

## Rüzgâr çiftliklerinde veri zarflama analizi ve Malmquist endeksi yaklaşımları ile performans analizi

### Performance analysis in wind farms by data envelopment analysis and Malmquist index approaches

Yunus EROĞLU<sup>1\*</sup>, Serap Ulusam SEÇKİNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye.  
erogluyunus@hotmail.com, seckiner@gantep.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.11.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 26.02.2016

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.59023

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Son yıllarda hızla yaygınlaşan rüzgâr enerji santralleri, enerji talepleri sürekli artan ülkeler için kaçınılmaz bir yerel kaynak olarak değerlendirilmektedir. Ekonomik ömürleri ortalama yirmi yıl olarak tasarlanan bu santrallerden en iyi şekilde faydalanabilmek için işletme maliyetlerinin düşürülmesi veya üretilen enerjinin maksimize edilmesi gerekmektedir. Performans analizleri yardımıyla, bir rüzgâr santralinde türbinlerin performansları gözlemlenebilir ve böylece hali hazırda kaynakların etkin bir biçimde kullanılıp kullanılmadığı konusunda işletme yöneticisine fikir sunulabilir. Bu çalışmada rüzgâr santrallerinde mevcut veri toplama sistemlerinden elde edilen verilerin kullanımıyla türbinlerin performans kıyaslamaları yapılmıştır. Veri Zarflama Analizi, bir rüzgâr santrali içerisinde bulunan türbinlerin iki yıllık işletme performanslarını kıyaslayabilmek için kullanılmış ve performans değişimlerinin detaylı incelenmesi için Malmquist Endeksi ile toplam faktör verimliliği hesaplanmıştır. Çalışmada, Türkiye’de faaliyette olan bir rüzgâr santralinin 2013 ve 2014 yıllarına ait işletme verileri kullanılmıştır. Sonuç olarak, düşük performanslı türbinler belirlenmiş, performans kayıplarının sebepleri anlaşılmasına çalışılmış ve performans artırıcı stratejilerin geliştirilmesi planlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Rüzgâr çiftliği, Performans analizi, Veri zarflama analizi, Malmquist endeksi

#### 1 Giriş

Dünya popülasyonu günden güne artmaktadır ve daha fazla insan daha fazla ihtiyaç doğurmaktadır. Bu sebeple sanayileşme kaçınılmaz olmuştur ve beraberinde enerji modern ekonomiler için önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Artan sanayileşme, enerji taleplerini de hızla arttırmaktadır. Dünya genelinde artan bu talepleri sağlamak için çeşitli enerji kaynakları kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar (kömür, petrol), nükleer santraller ve yenilenebilir enerji kaynakları bu talebi karşılamakta kullanılan en yaygın kalemler olarak düşünülebilir. İklim değişikliği ve enerji güvenliği gibi konuların hayli önem kazandığı günümüzde, enerji politikalarını belirleyenler, güvenli ve temiz enerji kaynaklarının hızlı ve yaygın bir şekilde üretim bileşenleri arasında düşünülmesi gerektiği konusunda görüşler bildirmişlerdir [1].

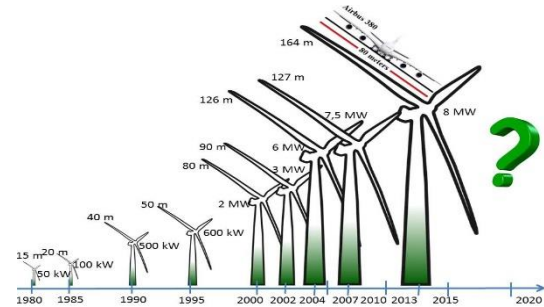
Rüzgâr enerjisi eski çağlardan günümüze binlerce yıldır değirmenlerde tahıl öğütmede, su pompalamada, deniz ve nehir taşımacılığında vb. çeşitli mekanik güç çevrimlerinde kullanılan en yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir [2]. Günümüzde ise rüzgâr enerjisinden elektrik elde etmek için modern türbinler tasarlanmış ve dünyanın birçok bölgesinde çeşitli boyut ve kapasitelerde yaygın olarak

#### Abstract

Recently, rapidly spreading wind power plants are considered as inevitable local sources by countries having ever-increasing energy demand. The best way to get more benefits from these energy plants, which have averagely 20 years of economic life, is to reduce operating costs or to maximize the produced energy. Performance of the turbine in a wind farm can be observed by performance analysis tools, so that, it could provide information to the plant manager about whether the current sources were used efficiently or not. In this study, performance comparisons of turbines were analyzed by using data taken from current data gathering systems in the wind farms. Data Envelopment Analysis is used to compare wind turbines' two-year production performance in a wind farm and evaluated total factor productivities by Malmquist Index to examine changes in performance detailed. In the study, operation data for the years 2013 and 2014 of a current wind farm in Turkey were used. Consequently, low-performance turbines were identified, it has tried to understand the reasons for the performance losses, and development of performance-enhancing strategies were planned.

**Keywords:** Wind farm, Performance analysis, Data envelopment analysis, Malmquist index

kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve maliyetlerin düşmesi, daha büyük kapasiteli rüzgâr türbinlerinin tasarlanmasını ve daha büyük rüzgâr enerji santrallerinin kurulmasını sağlamıştır. Şekil 1’de verildiği gibi modern rüzgâr türbinleri özellikle son 15 yılda hızlıca gelişmiş ve kanat uzunluğu bir Airbus 380’in toplam uzunluğundan daha büyük tasarımlarla ticari olarak üretilmeye başlanmıştır.



Şekil 1: Modern rüzgâr türbinlerinin yıllara göre evrimi (Rotor çapları (m) ve kapasiteleri(kW-MW)).

Birçok kuruluşun [3]-[6] düzenli olarak yayımladıkları rüzgâr enerjisi raporlarına göre aşağıdaki son durum özet olarak verilebilir;

- Rüzgâr enerjisi 80 ülkede kullanılan bir enerji kaynağıdır,
- 1997-2014 yılları arası küresel yeni kurulan rüzgâr enerjisi Şekil 2'de verilmiştir,
- Yenilenebilir enerjiye 2014 yılında yapılan yatırımların toplamı 277 milyar Euro iken sadece rüzgâr enerjisine 88.9 milyar Euro aktarılmıştır,
- 13.1milyar Euro ile 18.7 Euro arasında bir tutar 11.8 GW'lık yeni kapasiteyle sadece Avrupa rüzgâr enerjisine aktarılmıştır.
- 2014 yılında 51 GW'tan daha fazla kurulum gerçekleşmiştir,
- 2014 yılında Avrupa %43.7'lik bir oranla en yüksek büyüme oranına sahiptir,
- Sadece Çin tek başına 23 GW yeni rüzgâr enerjisi kapasitesi eklemiştir.

Almanya yaklaşık olarak 5.3 GW yeni kapasite ile Çin veya ABD dışında bir yılda 5 GW'tan daha fazla kapasite ekleyen ilk ülke olmuştur.

Sunulan raporlarda ayrıca rüzgâr enerjisi sektörünün büyüme hızının tahmin edilenden daha yüksek olduğu ve bunun sebepleri arasında iklim değişikliği ve enerji arz güvenliği gibi konuların etkili olduğuna değinilmiştir. 2015 yılı için yeniden 50 GW'tan daha fazla bir kapasite eklenmesini öngörmektedirler.

Rüzgâr enerjisi, Türkiye için de önemli ve büyük bir pazardır. Yayımlanmış son raporlarda 2014 yılında 804 MW'lık yeni kapasitelerin eklenerek toplamda 3.8 GW'lık bir kapasiteye ulaştığı, 2010 yılından bu yana yılda 500MW'dan daha fazla bir kapasite artışı olduğu, 2015 yılında ek 1 GW'lık yeni yatırımların gerçekleşeceği ve gelecek 10 yıl içerisinde toplam kurulu gücün 10 GW'ı aşacağı vurgulanmıştır [3],[5].

Kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesinin küresel anlamda artan bir ivmeyle büyümeye devam etmesi bir yana, yatırımcılar küresel ve yerel enerji piyasalarında yerlerini koruma adına ekonomik ömrü ortalama yirmi yıl olan hali hazırda mevcut işletmelerin

maliyetlerini düşürüp, karlılığını arttırmak için çeşitli kontrol ve izleme stratejileri geliştirme çabasında dırlar [7].

