmesi yöntemi iyileştirecektir.

Eşli çalışan türbin verisinin düz bir sahadan alınmış olması nedeniyle sonuçlarda sapmalar olabilir. Önerilen yöntemin saha koşullarından (pürüzlülük, yüzey şekilleri, engeller) nasıl etkilendiğinin de incelenmesi ve yöntemin saha şartlarına göre düzeltilmesi çalışılması gereken konulardandır. Ayrıca bu tip türbinlerin sahada kullanımı sırasında oluşacak yeni elektriksel bağlantı şekilleri, lojistik yaklaşımları, bakım onarım ihtiyaçları vb. nedeniyle, tüm bu çalışma alanlarının araştırmacılar ve ticari kurumlar için bir fırsat olduğu düşünülmektedir.

- [4] Kinzel, M., Mulligan, Q., Dabiri, J. 2012. Energy Exchange in an Array of Vertical-Axis Wind Turbines, *Journal of Turbulence*, Cilt. 13(38), s. 1-13. DOI: 10.1080/14685248.2012.712698
- [5] Shamsoddin, S., Fernando, P.A. 2014. Large Eddy Simulation of Vertical Axis Wind Turbine Wakes, *Energies*, Cilt. 7(2), s. 890-912. DOI: 10.3390/en7020890
- [6] Tescione, G., Ragni, D., He, C., Simao Ferreira, C.J., van Bussel, G. J. W. 2014. Near Wake Flow Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine by Stereoscopic Particle Image Velocimetry, *Renewable Energy*, Cilt. 70, s. 47-61. DOI: 10.1016/j.renene.2014.02.042
- [7] Kacprzak, K., Liskiewicz, G., Sobczak, K. 2013. Numerical Investigation of Conventional and Modified Savonius Wind Turbines, *Renewable Energy*, Cilt. 60, s. 578-585. DOI: 10.1016/j.renene.2013.06.009
- [8] Zanforlin, S., Nishino, T. 2016. Fluid Dynamic Mechanisms of Enhanced Power Generation by

- Closely Spaced Vertical Axis Wind Turbines, Renewable Energy, An International Journal, Cilt. 99, s. 1213-1226. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.015
- [9] Huskey, A., Bowen, A., Jager, D. 2009. Wind Turbine Generator System Power Performance Test Report for the Mariah Windspire 1-kW Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, Proje Numarası: NREL/TP-500-46192
- [10] Albadi, M. H., El-Saadany, E. F. 2009. Wind Turbines Capacity Factor Modeling—A Novel Approach: IEEE Transactions On Power Systems, Cilt. 24, s. 1637-1638. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2023274
- [11] Mortensen, N. G. 2016. Wind Resource Assessment Using the WAsP Software. [https://orbit.dtu.dk/ws/files/140943898/Wind\\_resource\\_assessment\\_using\\_the\\_WAsP\\_software\\_DTU\\_Wind\\_Energy\\_E\\_0135\\_.pdf](https://orbit.dtu.dk/ws/files/140943898/Wind_resource_assessment_using_the_WAsP_software_DTU_Wind_Energy_E_0135_.pdf) (Erişim Tarihi: 23.07.2019).