

# RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRAL YATIRIMLARINDA GERİ ÖDEME SÜRESİNİN MONTE CARLO SİMÜLASYONU İLE BELİRLENMESİ

Hasan Hüseyin YILDIRIM<sup>1</sup>

## Özet

Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi; temiz, güvenilir, tükenmez ve düşük işletme maliyetli bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada, Crystall Ball programı kullanılarak rüzgar enerjisi santral (RES) yatırımlarının değerlendirilmesinde monte carlo simülasyon (MCS) modeli kullanılmıştır. Rüzgar enerjisi yatırımını etkileyen girdi değişkenlerin farklı kombinasyonları simüle edilerek, projenin geri ödeme süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Projenin geri ödeme süresine ait değerlendirmede üç farklı senaryodan yararlanılmıştır. Üç farklı senaryo için yapılan simülasyon sonuçlarında rüzgar enerjisi santral yatırımının geri ödeme süresine ait tahmin değer sonuçları, eğilim sonuçları, duyarlılık sonuçları ve yatırıma ait değişkenlerin korelasyon matrisi sonuçları elde edilmiştir. Monte carlo simülasyon modelinin rüzgar enerjisi santral yatırımlarının değerlendirilmesinde kullanışlı olan alternatif bir model olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji, Rüzgar Enerjisi Yatırımları, Monte Carlo Simülasyonu, Senaryo Analizi

---

**Makale geliş tarihi:** 10 Nisan 2017

**Makale kabul tarihi:** 28 Eylül 2017

<sup>1</sup> Öğr. Grv. Dr., Balıkesir Üniversitesi Burhaniye Uygulamalı Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bankacılık ve Finans Bölümü

# **DETERMINATION OF PAYBACK PERIODS IN WIND POWER GENERATION INVESTMENTS BY MONTE CARLO SIMULATION**

## **Abstract**

Wind energy is one of the renewable energy sources which is a clean, reliable, low operation cost, inexhaustible energy source. In this study, using Crystall Ball software Monte Carlo Simulation (MCS) Model was used for evaluation of wind power plant (WPP) investment. WPP project's Payback Periods (PBP) were determined, by simulating different combinations of input variables affecting the WPP investments. Three different scenarios were used in the evaluation of the project's PBP. The PBP of the estimated value of the WPP investment results in simulation results for three different scenarios, trend results, sensitivity results and the results of the correlation matrix of the variable investment was obtained. End of the results, MCS is an alternative model that is useful assessing WPP investmet.

**Key Words:** Energy, Wind Power Investment, Monte Carlo Simulation, Senario Analysis

## GİRİŞ

Enerji kaynakları ve ihtiyaç duyulan enerjinin karşılanması ekonomik yaşamın olmazsa olmazlarından. Günümüzde ülkeler enerji arz güvenliğini sağlamayı, enerji kaynaklarında dışa bağımlılığı azaltmayı ve fosil yakıtlardan doğan enerji faturasının azaltılmasını hedeflemektedir. Bundan dolayı güvenilir, temiz ve sürdürülebilir enerjinin tedarik edilmesi dünyadaki bütün ülkelerin ilgilendiği ve üzerinde çalıştığı önemli bir konu haline gelmiştir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarından olan fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması ve tüketimi sonrasında çevreye bıraktığı atıklar ve salınımlardan dolayı yenilenebilir enerji olan ilgi son yıllarda artmıştır. Buna bağlı olarak da yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi önemli gelmiştir. Dünya genelinde rüzgar enerjisinin son onbeş yıldaki durumuna bakıldığında; 2000 yılında dünyanın kurulu rüzgar gücü 17.400 MW olup günümüze kadar her yıl kurulu güçteki ek kapasite artışı olmuştur. 2015 yılına gelindiğinde dünyanın kurulu rüzgar gücü kapasitesi 432.883 MW'tır (GWEC, 2016: s.14). Türkiye'de de rüzgar enerjisine yönelik yatırımlar 2007 yılından sonra artış göstermeye başlamıştır. 2006 yılında 51 MW'lık rüzgar enerjisi kurulu gücü her yıl artarak devam etmiştir. 2015 yılına gelindiğinde Türkiye'de kurulu rüzgar gücü kapasitesi 4.718 MW'a seviyesine ulaşmıştır (TUREB, 2016: s.5).