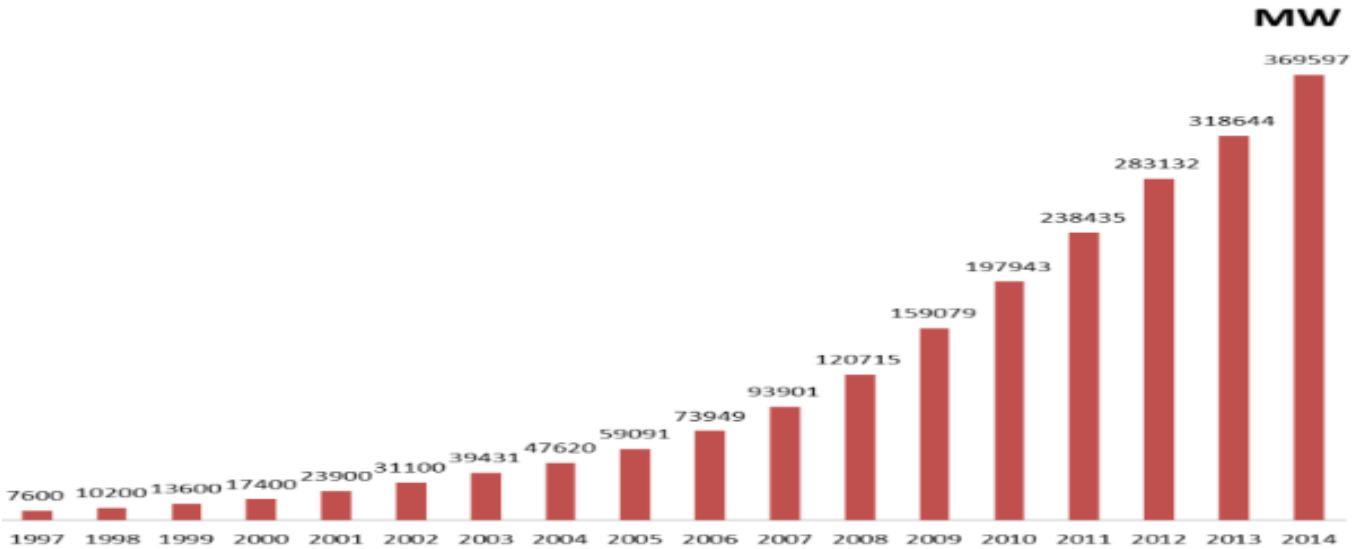
İşletmelerde maliyeti düşürmenin yollarından birisi de kaynakları optimum düzeyde kullanarak çıktıyı maksimize etmektir. Bu amaçla rüzgâr enerjisi işletmelerinde performans analizleri önem kazanmaktadır. Performansı kısaca bir işletmenin belirlediği amaç ya da amaçlara ulaşabilmek için gösterdiği tüm çabaların değerlendirilmesi olarak tanımlayabilmek mümkündür [8]. Performans ölçümü; kullanılan kaynakların, üretilen ürün veya hizmetlerin ve elde edilen sonuçların takip edilebilmesi için düzenli ve sistematik biçimde veri toplanması, analiz edilmesi ve raporlanması basamaklarını içeren, önceden belirlenen amaçlara göre ortaya çıkan ürünleri, hizmetleri ve/veya sonuçları birlikte değerlendirebilen analitik bir süreçtir [9].

İşletmelerin performanslarının belirlenebilmesi, gerek işletme yönetimi gerekse yatırımcılar açısından, önemlidir. Ancak her işletmede olduğu gibi, rüzgâr santrallerinde de farklı zaman periyotlarını ve farklı yönetim düzeylerini içeren, dolayısıyla girdi çıktı kombinasyonları farklı olan görev ve hedefleri vardır. Bu çalışmada, performans boyutlarından birisi olan etkinlik ölçümüne odaklanılmış, rüzgâr santrallerinin etkinliğini inceleyebilmek için parametrik olmayan analitik yöntemlerden Veri Zarflama Analizi (VZA) kullanılmıştır. Ayrıca, zamana bağlı teknik ve teknik olmayan etkinlik analizlerinin incelenebilmesi için ay bazında Malmquist Endeksleri (ME) ortaya çıkarılmıştır.

VZA, ME ve rüzgâr santrallerinde performans kıyaslamalarıyla ilgili literatür ikinci bölümde verilmiştir. Kullanılan yöntemle ilgili matematiksel modeller ve açıklamalar üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölümde problem tanımlanmış ve çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Son olarak sonuçlar ve yorumlar verilmiştir.

## 2 Literatür taraması

Bu çalışmada bir rüzgâr santrali içerisindeki türbinlerin etkinlik sınırlarını ölçmek için pek çok alanda (sağlık, imalat, pazarlama, vb.) başarılı biçimde uygulanan VZA, analitik bir yaklaşım olarak tercih edilmiştir.



Şekil 2: 1997- 2014 yılları arasında küresel toplam yeni kurulan rüzgâr enerjisi kapasitesi (GWEC, 2015 [3]).

Temeli 1957'de Farrel [10] tarafından atılan üretim tekniklerinin analizi ve etkinlik ölçümünde matematiksel modelleme kullanımı, ilk olarak 1978'de Charnes, Cooper ve Rhodes [11] tarafından karar verme ünitelerinin etkinliğini hesap eden VZA yaklaşımı modelleri olarak tanıtılmış ve sonrasında isimlerinin baş harfleri olan CCR modeli olarak literatürde yer almıştır. Bu ilk model, ölçeğe göre sabit getiri varsayımını baz alır. Daha sonra Banker, Charnes ve Cooper [12] tarafından CCR modeli gevşetilerek ölçeğe göre değişken getiri sağlayan BCC modeli oluşturulmuştur. Her iki yaklaşım da temel VZA modelleridir ve hem girdi hem de çıktı odaklı olarak modellenenmektedirler.

VZA ile ilgili ilk yayının yapılmasının ardından otuz yılı aşkın bir süre geçmesine rağmen bu konudaki araştırmalar devam etmekte ve herhangi bir ilgi kaybı da görülmemektedir [13]. Bunun en önemli sebepleri arasında, önerilen yöntemin aşağıda sayılan avantajları barındırması söylenebilir [14],[15];

- Etkinlik analizi yapılması gereken üniteler için birden fazla girdi ve çıktı değişkenleri eş zamanlı kullanılabilirler,
- Sadece doğrusal model kullanarak etkinlik analizini mümkün kılar,
- Doğrusal programlama dışında girdi ve çıktılar arasında herhangi bir ilişki kurulmasına gerek yoktur,
- Girdi ve çıktı değişkenleri için farklı birimler kullanılmasının sakıncası yoktur (ağırlık, uzunluk, miktar, para vb.).

Bunların yanı sıra çeşitli dezavantajlara da sahiptir;

- Deterministlik, tesadüfi hataya yer vermediği için verilerden kaynaklanan hatalar yanlış etkinlik sonuçlarını verebilir,
- Görecelidir, karar değişkenleri arasında bir sınır etkinlik belirlediği için sadece analizin yapıldığı karar değişkenleri hakkında bilgi verir, genelleme yapılması zordur,
- Parametrik değildir, bu hesaplama açısından avantaj olarak sayılabilir de istatistiksel analiz yapılmasını imkânsızlaştırmaktadır,
- Sadece belirli bir an için değerlendirme yapılabilir, zamanı ifade eden değişimler söz konusu değildir, statiktir (ME zamanı da inceleyerek bu dezavantajı ortadan kaldıracaktır),
- Girdi ve çıktı sayıları arttıkça etkin ve etkin olmayan birimlerin birbirinden ayrılması zorlaşır.

Güncel çalışmalardan örnek vermek gerekirse, Iribarren ve diğ. [16] enerji sektöründe fizibilite çalışmalarının kıyaslanmasında, Benli ve Bozoklu [17] reklam sektöründe VZA metodunu kullanmışlardır.

VZA'da; en iyi performansa sahip birim, etkinlik sınırı olarak belirlenir ve sınırdan olmayan diğer birimler ise etkin birime uzaklıklarına göre derecelendirilirler. Otuz yılı aşkın süredir yapılan çalışmaların hızla arttığından bahseden bir literatür çalışmasına göre [18]; 2010 ve 2014 yılları arasında 2000'den fazla VZA ile ilgili yayın yapıldığı ve bu sayının 2010 ve öncesinde ise toplamda sadece 4500 civarında olduğu [13] raporlanmıştır. Günümüzde birçok değişik modeller temel CCR ve BCC modellerine alternatif olarak geliştirilmiş olsa da asıl amaç etkinlik ölçümü olarak kalmıştır [13]. VZA'ya

uygulamadaki asıl amaç ise yöneticilere etkin olmayan birimlerde nasıl bir iyileştirme yapılabileceği konusunda fikir veriyor olmasıdır [14].

Bunların yanında, VZA sadece belirli bir zamandaki karar birimlerinin performanslarını analiz etmektedir ve bu özelliği sebebiyle statik bir analiz yöntemidir. Herhangi bir zamanda VZA yöntemiyle etkin olduğu tespit edilen bir birim, farklı bir zaman diliminde referans olma özelliğini kaybedebilir. Bu durum, yöneticiler ve karar vericiler açısından, belirli bir birimin zaman içinde nasıl bir performans izlediği konusunda eksik bilgi verir. Zaman boyutunu da kapsayan bir model olan Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi (MTFV), VZA'nın bu eksikliğini tamamlamak için ortaya çıkmış bir modeldir [19].

1982 yılında Caves, Christensen ve Diewert VZA'ya bağlı, zaman boyutunu da içeren bir toplam faktör etkinlik analizi yöntemi olarak MTFV'yi geliştirmişlerdir [20]. Bu yöntemin asıl amacı, ortak teknolojiye sahip birimlerin herhangi iki farklı zaman boyutu için toplam faktör verimliliğindeki değişimi ölçmektir. İlk modellendiğinden bu yana farklı sektörlerde sıklıkla kullanılan bir etkinlik ölçüm tekniğidir. Son yıllara ait çalışmalara örnek vermek gerekirse; sigorta sektörü üzerine [21], enerji ticareti üzerine [22], tarımın karbondioksit oranına etkisi üzerine [23], tekstil ve giyim sanayisi üzerine [24], Türk Bankacılık sektöründe [25] ve turizm sektöründe [26] referans olarak literatürde yer almaktadırlar.

Rüzgâr enerjisi sektörü dünya genelinde oldukça yaygınlaşmasına [3],[4] rağmen rüzgâr santrallerinin verimliliğini analiz eden yayınların hala literatürde yeterli kadar yer almadığı gözlemlenmektedir. Sarıca ve Or [27] Türkiye'de bulunan mevcut enerji üretim kaynaklarının etkinliğini analiz etmek için VZA yaklaşımını kullanmışlardır. Sunulan araştırmada, özel sektör ve devlet tarafından işletilen doğalgaz, kömür ve akaryakıt tesislerinin etkinlikleri analiz edilmiş ve girdi ve çıktılar arasında çeşitli bağıntılar ortaya çıkarılmıştır. Benzer bir çalışma [28] İspanya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının etkinliğini ölçmek için yapılmıştır.

Ardente ve diğ. [29] yapmış oldukları rüzgâr çiftlikleri üzerine bir çalışmada, rüzgâr santralının kurulum ve işletim aşamaları dikkate alınarak enerji ve çevresel etkinlik yaşam döngüsü boyutunda incelenmiş ve faydalı kullanım ömründe rüzgâr santrallerinin yeşil enerji statüsüne alınıp alınamayacağı sorusuna VZA yöntemiyle cevap aranmıştır. Rüzgâr santrallerinin performansını inceleyen farklı çalışmalarda ise türbinlerin aralarındaki mesafelere dikkat verilerek performanslardaki değişim [30] ve yine rüzgâr çiftliğinin topolojik özelliği dikkate alınarak üretilen güçteki performans incelenmiştir [31]. Araştırmamız sürecinde yaptığımız literatür taramalarında rüzgâr santrallerinde performans analizi yapmak için VZA kullanan bir çalışma olarak Kusiak ve diğ. [32] referans verilebilir. Bu çalışmada, VZA yöntemi ile türbinlerde yaşanan arızaların performansa etkisi olduğunu belirtmişler fakat detaylı bir performans analizi sunmamışlardır.

Mevcut literatürdeki bu eksikliği kapatılmak adına, bu çalışmada VZA yaklaşımı ile bir rüzgâr santralının toplam verimliliği ve her bir türbinin etkinliği analiz edilmiş olup MTFV yardımıyla ay bazında etkinliklerdeki değişimler incelenmiş ve karar vericiye bakım planlamasında yardımcı

olabilecek performans kayıpları sunulmuştur. Uygulanan yöntemler ve problem tanımı sonraki bölümlerde detaylıca ele alınmaktadır.

### 3 Yöntem

Bu çalışmada, rüzgâr santrallerinde türbinlerin ve rüzgâr santralının etkinlik analizlerini yapabilmek, düşük performansa sahip türbinleri tespit edebilmek ve ay bazında etkinliklerin incelenmesiyle iyileştirme yapılması gereken türbinlere karar verebilmek için VZA ve MTFV yaklaşımları kullanılmıştır. Literatürde rüzgâr santrallerinin etkinlik analizlerinin incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. CCR VZA modeli etkinlik analizi yöntemleri arasında uygulanabilirliği kolay ve literatürde oldukça yaygın kullanımı olan bir yöntemdir. Ayrıca MTFV'de dönemsel etkinlik değişimlerinin incelenebilmesi için yine en temel ve basit bir yaklaşımdır. Bu yüzden, bu çalışmada bu iki temel yaklaşım kullanılmıştır. Sonraki bölümlerde bu yaklaşımların modelleri verilmektedir.

#### 3.1 Veri zarflama analizi (VZA)

Bir işletmede verimliliği ölçmenin en basit yolu çıktının girdiye oranını bulmaktan geçer ve aşağıdaki şekilde formüle edilir [33];

$$\text{Verimlilik} = \text{Çıktı/Girdi} \quad (1)$$

Charnes ve diğ. [11] bu basit kavramı Farrel'in çalışmasından [10] ilham alarak aşağıdaki kesirli modeli kurmuşlardır;

$$\text{Enb. } h_x = \frac{\sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik}} \quad (2a)$$

Öyle ki;

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n \quad (2b)$$

$$u_{rk} \geq 0, \quad r = 1, \dots, s \quad (2c)$$

$$v_{ik} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2d)$$

Yukarıdaki modelde m adet girdisi s adet çıktısı ve n adet karar birimi olan sistem düşünülmüştür.  $X_{ij} > 0$  ve j karar birimi tarafından kullanılan i girdi miktarını göstermektedir. Ayrıca,  $Y_{rj} > 0$  ve j karar birimi tarafından üretilen r çıktı miktarını göstermektedir.  $v_{ik}$  ve  $u_{rk}$  ise bu modelde k karar biriminin i girdi ve r çıktıları için ağırlıklarını belirten ve bulunması gereken değişkenlerdir. (2b) kısıtı k karar birimlerinin etkinliklerinin en fazla 1 olabileceğini, (2c) ve (2d) kısıtları ise girdi ve çıktı miktarlarının ağırlıklarının negatif olamayacağını belirtir. Bu model n adet karar değişkeni için ayrı ayrı modellenir. (2a)'da verilmiş olan amaç fonksiyonu (1)'de verilen genel basit verimlilik formülüne benzemekle beraber, k karar birimi için toplam ağırlıklandırılmış çıktıların toplam ağırlıklandırılmış girdilere oranını en-büyüklemeye çalışmaktadır. CCR modeli olarak da bilinen VZA'nın en temel modeli, yukarıdaki kesirli modelin doğrusal modele dönüştürülmesiyle elde edilir ve aşağıdaki gibidir;

$$\text{Enb. } h_x = \sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk} \quad (3a)$$

Öyle ki;

$$\sum_{r=1}^s u_{rk} Y_{rk} - \sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (3b)$$

$$\sum_{i=1}^m v_{ik} X_{ik} = 1 \quad (3c)$$

$$u_{rk} \geq 0, \quad r = 1, \dots, s \quad (3d)$$

$$v_{ik} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3e)$$

Yukarıdaki doğrusal modele göre; k karar biriminin girdi ve çıktılarının ağırlıkları negatif olamamalıdır (3d ve 3e), girdilerin ağırlıklı toplamları maksimum 1 olmalıdır (3c), çıktılarının ağırlıklı toplamları her karar verici birim için en fazla girdilerin ağırlıklı toplamlarına eşit olmalıdır (3b), böylece sadece etkin birimlerin amaç fonksiyon değeri 1'e eşit olur, etkin olmayanların 1'den küçük olur (3a).

#### 3.2 Malmquist toplam faktör verimlilik endeksi (MTFV)

VZA'nın statik olma dezavantajını ortadan kaldıran MTFV, her bir veri noktasının ortak teknolojiye göre olan uzaklarının oranını hesap ederek iki veri noktası arasındaki toplam faktör verimliliğindeki değişimi hesaplamaktadır. Bu endeksin hesaplanmasında ilk olarak Malmquist tarafından 1953'te [34] tanımlanan ve Caves ve diğ. [20] tarafından faydalanılan uzaklık fonksiyonu (4) kullanılmıştır.

$$d(x, y) = \text{Enk. } \{\delta: (y/\delta) \in S\} \quad (4)$$

Uzaklık fonksiyonunun en önemli özelliklerinden bir tanesi birden fazla girdi ve çıktı olan üretim teknolojilerini, maliyeti en aza indirmeye veya karı en fazla yapma gibi herhangi bir hedef belirtmeden tanımlamada kullanılabilmesidir. Çıktıya göre uzaklık fonksiyonu (4)'te tanımlanır. Uzaklık fonksiyonu  $d(x, y)$ 'nin alacağı değerler, y vektörü S sınırı (üretim sınırı) üzerinde ise 1'e eşit; y vektörü S içindeki teknik etkin olmayan bir noktayı tanımlıyorsa 1'den küçük ve y vektörü S dışındaki mümkün olmayan bir noktayı tanımlıyorsa 1'den büyük olacaktır [33].