Bu çalışmada RES yatırımının nakit giriş ve çıkışlarını etkileyen değişkenlerle bir finansal model oluşturulmuştur. RES yatırımlarını etkileyen değişkenlerin bir kısmı deterministik iken rüzgar hızına bağlı olan kapasite faktörü gibi olan değişkenlerin stokastik olması, yatırımın ekonomik değerlendirmesinde güçlükler yol açmaktadır. Yatırımın değerlendirilmesinde bu zorlukları aşmak için monte carlo simülasyonu kullanılarak girdi değişkenlerin çok fazla sayıda rassal dağılımı ile tahmin değişkenine (bağımlı değişkene) ait sonuçlar farklı kombinasyonlarla oluşturulmaya çalışılmıştır.

### 1. RES YATIRIMLARINDA MONTE CARLO SİMÜLASYONU

İşletmeler aldığı yatırım kararları için risk analizi yapmak zorunda kalırlar. Monte Carlo Metodu ve MCS işletmelere belirsizlik ve değişkenlik altında alacakları kararlarda olası bütün sonuçları göstererek etkin bir risk değerlendirme imkanı sağlar (Bolak, 2004: s.275). MCS, birden fazla değişkene ait belirsizlikleri ve bu değişkenlerin birbirini aynı anda etkilediği durumlara ilişkin bir model oluşturmakta kullanılan yöntemdir (Ross vd., 2010: s.214; Roques vd, 2006: s.5). MCS'de bir model üzerinde çalışılırken istatistiksel yöntemlerden yararlanılmaktadır (Williams vd., 2008: s.401). MCS, yenilenebilir enerji yatırımlarının

değerlemesinde kullanılan yararlı bir yöntemdir (Khindanova, 2013: s.94). Ayrıca MCS, enerji yatırımlarının risk analizlerinin yapılmasında faydalı fonksiyonel çeşitliliğe sahip olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır (Hertzmark, 2007: s.31).

Yenilenebilir enerji yatırımlarından olan rüzgar enerjisi yatırımlarına başlamadan önce iki temel analize ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan birincisi teknik analiz olup; yatırımın kapasitesinin, yapılacak yerin, yatırımda kullanılacak türbinlerin yerleştirilmesinin, yatırımda kullanılacak türbin seçiminin vb. konuları içermektedir. İkinci yapılan analiz ise yatırımın finansal olarak analiz edilmesidir ki yatırımın ekonomik olarak kazançlı olup olmadığını kapsamaktadır. Gerek teknik analizde gerekse finansal analizde yatırımı etkileyen ve belirsiz olan birçok değişken vardır. MCS ile bu belirsizliklerin modellenmesi yapılarak yatırımın analizi değerlendirilmektedir.

Rüzgar enerjisi projesinin ekonomik değerlendirilmesinde projeye ait birtakım tahminler yapılmaktadır. RES yatırımına ait teknik değerlendirme için türbinlerin kurulumunun ne zaman başlayacağı, türbinin ne kadar süre içerisinde üretici firmadan tedarik edileceği, kurulumun ne zaman tamamlanacağı, yatırımda kullanılacak malzemelerin gelecek fiyatlarındaki değişiklikler gibi hususlar, RES yatırımında yeterli bilginin olmadığı ve belirsizliklerin olduğu konu başlıklarıdır. Yatırımın kurulumuna ait maliyetlerdeki bu belirsizlikler, RES yatırımcısı tarafından MCS ile olası kurulum maliyeti farklı değerlerde belirlenmeye çalışılmaktadır. Bunun için maliyetlerdeki değişimi belirlerken girdi değişkenlere ait farklı senaryolar, değerler dikkate alınır. Belirsizlik içeren değişkenlere ait iyi durum, normal durum ve kötü durumdaki değerler dikkate alınarak yatırımın farklı durumlarda muhtemel sonuçları belirlenmeye çalışılmaktadır.