İki farklı veri noktası arasındaki toplam faktör verimliliği değişimi aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$m(Y_s, X_s, Y_t, X_t) = \sqrt{\frac{d^s(Y_t, X_t)}{d^s(Y_s, X_s)} \times \frac{d^t(Y_t, X_t)}{d^t(Y_s, X_s)}} \quad (5)$$

Yukarıdaki yaklaşımda,  $d^s(Y_t, X_t)$  ifadesi t dönemi gözleminin s dönemi teknolojisine olan uzaklığı belirtmektedir. Malmquist toplam faktör verimliliği endeksi,  $m(\cdot)$  olarak belirlenmiştir ve 1'den büyük olması s döneminden t dönemine MTFV'de büyüme olduğunu, 1'den küçük olması ise aynı dönemler dikkate alındığında MTFV'de azalma olduğunu göstermektedir. (5) No.lu denklemi aşağıdaki gibi de yazmak mümkündür;

$$m(Y_s, X_s, Y_t, X_t) = \frac{d^t(Y_t, X_t)}{d^s(Y_s, X_s)} \times \sqrt{\frac{d^s(Y_t, X_t)}{d^t(Y_t, X_t)} \times \frac{d^s(Y_s, X_s)}{d^t(Y_s, X_s)}} \quad (6)$$

Yukarıdaki yaklaşım, etkinlikteki değişimi (7) ve teknolojiye meydana gelen değişimi (8) ayrı ayrı hesap edebilmemize olanak sağlar.

$$ED = \frac{d^t(Y_t, X_t)}{d^s(Y_s, X_s)} \quad (7)$$

Herhangi  $s$  ve  $t$  dönemleri arasındaki çıktı eksenli teknik Etkinlikteki Değişimi (7) ile hesap edebiliriz.

$$TD = \sqrt{\left[ \frac{d^s(Y_t, X_t)}{d^t(Y_t, X_t)} \times \frac{d^s(Y_s, X_s)}{d^t(Y_s, X_s)} \right]} \quad (8)$$

Herhangi  $s$  ve  $t$  dönemleri arasındaki Teknolojik Değişimi (TD) ise (8) ile hesap edebiliriz.

Ayrıca, MTFV yaklaşımında Etkinlikteki Değişim (ED) ve Teknolojik Değişim (TD) kavramlarının yanı sıra Ölçek Etkinlikteki Değişim (ÖED), Saf Etkinlikteki Değişim (SED) ve Teknik Etkinlikteki Değişim (TED) kavramları da hesaplanmaktadır. TD'deki artış üretim sınırının yukarı kaydığını ve üretim kabiliyetindeki artışı temsil etmekte iken azalış tam tersi durumu işaret eder. ÖED ise işletmelerin uygun ölçekte çalışıp çalışmadığını sorgulamaktadır. TED 1'den büyük olması aynı miktarda girdi ile daha fazla çıktı elde edilebileceğini ifade ederken, 1'den küçük olması teknolojinin etkin kullanılmadığını ve aynı girdilerle daha az çıktı elde edildiğini belirtir. Ayrıca, SED yönetim uygulamaları kaynaklı olduğu için "yönetimsel etkinlik" olarak da kullanılabilir [26]. Bu kavramlar arasındaki ilişkiler ve detaylı hesaplamaları için referans [33] incelenebilir.

Etkinlikteki değişim ve teknolojik değişimin çarpımına eşit olan ve doğrudan etkilediği toplam faktör endeksi, birçok sektörde zamana karşı birimlerin hangi sebeplerden dolayı etkinliklerinde artma veya azalma olduğu hakkında karar vericilere basit ve kolaylıkla anlaşılacak oranlar vermektedir. Böylece, bir birimde yaşanan değişimin sebebinin yatırım kaynaklı olup olmadığı konusunda fikir sahibi olunabilir.

## 4 Uygulama

### 4.1 Araştırmanın amacı ve problem tanımı

Rüzgâr türbinlerin etkinliklerini belirleyebilmek ve değişimini gözlemleyebilmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Çalışmada Türkiye'de faal bulunan bir rüzgâr santralının 2013 ve 2014 yıllarına ait işletme verileri kullanılmıştır.

Bu rüzgâr santralinde 16 adet 90 m rotor çaplı 80 m kule yüksekliğine sahip 3 MW güç kapasiteli türbinler bulunmaktadır.

Rüzgâr santrallerinde en önemli göstergelerden birisi rüzgâr hızı - üretilen güç ilişkisini gösteren Güç Eğrisi'dir. Şekil 3'te rüzgâr santralinde bulunan bir rüzgâr türbinin farklı rüzgâr hızlarına karşılık gerçekte üretmiş olduğu güçler yeşil (açık) ile gösterilmiş, hangi rüzgâr hızında ne kadar güç üretmesi gerektiği ise siyah (koyu çizgi) ile gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere rüzgâr hızı yaklaşık 12 m/s'ye ulaşınca kadar kabaca ideal eğriye benzerlik gösteren bir davranış sergilese de daha hızlı rüzgârlarda çok farklı davranmıştır.

İdeal eğriden farklı sergilenen her durum aslında türbinin verimlilik açısından problemi olduğunu vurgulamaktadır. Şekil 3 iki yıllık ortalama davranışı sergilediği için türbinin hangi zamanlarda performans dışı davrandığını tespit etmek sadece bu şekle bakarak anlaşılabilir. Bu sebeple türbinin çeşitli dönemlere ait güç eğrisinin de incelenmeye alınması gerekmektedir. Şekil 4'te aynı türbine ait 2013 Ocak

ve 2014 Aralık ayları arasında her bir aya ait güç eğrisi verilmiştir. Bazı aylarda ideal eğriye benzerliği oldukça fazla iken (Ekim 2013, Şubat 2014) bazılarında oldukça dağınık bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şubat-Mart 2013).

Bu çalışma, rüzgâr santralinde bulunan türbinlerin güç eğrisinde meydana gelen değişimlerin sebep olduğu etkinlik kayıplarını tespit edebilmek ve karar vericiye hangi rüzgâr türbinlerinin bakıma ihtiyacı olduğu hakkında bilgi verebilmek için yapılmıştır. Bunun için işletmeden türbinlere ait çeşitli veriler SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition-Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Merkezi) sistemi aracılığıyla temin edilmiştir. Her bir türbin için jeneratör devir bilgileri, rotor devir bilgileri, rüzgâr hızı bilgileri ve üretilen güç bilgileri 10 dakikalık aralıklarla sistem tarafından kaydedilmiş ve bu veriler çalışmada kullanılmıştır.

CCR ve MTFV modellerinde kullanılan girdiler aylık jeneratör devri, rotor devri ve rüzgâr hızı çıktı olarak ise üretilen aylık güç ortalamalarıdır. Her bir türbin için 2 yıl boyunca 10 dk.lık veriler toplandığı için her bir veri türünde toplamda 105120 adet veri temin edilmiştir. Türbinlerdeki ve sistemdeki bazı aksaklıklar sebebiyle her türbin için aynı miktarda veri kaydı bulunamamıştır. Şekil 5'te her türbinde oluşan 10 dakikalık veri seti kayıpları gösterilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere 11. ve 15. türbinlerde yaşanan veri kaybı diğerlerine oranla oldukça fazla olduğu için analiz dışı tutulmuşlardır.

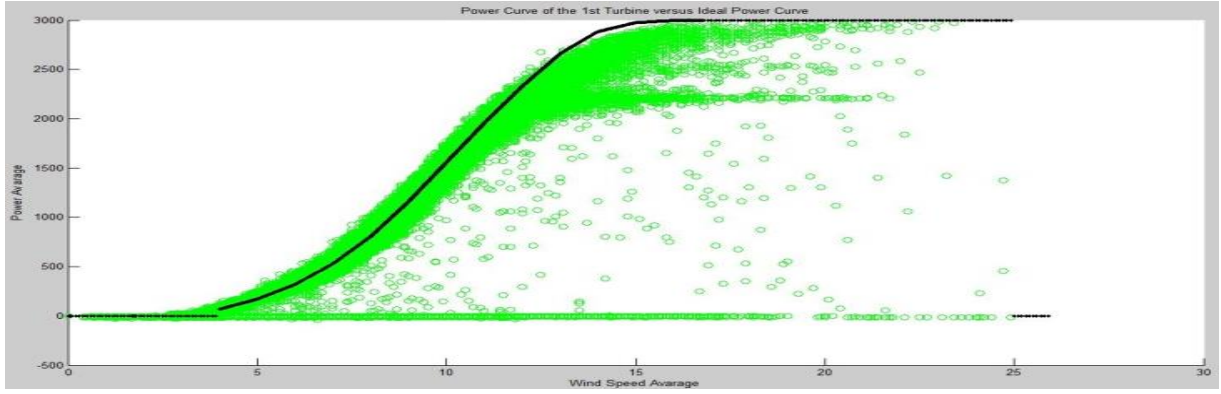
Çalışmanın ilk aşamasında girdiye yönelik CCR VZA modeli her ay için ayrı ayrı oluşturulmuş ve çözülmüştür. Daha sonra Toplam Verimlilik Endeksi'ni hesap edebilmek için zamanları da içeren standart MTFV modeli oluşturulmuştur ve sonuçları sonraki bölümlerde yorumlanmıştır.

### 4.2 CCR Veri Zarflama Analizi ile aylık rüzgâr türbini performans kıyaslamaları

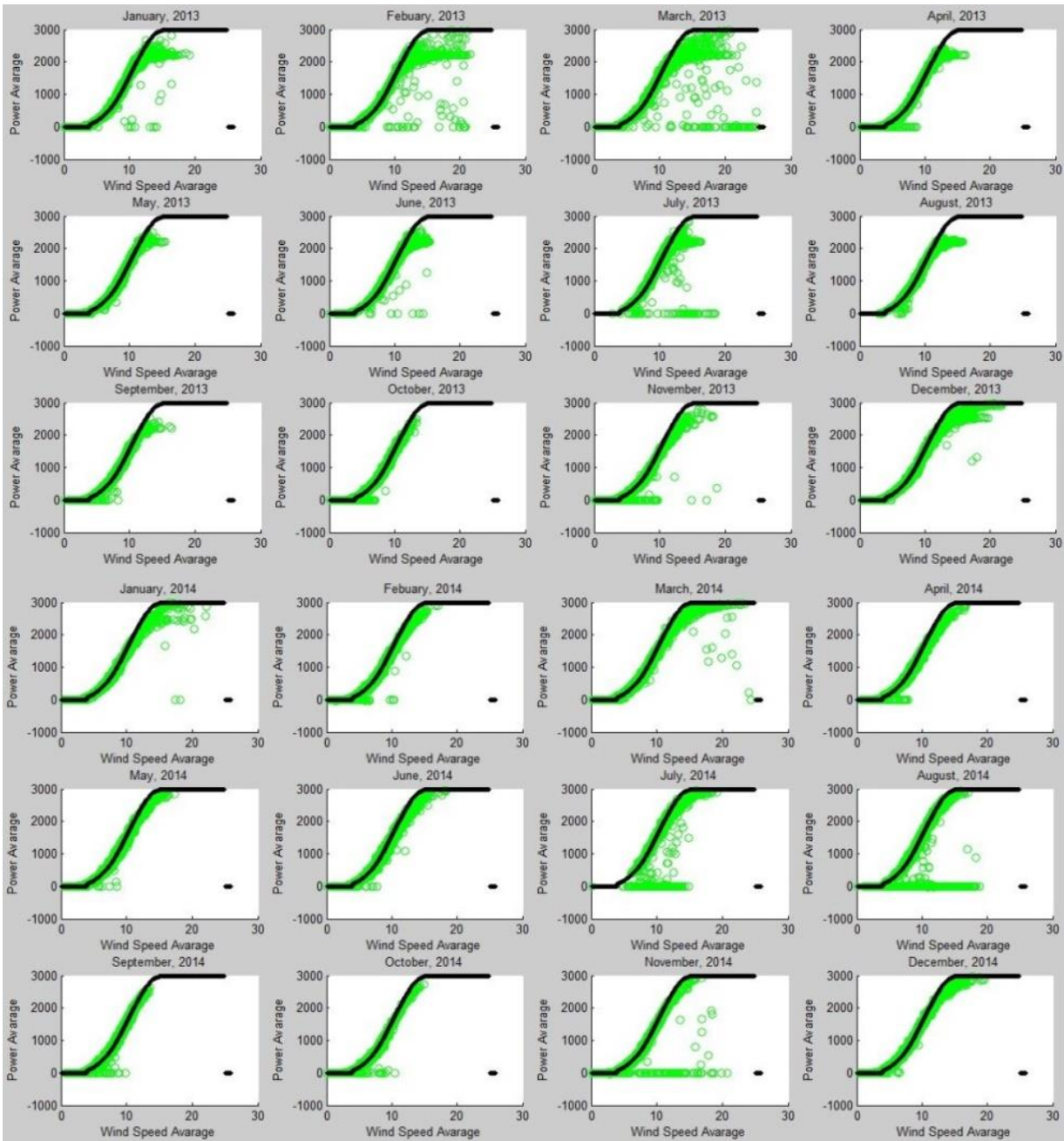
2013 Ocak-2014 Aralık ayları için oluşturulan rüzgâr santralinde bulunan 14 türbin için girdiye yönelik VZA modelinin sonuçları Tablo 1a-b'de verilmiştir. Çalışmada incelenen rüzgâr türbinleri teknik olarak birbirinin aynısı olduğu için ideal güç eğrileri de aynı davranışı göstermeli ve benzer rüzgâr hızı girdileriyle ideal eğriye benzemelidir. Girdi yönelimli VZA modelinin kullanılmasının temel nedeni belirli bir çıktı bileşimini en etkin bir şekilde üretebilmek amacıyla kullanılacak en uygun girdi bileşimini açıklayabilmesidir.

CCR VZA modelinin statik özelliğe sahip olması sebebiyle Tablo 1a-b her ay için ayrı ayrı ve birbirinden bağımsız olarak incelenmelidir. 2013 yılının Ocak ayı için, 13 No.lu rüzgâr türbini en etkin rüzgâr türbini olarak ortaya çıkmış ve bu santraldeki diğer tüm rüzgâr türbinlerinin etkin olmadığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan aynı zaman dilimi için, 6 No.lu türbin 0.78 etkinlik oranıyla etkinsizliği en fazla türbin olmuştur. Tablo 1a-b her ay için ayrı ayrı incelendiğinde 4, 12,13 ve 14 No.lu türbinlerin etkinliklerinin diğer türbinlere göre daha fazla olduğu görülmekte ve bazı aylarda bu türbinlerin en etkin türbin oldukları anlaşılmaktadır.

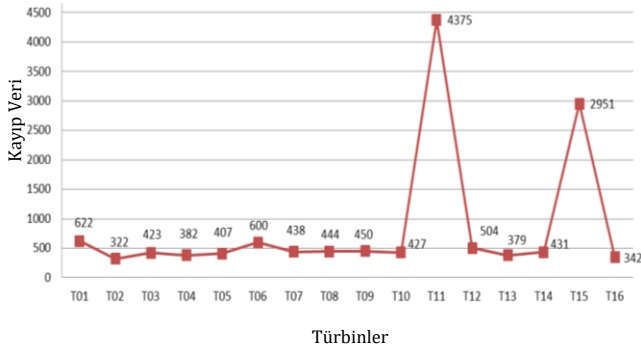
Etkinlik verileri oransal veriler olduğu için ortalama hesabında geometrik ortalama kullanılmış ve yine 4, 12, 13 ve 14 No.lu türbinlerin en büyük etkinlik ortalamalarına sahip oldukları anlaşılmıştır. Diğer taraftan 10 No.lu türbinin her iki yılda da etkinsizliği en fazla olan türbin olduğu anlaşılmış ve bu yüzden etkinsizlik sebebi araştırılması gereken ciddi bir performans kaybı olduğu yorumu yapılmıştır. İşletmenin sağlamış olduğu veriler doğrultusunda performans kaybının sebebi konusunda detaylı yorum yapılamamıştır.



Şekil 3: Bir rüzgâr türbininin iki yıllık süreç içerisinde oluşturduğu güç eğrisi ve ideal güç eğrisi kıyaslaması.



Şekil 4: Bir rüzgâr türbininin iki yıllık süreç içerisinde oluşturduğu aylık güç eğrileri ve ideal güç eğrisi kıyaslaması.



Şekil 5: 2013 Ocak-2014 Aralık dönemlerinde kayıp olan 10 dakikalık veri seti sayıları.

Her yıl-ay için en alt satırdaki ortalama verisi ise rüzgâr santralının genel etkinlik ortalaması hakkında fikir vermekte olup 2013 yılında Mart, Haziran, Temmuz ve Aralık aylarında, 2014 yılında ise sadece Temmuz ve Ağustos aylarında etkinlikleri %90 ve üzeri olduğu gözlemlenmiştir. Her iki yılda da Kasım ayının etkinsizliği en fazla oran olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Ekim ayında performans kaybının bu kadar fazla olma sebebinin araştırılması gerekmektedir.