Günümüzde MC metodları, sayısal integrasyon, stokastik optimizasyon, sistem analizi, kısmi diferansiyel denklemleri, ekonomik modelleme, matematiksel finans, kuyruk modelleri, üretim modelleri simülasyonları, yöneylem araştırması teknikleri gibi konularda kullanılmaktadır (Akçay vd., 2012: s.153).

Monte Carlo Simülasyonu aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (Spinney ve Watkins, 1996: s.157):

- Modelde kullanılacak olan girdi parametrelerinin belirlenmek,
- Modelde kullanılacak olan anahtar girdi parametrelerinin olasılık dağılımları ve istatistiki değerlerini belirlemek,
- Anahtar girdi parametreler arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak tanımlamak,

- Parametrelere ait oluşturulan girdi parametrelerin olasılık dağılımları ile çoklu kombinasyonların analiz edilmesi,
- Son olarakta modelde ulaşılmak istenen tahmin parametresine (bağımlı değişkene) ait olasılık dağılımlarının çıkarılması.

## 2. LİTERATÜR

Her ne kadar yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ilgi artsada yapılan literatür araştırması sonucu MCS analizi ile enerji projelerinin değerlendirildiği çalışmaların az olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda RES yatırımlarının ekonomik olarak değerlendirildiği ve konu ile ilgili MCS'nın kullanıldığı çalışmalardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

Desrochers ve Blanchard (1986) çalışmalarında rüzgar enerjisinin maliyet etkinliği araştırmak için rüzgar türbinine ait 1 yılın saatlik verilerden yararlanmışlardır. Yaptıkları çalışmada kurulan model yardımıyla farklı şekillerdeki rüzgar türbinlerinin enerji üretim kapasitelerini simülasyon yardımı ile karşılaştırmışlardır. Rüzgar yatırımındaki kısıtlamalar ne kadar az olursa ve üretim ne kadar yüksek olursa sistem tarafından emilebilen rüzgar enerjisi oranı o kadar yüksek olacağı sonucuna ulaşmışlardır. Geliştirdikleri yöntem ile farklı rüzgar türbinlerinin enerji ve kapasite olarak sisteme katkıları hesaplanabilmektedir.

Venetsanos vd. (2002) yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji açısından yüksek potansiyele sahip olan Yunanistan için rüzgar enerjisi santralının değerlemesinde net bugünkü değer (NBD) ve reel opsiyon (RO) yöntemlerini kullanmışlardır. Rüzgar enerjisi santral yatırımlarının yüksek belirsizlikler içermesinden dolayı NBD yönteminin tamamlayıcısı olarak RO yönteminin kullanılmasının faydalı olacağı sonucuna erişmişlerdir.

Liberman (2003) çalışmasında ABD'de farklı eyaletlerden seçilmiş 239 bölgede RES yatırımlarını meteorolojiden alınan rüzgar verilerine bağlı olarak MCS ile bölgeler için geri ödeme süresini araştırmıştır. Bölgelerin hakim rüzgar hızlarının farklı olmasından dolayı bölgelerde yapılacak yatırıma ait geri ödeme süreleri farklı çıkmıştır. Rüzgar hızı fazla olan yerlerde yapılan rüzgar enerji yatırımlarına ait geri ödeme süresi, rüzgar hızı düşük olan yerlere göre daha düşük çıkmıştır.