Sadece basit CCR VZA'nın verdiği sonuçlar yorumlanarak rüzgâr santralindeki hangi türbinin diğerlerine göre daha düşük etkinlikle çalıştığı tespit ederek yönetim kademesinde bakım planlaması yapılabilir. Ayrıca, çeşitli arıza ve hata tespit

yöntemleriyle performans kaybının sebebinin araştırılması için detaylı bir şekilde farklı çalışma planları da düşünülebilir. Çeşitli sektörlerde sıklıkla uygulanan VZA, rüzgâr santrallerinde de uygulanarak işletme performansını arttırabilecek yeni stratejilerin geliştirilmesine yardımcı olabileceği öngörülmektedir. İşletmenin ticari gizlilik politikası sebebiyle performans kayıplarının sebeplerine yönelik detaylı araştırmaların yapılabileceği arıza kayıtları ve sıcaklık, basınç, voltaj vb. performansı etkileyebileceği muhtemel veriler paylaşılmamıştır. Bu sebeple performans arttırıcı stratejilerin geliştirilmesi bu çalışmanın dışında bırakılmıştır.

#### 4.3 Malmquist toplam faktör verimlilik endeksi ile rüzgâr türbinlerindeki aylık performans değişimlerinin açıklanması

Statik bir analiz olan VZA'nın zaman bağımsız çalışmasından dolayı oluşan dezavantajı ortadan kaldırabilmek için çalışmada ayrıca MTFV bulmaya yönelik model kurulmuş ve sonuçları analiz edilmiştir. Çalışmanın zaman aralığı olan Ocak 2013 ve Aralık 2014 öncelikle incelenmiş ve diğer aylar göz ardı edilerek Tablo 2'de gösterilen sonuçlara ulaşılmıştır. Tablo 2'de bulunan veriler sırasıyla Teknik Etkinlikteki Değişim (TED), Saf Etkinlikteki Değişim (SED), Ölçek Etkinliğindeki Değişim (ÖED), Teknolojik Değişim (TD) ve Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi (MTFV) olarak görülmektedir.

Tablo 1a: 2013 Yılı için ay bazında VZA sonucu türbin güç üretim etkinlikleri.

2013	Etkinlik												Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Türbin 1	0.86	0.85	0.88	0.75	0.79	0.93	0.91	0.83	0.74	0.73	0.65	0.86	0.809
Türbin 2	0.86	0.9	0.92	0.8	0.84	0.94	0.95	0.92	0.81	0.73	0.74	0.91	0.8554
Türbin 3	0.81	0.66	0.83	0.73	0.78	0.97	0.98	0.89	0.79	0.71	0.66	0.9	0.8023
Türbin 4	0.97	0.96	0.94	0.83	0.84	0.96	0.95	0.91	0.87	0.84	0.87	1	0.9106
Türbin 5	0.82	0.87	0.83	0.72	0.74	0.88	0.91	0.85	0.74	0.7	0.69	0.88	0.7977
Türbin 6	0.78	0.74	0.8	0.69	0.77	0.91	0.92	0.86	0.72	0.68	0.6	0.82	0.7693
Türbin 7	0.80	0.78	0.86	0.7	0.74	0.97	0.92	0.85	0.72	0.68	0.67	0.8	0.7858
Türbin 8	0.87	0.88	0.9	0.68	0.69	0.91	0.92	0.81	0.67	0.58	0.66	0.87	0.7782
Türbin 9	0.85	0.87	0.87	0.75	0.8	0.92	0.93	0.9	0.76	0.71	0.67	0.84	0.819
Türbin 10	0.90	0.92	0.9	0.55	0.55	0.78	0.8	0.67	0.53	0.52	0.72	0.95	0.7134
Türbin 12	0.97	1	0.99	0.98	0.97	0.99	0.99	1	1	0.96	0.9	0.98	0.9776
Türbin 13	1.00	1	1	0.96	0.88	0.91	0.91	0.89	0.9	0.96	1	1	0.9497
Türbin 14	0.94	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.97	0.9838
Türbin 16	0.87	0.94	0.92	0.85	0.9	0.93	0.9	0.9	0.83	0.8	0.8	0.85	0.8732
Ortalama	0.88	0.88	0.9	0.78	0.8	0.93	0.93	0.87	0.78	0.75	0.74	0.9	0.84096

Tablo 1b: 2014 Yılı için ay bazında VZA sonucu türbin güç üretim etkinlikleri.

2014	Etkinlik												Ortalama
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Türbin 1	0.72	0.74	0.85	0.76	0.79	0.83	0.88	0.67	0.74	0.7	0.6	0.77	0.7503
Türbin 2	0.78	0.83	0.89	0.83	0.85	0.88	0.96	0.96	0.81	0.8	0.73	0.84	0.8447
Türbin 3	0.73	0.76	0.87	0.79	0.86	0.88	0.99	0.95	0.84	0.71	0.6	0.76	0.8028
Türbin 4	0.92	0.92	0.96	0.89	0.9	0.93	1	0.95	0.9	0.85	0.84	0.96	0.9176
Türbin 5	0.79	0.81	0.82	0.75	0.79	0.84	0.99	0.93	0.82	0.69	0.75	0.85	0.815
Türbin 6	0.68	0.67	0.79	0.74	0.79	0.85	1	0.93	0.8	0.64	0.6	0.71	0.7568
Türbin 7	0.69	0.64	0.76	0.75	0.77	0.83	0.96	0.89	0.8	0.61	0.55	0.73	0.7388
Türbin 8	0.77	0.71	0.81	0.69	0.72	0.79	0.97	0.89	0.69	0.68	0.7	0.81	0.7648
Türbin 9	0.76	0.77	0.85	0.78	0.82	0.85	0.99	0.93	0.79	0.68	0.7	0.8	0.805
Türbin 10	0.8	0.7	0.79	0.6	0.59	0.63	0.85	0.75	0.58	0.59	0.71	0.84	0.695
Türbin 12	0.94	0.97	1	1	1	1	1	1	0.99	0.96	0.9	0.94	0.9744
Türbin 13	1	1	0.97	0.95	0.9	0.91	0.96	0.94	0.94	0.96	1	1	0.9604
Türbin 14	0.94	0.99	1	1	1	1	1	1	1	1	0.91	0.94	0.98
Türbin 16	0.82	0.94	0.92	0.9	0.93	0.93	0.98	0.99	0.83	0.9	0.83	0.87	0.9018
Ortalama	0.8	0.81	0.87	0.81	0.83	0.86	0.96	0.91	0.81	0.76	0.73	0.84	0.8313

Tablo 2: 2013 Ocak ve 2014 Aralık ayları için MTFV.

	TED	SED	ÖED	TD	MTFV
Türbin 1	0.90	1.00	0.90	1.09	0.98
Türbin 2	0.97	1.02	0.95	1.09	1.06
Türbin 3	0.94	1.02	0.92	1.09	1.02
Türbin 4	0.99	1.00	0.99	1.09	1.07
Türbin 5	1.03	1.04	0.99	1.09	1.12
Türbin 6	0.91	1.00	0.91	1.09	0.99
Türbin 7	0.91	1.01	0.90	1.09	0.99
Türbin 8	0.93	1.01	0.93	1.09	1.01
Türbin 9	0.95	1.02	0.93	1.09	1.03
Türbin 10	0.93	0.99	0.94	1.09	1.01
Türbin 12	0.96	1.00	0.97	1.09	1.05
Türbin 13	1.00	1.00	1.00	1.07	1.07
Türbin 14	0.99	0.99	1.00	1.08	1.08
Türbin 16	0.99	1.00	0.99	1.09	1.08
Ortalama	0.96	1.01	0.95	1.08	1.04

Performanstaki gerileme MTFV'nin 1'den küçük ilerleme ise 1'den büyük olmasıyla sonuçlanacaktır. Tablo 2 incelendiğinde Ocak 2013 başı ile Aralık 2014 sonu arasında iki yıllık bir zaman diliminde on dört türbinin on birinde görece performans iyileşmesi diğer üçünde ise gerileme olduğu yorumlanabilir. Rüzgâr santralının genel performansında ise %4 oranında bir iyileşme olduğu gözlemlenebilir. Bu dönem aralığında rüzgâr santrali genelinde teknolojik değişim %8 artarken teknolojik etkinlikteki değişim %4 azalma olarak tespit edilmiştir. En büyük performans artışı %12 ile 5 No.lu türbinde gerçekleşirken, performans kayıpları görece % 1-2 gibi düşük rakamlardır. MTFV formülünden (TED\*TD) yola çıkarak, MTFV'nin artmasındaki en büyük payın teknik değişimin tüm türbinlerde %7-9 arasında artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Diğer taraftan, performans gerilemesi gösteren üç türbinde ise tüm bu artışa rağmen teknik etkinlikteki azalışın %9-10'larda olması MTFV'de bir azalma olarak yansımıştır. Santral genelinde ortalama teknik etkinlikteki değişim %4 azalırken teknolojik değişim %8 artış göstermiştir. Teknik etkinlikteki bu azalış, aynı girdi değerleri ile % 4 daha fazla çıktı elde edilebileceği şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca teknik etkinliğin bileşenleri olan (TED=SED\*ÖED) saf etkinlikteki değişim %1 artış yönünde olurken ölçek etkinliğinde %5 civarında azalma tespit edilmiştir. Teknik etkinlikte yaşanan azalmanın sebebinin ölçek etkinliğinde kaynaklandığı görülmektedir. Bunun anlamı ise bu iki zaman dilimi arasında türbinlerin uygun olmayan ölçeklerde çalışmış olmalarıdır.