Özerdem vd (2006) yaptıkları çalışmada izmir bölgesi için rüzgar santral yatırımının teknik ve ekonomik fizibilitesini hesaplamışlardır. Teknik fizibilite için rüzgar hızı, hakim rüzgar yönü ve sıcaklık verilerinden yararlanılmıştır. Ekonomik fizibilite için ise yatırımın NBD, iç verim oranına (IRR) ve geri ödeme süresine (PBP) üç farklı senaryo grubu bakılmıştır. Çalışmaları

sonucunda kurulu gücün kWh başına düşen maliyeti kapasitenin bir fonksiyonu olarak farklı özellikler taşımaktadır. Kurulu kapasite ne kadar büyük olur ise kWh başına maliyet o kadar düşük olmaktadır. Yüksek kurulu kapasiteli yatırımların yüksek IRR'a sahip olduğunu sonucuna ulaşımlardır.

Vardar ve Çetin (2007) yaptıkları çalışmada Türkiye'den seçtikleri 14 lokasyonda rüzgar enerjisinden üretilecek birim kWh enerji maliyetini hesaplamışlardır. Birim kWh enerji üretim maliyetini hesaplamak için bölgelerden seçilen üç türbine ait verilerden ve güç eğrilerinden yararlanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre en avantajlı ve ekonomik lokasyonun Bozcaada olduğu belirlenmiştir.

Moran ve Sherrington (2007) yaptıkları çalışmada iskoçya'da bir rüzgar enerji santrali yatırımının pozitif ve negatif faktörlerini NBD analizi ile yerel bölgeye katkısını hesaplamışlardır. Sonuç olarak rüzgar enerji santral yatırımının tüm giderlerine rağmen net refah artışı yarattığı sonucuna ulaşılmıştır.

Williams vd. (2008) yaptıkları çalışmada Kuzey Arizona eyaletinde iki farklı bölge için RES yatırımı ve işletilmesi döneminde sağlanacak faydaları simüle etmişlerdir. Kurulan MCS modeli ile yatırıma ait belirsizlikler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda her iki bölge ekonomisi için RES yatırımının yatırım döneminde ve sonrasında ekonomik aktiviteye sağlayacağı faydaları belirlemeye çalışmışlardır.

Vardar ve Çetin (2009) yaptıkları çalışmada Türkiye'den seçtikleri 22 lokasyonda rüzgar enerjisinden üretilecek birim kWh enerji maliyetini hesaplamışlardır. Birim kWh enerji üretim maliyetini hesaplamak için bölgelerden seçilen üç türbine ait verilerden ve güç eğrilerinden yararlanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre en avantajlı ve ekonomik lokasyonun Kumköy olduğu belirlenmiştir.

Ay (2010) çalışmasında farklı finansman seçeneklerinin rüzgar enerjisi yatırımlarının sonuçlarını nasıl etkilediğini tespit etmeye çalışmıştır. Çalışmasında yıpranmayı hesaba katan ve katmayan olarak iki farklı durumda ekonomik değerlendirme yapmıştır. İki farklı durum içinde ekonomik değerlendirme sonuçları farklı çıkmıştır. Ekonomik değerlendirmede yıpranmanın dikkate alındığı yöntemde nakit akımları yüksek çıkmıştır. Bu nedenle yıpranma yatırımının ekonomik değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir değişken olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Hamamcıoğlu (2010) çalışmasında Yıldız Teknik Üniversitesi Kampüsünde kurulu ölçüm istasyondan alınan verileri kullanarak bölgenin rüzgar enerji potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra seçilen iki farklı kapasitedeki rüzgar türbininin üreteceği yıllık enerji miktarı WAsP programı ile hesaplanmıştır. İki farklı senaryoda elde edilecek olan elektriğin birim maliyeti, ekonomik değerlendirme ölçütlerinden olan geri ödeme süresi, iç verim oranı gibi yöntemler için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında iki senaryoya göre yapılacak yatırımın ekonomik açıdan getirisi olduğu görülmüştür.

Frølund ve Obling (2010) çalışmalarında RES yatırımlarının ekonomik değerlemesini indirgenmiş nakit akımları (DCF) ve reel opsiyon değerlemesi (ROV) yaklaşımlarını karşılaştırarak yapmışlardır. Her iki yönteminde RES yatırımlarının ekonomik değerlendirmesinde başarılı ve kullanılabilir bir yöntem olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Cardell ve Anderson (2010) çalışmalarında farklı rüzgar hızlarındaki üretim maliyetlerini simüle etmişlerdir. Çalışmada oluşturulan senaryolar sonucunda bölgesel rüzgar üretimi ile rüzgar hızı arasında bir korelasyonun olduğunu tespit etmişlerdir.

Rehman vd. (2011) yaptıkları çalışmada Suudi Arabistan'ın doğu bölgesi için 20 MW'lık bir rüzgar santrali yatırımının ekonomik değerlendirmesini yapmışlardır. Yapılan teknik değerlendirmelere göre rüzgar santrali yatırımının yapılacağı lokasyonun % 33,7'lik bir kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Yatırımı etkileyen bütün girdi maliyetler dikkate alındığında yatırımın kWh başına enerji üretim maliyeti 2.94 \$ olarak hesaplanmıştır. Ölçüm yapılacak bölgede ve civarında rüzgar enerjisi santral yatırımlarının geliştirilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Ertürk (2012) çalışmasında Türkiye'de kurulacak 13 GW'lık bir RES yatırımı için belirsiz olan çevresel faktörler altında bir model kurarak yatırımın NPV'sini hesaplamıştır. Türkiye'de 2005 yılında Yenilenebilir Enerji Kanunu'ndaki tarifelerde dikkate alındığında RES yatırımının yapıldığı yerdeki rüzgar hızı 7.5 m/sn ve üzerinde olması halinde yatırımın ekonomik olarak karlı olabileceği sonucuna erişmiştir.

Doğan vd. (2012) çalışmalarında RETScreen analiz programı kullanılarak Hatay yöresinde tesis edilecek 1 MW, 5 MW ve 10 MW güçlerinde 3 adet RES için maliyet analizi hesaplamışlardır. Sonuç olarakta ekonomik açıdan minimum 2 MW ve üzeri kapasiteli RES yatırımlarının banka faizi geliri baz alındığında tercih edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Khindanova (2013) çalışmasında RES yatırımlarının ekonomik değerlemesinde MCS yöntemini kullanarak, stokastik değişkenlerden elektrik fiyatı ve maliyet belirsizliklerini modelleyerek çıktı değişken olan NPV değerine ait dağılımı elde etmiştir. Elde edilen NBD dağılımı, NBD'nin nokta tahminine ya da farklı senaryolardaki çıktı ile karşılaştırıldığında RES yatırımcısına daha derin bir değerlendirme imkanı tanımaktadır. Kullanılan yöntem RES yatırımcısına yatırımın risk ölçümlerine ait standart sapma, çarpıklık, basıklık ve olası durum dışında oluşabilecek NBD değerleri hakkında bilgi sağlamaktadır.