Teknik etkinlikteki değişim incelendiğinde sadece 5 No.lu türbinde bir artış gözlemlenmiş ve 13 No.lu türbin haricinde diğer türbinlerde azalış tespit edilmiştir. Ayrıca 1, 6 ve 7 No.lu türbinler %9-10 ile en fazla teknik etkinlik kaybı yaşayan türbinler olmuştur. Saf etkinlikteki değişim genel anlamda

%1-2 artış veya birkaç türbinde azalış olarak tespit edilmiş ve genel anlamda pek değişmemiştir. Bunun aksine ölçek etkinlikteki değişim teknik etkinlik değişiminde belirleyici rol oynayarak bazı türbinlerde (1, 3, 6 ve 7) %9-10'lara varan performans kayıplarına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Teknolojik değişim ise hemen hemen tüm türbinlerde artış ile sonuçlanmıştır.

Türbinlerdeki performans değişimini sadece ilk ve son dönem arasındaki MTFV ile inceledikten sonra, tüm dönemler boyunca iki yıllık süreçte ay ay nasıl bir davranış sergilediklerini incelemek için ME modeli her ay için ayrı ayrı uygulanmış ve iki yıllık sürecin analizi sonucunda Tablo 3 ve Tablo 4 oluşmuştur.

Tablo 3'te iki yıllık süreçte her türbinin her ardışık iki aylık dönemler için ayrı ayrı hesap edilen TED, SED, ÖED, TD ve ME değerleri dönemler bazında geometrik ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Analiz sonucuna göre tüm dönemlerin ortalamasına bakıldığında bütün türbinlerde genel olarak toplam verimlilik endeksi açısından performans artışından söz edilebilir. Bunun en büyük etkenlerinden birisi teknik etkinlikteki 5 ve 13 No.lu türbinlerdeki artışların haricinde genelde azalış olmasına rağmen bu açığı kapatacak oranda gerçekleşen teknolojik değişimdeki artıştır.

Teknik etkinlikteki değişim, saf etkinlikteki değişim ve ölçek etkinlikteki değişim her bir türbin için tüm dönemler dikkate alındığında  $\pm$  %1'i geçmemiştir. Bununla beraber teknik etkinlikteki azalmaların sebebi ölçek etkinliğindeki oransal düşüşle açıklanabilir. Ayrıca, toplam faktör verimlilik endeksindeki artışlara teknolojik değişim oranlarının artışının sebep olduğu yorumlanabilir.

Farklı bir analiz sonucu olarak rüzgâr santralının geneli incelendiğinde Tablo 4 oluşmaktadır. Tablo 4'te görüldüğü üzere, 2013 Mayıs-Haziran ve 2013 Kasım-Aralık dönemleri arasında ME %52-53 ile en büyük artışa sahiptir. Bunun yanında, 2014 Eylül-Ekim döneminde ise %42'lik bir performans kaybı gözlemlenmektedir.

Tablo 3: 2013 Ocak-2014 Aralık ayları arasındaki her bir türbinin tüm dönemler için MTFV ortalama değerleri.

	TED	SED	ÖED	TD	MTFV
Türbin 1	0.9953	1	0.9956	1.0088	1.0044
Türbin 2	0.9988	1.0004	0.9965	1.0159	1.0129
Türbin 3	0.9971	1	1.0059	1.0127	1.0187
Türbin 4	0.9994	1.0005	0.9995	1.0139	1.0140
Türbin 5	1.0012	1.0011	0.9978	1.0148	1.0137
Türbin 6	0.9958	1	0.9981	1.0140	1.0121
Türbin 7	0.9960	0.9995	0.9974	1.0142	1.0112
Türbin 8	0.9970	1	0.9965	1.0134	1.0099
Türbin 9	0.9975	1.0003	0.9957	1.0151	1.0111
Türbin 10	0.9966	0.9995	0.9962	1.0127	1.0085
Türbin 12	0.9984	0.9994	0.9974	1.0124	1.0093
Türbin 13	1	1	1	1.0147	1.0147
Türbin 14	0.9996	0.9990	0.9979	1.0120	1.0089
Türbin 16	0.9997	1.0004	0.9958	1.0145	1.0107



Tablo 4: 2013 Ocak-2014 Aralık ayları arasındaki tüm dönemler için MTFV

1. Dönem Yıl-Ay	2. Dönem Yıl-Ay	TED	SED	ÖED	TD	MTFV
13-1	13-2	1.00	1.01	0.99	0.83	0.83
13-2	13-3	1.03	0.99	1.03	1.03	1.06
13-3	13-4	0.86	1.00	0.86	0.91	0.79
13-4	13-5	1.03	1.00	1.03	1.17	1.20
13-5	13-6	1.16	1.01	1.16	1.31	1.53
13-6	13-7	1.00	1.00	1.00	1.11	1.10
13-7	13-8	0.94	0.99	0.95	1.00	0.94
13-8	13-9	0.90	1.00	0.89	0.78	0.70
13-9	13-10	0.95	1.01	0.94	0.71	0.67
13-10	13-11	1.00	0.99	1.01	1.19	1.18
13-11	13-12	1.21	1.02	1.19	1.25	1.52
13-12	14-1	0.89	0.99	0.90	0.88	0.79
14-1	14-2	1.01	1.01	1.00	0.94	0.95
14-2	14-2	1.08	1.00	1.08	0.99	1.07
14-3	14-4	0.92	1.00	0.93	1.06	0.98
14-4	14-5	1.03	1.00	1.03	1.18	1.22
14-5	14-6	1.04	0.99	1.05	1.08	1.12
14-6	14-7	1.12	1.01	1.10	1.22	1.37
14-7	14-8	0.94	0.99	0.95	0.95	0.90
14-8	14-9	0.90	1.00	0.89	0.84	0.75
14-9	14-10	0.93	1.01	0.93	0.63	0.58
14-10	14-11	0.97	1.00	0.97	1.27	1.23
14-11	14-12	1.14	1.01	1.14	1.18	1.35
Ortalama		0.99	1.0	0.99	1.00	1.00

Dönemler arası teknik etkinlikteki değişim incelendiğinde en büyük performans artışı 2013 Kasım-Aralık dönemleri arasında %21 ile gerçekleşmiş olup en büyük performans kaybı ise 2013 Mart-Nisan döneminde %16 ile gerçekleşmiştir. Saf etkinlikteki değişim tüm dönem ortalamalarında  $\pm$  %1'i geçmemiştir fakat ölçek etkinlikteki değişim teknik etkinlikteki değişimin belirlenmesinde ana unsur olarak görünmektedir. Teknolojik değişim ise dönemler arasında farklılıklar göstermiştir. 2013 Mayıs-Haziran döneminde %31'lik artışla en yüksek değere ulaşırken 2014 Eylül-Ekim döneminde %37'lik düşüşle toplam verimlilik endeksindeki en düşük değer oluşmasının temel nedeni olmuştur.

## 5 Sonuç ve öneriler

Rüzgâr santrallerinde verimlilik analizi yapabilmek amacıyla hazırlanan bu çalışmada, Türkiye'de faaliyet gösteren bir rüzgâr santralinden Ocak 2013-Aralık 2014 yılları arasında SCADA sistemi ile elde edilen 10 dk. ortalamalara sahip işletme verileri temin edilmiş ve hem veri zarflama analizi hem de Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi modelleriyle performans değişimleri incelenmiştir. Öncelikle elde edilen veriler aylık bazda düzenlenmiş ve sonrasında performans analiz modelleri uygulanmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde CCR VZA modeli ile her ay için bağımsız olarak rüzgâr türbinlerinin etkinlik analizleri yapılmıştır. Bu analizin sonucuna göre rüzgâr santrali içerisinde hangi türbinin ne oranda etkin olduğu kolaylıkla anlaşılabilir ve etkin olmayan türbinler için karar vericilere

bakım planlaması yapması konusunda tavsiyelerde bulunulmuştur. Fakat çalışmada kullanılan veriler, etkinsizliğin sebepleri hakkında ipucu vermemektedir. Bu yüzden performans kayıplarının sebepleri konusunda detaylı araştırma yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla performans artırıcı stratejiler de geliştirilememiştir. Diğer taraftan, ortalama etkinlik değerlerine bakıldığında rüzgâr santralin etkinliğini her dönem için ayrı ayrı görebilmek mümkün olmuştur.