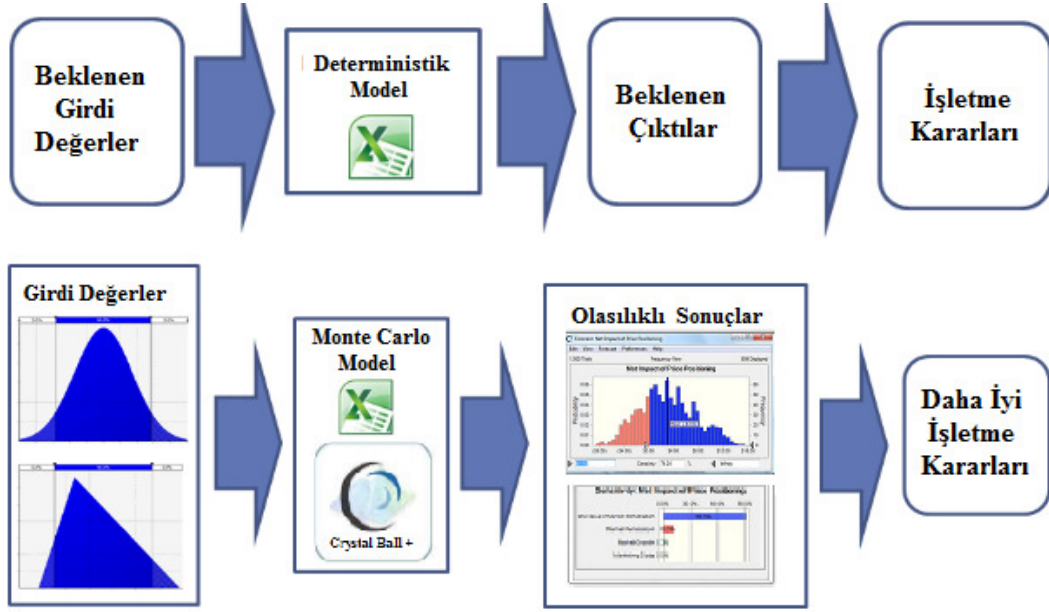
Özçelik (2016) çalışmasında rüzgar enerji yatırımlarını etkileyen nakit akımlarını dikkate alarak Türkiye'de 4 lokasyon için yatırım karlılığını incelemiştir. Proje değerlendirme yöntemlerinden NBD ve İVO'yu kullanarak incelenen lokasyonlardan Karaburun (İzmir) ve Samandağ (Hatay) da yapılacak yatırımların karlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

### 3. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Monte Carlo (MC) yöntemi, ihtimale bağlı bir olayın istatistiksel parametrelerini çok sayıda senaryo üretmek yolu ile tahmin etmeye dayanır (Beyazıt, 2011: s.89). Monte carlo metodu istatistiksel ve deneysel problemlerin çözümünde girdi değişkenindeki rassal sayılar yaklaşım ile çıktı değişkeni belirleme yaklaşımıdır (Simkins ve Simkins, 2013: s.263). Metodun bir probleme uygulanması, problemin tesadüfi sayıları kullanarak simule edilip hesap edilmek istenen parametrenin bu simülasyon sonuçlarına bakılarak yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanır (Hançerlioğulları, 2006: s.545- 556).

Deterministik bir model, girdi değişkenler ile çıktı değişkenler arasında olan planı verir. MCS, girdi değişkenlerdeki sayıları ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ) rastgele farklı kombinasyonlarda kullanarak deterministik olan modeli defalarca değerlendirerek çıktı değişkenleri ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ ) belirlemektedir.