VZA'nın dönemler arası ilişki hakkında yorum kabiliyeti olmaması sebebiyle çalışmanın ikinci kısmında Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi modeli kullanılmıştır. Öncelikle sadece dönem başı ve dönem sonu arasındaki değişimler incelenmek adına sadece Ocak 2013 ve Aralık 2014 verileri kullanılarak bir analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda 5 No.lu türbinin toplam faktör verimlilik endeksi en büyük türbin olduğu, 1-6 ve 7 No.lu türbinlerin dışında performans artışları gözlemlendiği ve bunun asıl sebebinin teknolojik değişimdeki artıştan kaynaklandığını söylemek mümkündür. Çalışmadaki teknolojik değişimi simgeleyen parametreler girdileri temsil etmekte ve bu dönemde girdi değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca bu iki dönem arasında ölçek etkinliğindeki azalmanın teknik etkinlikteki azalmayla sonuçlandığı da görülmektedir. Bir başka ifadeyle, aynı girdilerle daha düşük güç üretimi gerçekleşmiş ve türbin kapasite kullanımlarında düşüş olmuştur.

İki yıllık sürecin tamamı ardışık aylar arasındaki farklar olarak incelendiğinde, tüm türbinlerin az da olsa performans artışı sağladıkları görülmüştür. Bu durumun en büyük sebebi her türbin için teknolojik etkinlikteki değişim olarak açıklanabilir. Bu santral için teknolojik etkinlikteki değişim rüzgâr hızındaki değişim olarak algılanmalıdır. Dönemsel rüzgâr hızları farklılık gösterdiği için, rüzgâr hızının önceki dönemlere göre yüksek olduğu zaman dilimlerinde teknolojik değişim artışı gözlemlenmiştir. Teknik etkinlikte değişimler incelendiğinde genel olarak az da olsa performans kayıpları gözlemlenmiş ve buna ölçek etkinliğindeki azalışın sebep olduğu yorumlanabilir.

Dönem bazında yapılan son analizde ise 2013 yılında Mayıs-Haziran ve Kasım-Aralık dönemlerinde en büyük performans artışlarının gözlemlendiği, bunun yanında 2014 yılının Eylül - Ekim döneminde ise büyük oranda performans kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu performans kaybının en büyük sebebi teknolojik değişim oranındaki büyük azalıştır.

Bu analizler sonucunda karar vericinin düşük performansların ortaya çıktığı dönem ve türbinlerde kayıpların sebeplerini ortaya koyabilmek için detaylı parametre analizi yapılması önerilebilir. Hazırlanan bu çalışma, literatürde henüz bir benzeri olmaması sebebiyle rüzgâr enerjisi sektöründe örnek teşkil etmektedir.

## 6 Teşekkür

Bu çalışma sürecinde yazarlardan Yunus EROĞLU, TÜBİTAK tarafından desteklenmiş (TÜBİTAK-BİDEB 2214 A) ve çalışmanın bir kısmını Duisburg-Essen Üniversitesi, Enerji ve Güç Sistemleri bölümünde tamamlamıştır. Yunus EROĞLU, katkılarından dolayı TÜBİTAK ve Duisburg-Essen Üniversitesi Enerji ve Güç Sistemleri Bölümü'ne teşekkür eder.

## 7 Kaynaklar

- [1] European Commission. "In-depth Study of European Energy Security". European Commission, Brussels, Belgium. 2014.
- [2] Da Rosa AV. *Fundamentals of Enewable Energy Processes*. 3<sup>rd</sup> ed. Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2013.
- [3] GWEC. "GWEC-Global Wind Report/Annual Market Update 2014". Mar. 2015.
- [4] EWEA. "Wind in Power: 2014 European Statistics". Feb. 2015.
- [5] Turkish Wind Energy Association. "Turkish Wind Energy Statistics Report". Jan. 2015.
- [6] WWEA, "World Wind Energy Report 2012". World Wind Energy Association, May 2013.
- [7] Yang W, Tavner PJ, Crabtree CJ, Feng Y, Qiu Y. "Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges". *Wind Energy*, 17(5), 673-693, 2014.
- [8] Akal Z. *İşletmelerde performans ölçüm ve denetimi: çok yönlü performans göstergeleri*. 6. Baskı. Ankara, Türkiye, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, 1992.
- [9] Lorcu F. "Malmquist toplam faktör verimlilik endeksi: Türk otomotiv sanayi uygulaması". *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 39(2), 276-289, 2010.
- [10] Farrel MJ. "The measurement of productive efficiency". *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, 120(3), 253-290, 1957.
- [11] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. "Measuring the efficiency of decision making units". *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429-444, 1978.
- [12] Banker RD, Charnes A, Cooper WW. "Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis". *Management Science*, 30(9), 1078-1092, 1984.
- [13] Liu JS, Lu LYY, Lu WM, Lin BJY. "Data envelopment analysis 1978-2010: A citation-based literature survey". *Omega*, 41(1), 3-15, 2013.
- [14] Özden ÜH. "Veri zarflama analizi (VZA) ile Türkiye'deki vakıf üniversitelerinin etkinliğinin ölçülmesi". *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 37(2), 167-185, 2008.
- [15] Bircan H. "Veri zarflama analizi ile Sivas ili merkez sağlık ocaklarının etkinliğinin ölçülmesi". *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 12(1), 331-347, 2011.
- [16] Iribarren D, Vázquez-Rowe I, Rugani B, Benetto E. "On the feasibility of using emergy analysis as a source of benchmarking criteria through data envelopment analysis: A case study for wind energy". *Energy*, 67, 527-537, 2014.
- [17] Benli, YK, Bozoklu, CP. *Complexity of Measuring Advertising Efficiency: An Application of DEA Method in Turkey*. Editor: Erçetin ŞŞ. Chaos, Complexity and Leadership, 193-207, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [18] Liu JS, Lu LYY, Lu WM. "Research fronts in data envelopment analysis". *Omega*, 58, 33-45, 2016.
- [19] Dinçer SE. "Veri zarflama analizinde Malmquist endeksiyle toplam faktör verimliliği değişiminin incelenmesi ve İMKB üzerine bir uygulama". *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 25(2), 825-846, 2008.
- [20] Caves DW, Christensen LR, Diewert WE. "The economic theory of index numbers and the Measurement of input, output and productivity". *Econometrica*, 50(6), 1393-1414, 1982.
- [21] Akhisar İ, Tezergil S. "Malmquist toplam faktör verimlilik endeksi: Türk sigorta sektörü uygulaması". *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 5(10), 2014.
- [22] Sheng Y, Wu Y, Shi X, Zhang D. "Energy trade efficiency and its determinants: A Malmquist index approach". *Energy Economics*, 50, 306-314, 2015.
- [23] Lin B, Fei R. "Regional differences of CO2 emissions performance in China's agricultural sector: A Malmquist index approach". *European Journal of Agronomy*, 70, 33-40, 2015.
- [24] Kapelko M, Lansink AO. "An international comparison of productivity change in the textile and clothing industry: a bootstrapped Malmquist index approach". *Empirical Economics*, 48(4), 1499-1523, 2014.
- [25] Benli YK, Değirmen S. "The application of data envelopment analysis based Malmquist total factor productivity index: Empirical evidence in Turkish Banking sector". *Panoeconomicus*, 2(Special Issue), 139-159, 2013.
- [26] Benli YK. "Veri zarflama analizi (VZA) ve Malmquist toplam faktör verimliliği (TFV): Konaklama işletmelerinde bir uygulama". *Ege Akademik Bakış Dergisi*, 12(3), 369-382, 2012.
- [27] Sarica K, Or I. "Efficiency assessment of Turkish power plants using data envelopment analysis". *Energy*, 32(8), 1484-1499, 2007.
- [28] San Cristóbal JR. "A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies". *Renewable Energy*, 36(10), 2742-2746, 2011.
- [29] Ardente F, Beccali M, Cellura M, Lo Brano V. "Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 200-217, 2008.
- [30] Barthelmie RJ, Jensen LE. "Evaluation of wind farm efficiency and wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm". *Wind Energy*, 13(6), 573-586, 2010.
- [31] de Prada Gil M, Gomis-Bellmunt O, Sumper A, Bergas-Jané J. "Power generation efficiency analysis of offshore wind farms connected to a SLPC (single large power converter) operated with variable frequencies considering wake effects". *Energy*, 37(1), 455-468, 2012.
- [32] Kusiak A, Verma A, Wei X. "Wind turbine capacity frontier from SCADA". *Wind System Magazine*, 3(9), 36-39, 2012.
- [33] Cingi S, Tarım ŞA. "Türk Banka sisteminde performans ölçümü DEA Malmquist TFP endeksi uygulaması". *Türkiye Bankalar Birliği, Araştırma Tebliğleri Serisi*; 2000.
- [34] Malmquist S. "Index numbers and difference surfaces". *Trabajos de Estadística*, 4(2), 209-242, 1953.