**Şekil 1: Deterministik Model ve Monte Carlo Modelinin Karşılaştırılması**

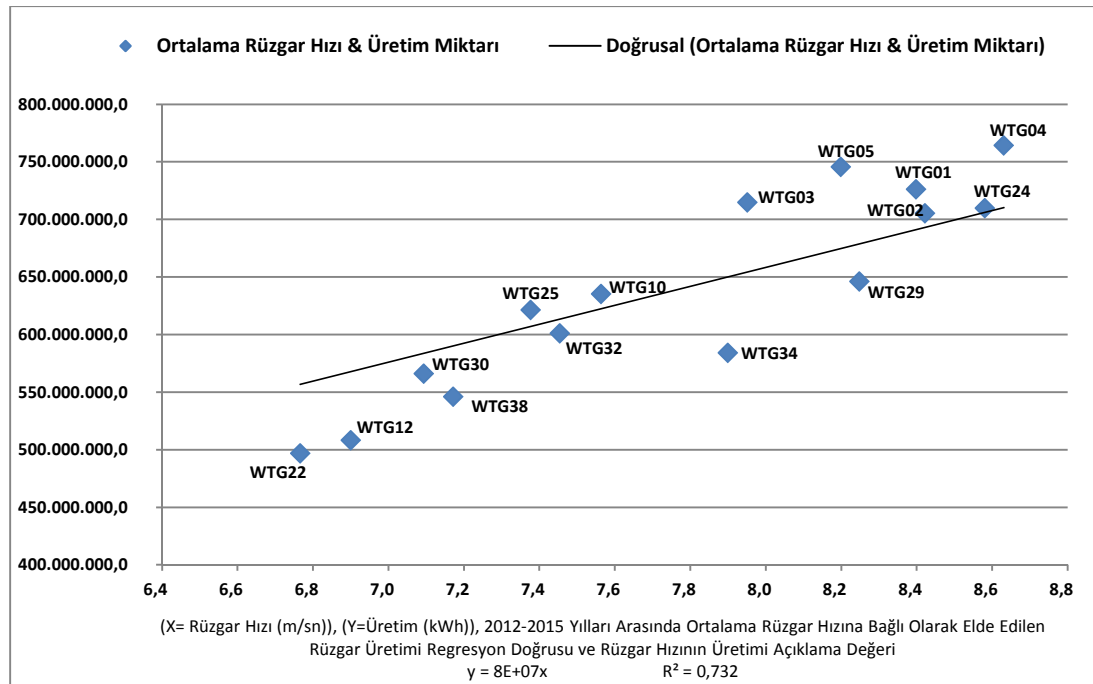
Şekil 1’de deterministik model ve monte carlo modeli’nin karşılaştırılması gösterilmiştir. Monte Carlo Simülasyon modeli, girdi değişkenleri bir rassal değişken (random variable) olarak kabul eder ve bunu bir istatistiksel dağılım olarak tanımlar ve dağılımdan arka arkaya birçok örnek alarak çıktı hesaplanır. Girdi değişkenler bir olasılık dağılıma sahip olduğundan, model çıktısı da bir istatistiksel dağılıma dönüşmektedir. Modelim çıktısı, tek bir beklenen değer yerine, bütün sonuçların olasılıklarıyla birlikte temsil edildiği bir olasılık dağılımı olarak ortaya çıkmaktadır. Böylece, model girdileri nokta tahminlere dayanan deterministik modellemeye kıyasla, Monte Carlo karar modeli sonuçları karar alıcılara çok daha zengin bilgi sağlayabilir (<http://riskdynamicsconsultancy.com>). Simülasyon sonucunda elde edilen tahmini değerler (çıktı değişkenler) olasılık (veya histogram) dağılımı olarak temsil edilebilir veya güvenilirlik tahminleri, hata çizgileri, tolerans değerleri ve güven aralıklarına dönüştürülebilir. Simülasyon modelleri problemlerin analitik modellerle çözülemeyecek derecede karmaşık olduğu durumlarda veya analitik modellerin kurulup, kullanılmadığı durumlarda tercih edilir. MCS’ye göre bağımsız değişkenlerin olasılık dağılımları dikkate alınarak kurulan modelde nihai çıktı değişkene ait olasılık dağılımlı bir sonuç elde edilmektedir (Vose, 2000: s.16; Charnes, 2012: s.4).

### 3.1 Araştırmaya Ait Girdi Parametreleri ve Varsayımlar

Çalışmanın uygulama kısmında bir RES yatırımının ekonomik karlılığına ait testlerden olan geri ödeme süresi test edilecektir. Bunun için Güney Marmara Bölgesi’nde bulunan Balıkesir

ilinde faaliyetlerini sürdüren bir RES yatırımının verilerinden yapılmıştır. RES yatırımcısı firma ismi RES10 olarak tanımlanmıştır. RES10 firmasının kurulu santrallerinden kapasitesi 3 MW olan 15 adet rüzgar türbinin verileri çalışmada kullanılmıştır. 15 adet türbin seçimi aynı RES sahasında faaliyet gösteren türbinlerin içerisinde seçilmiştir. Analizi yapılacak türbinlerin kodları WTG01, WTG02, WTG03, WTG04, WTG05, WTG10, WTG12, WTG22, WTG24, WTG25, WTG29, WTG30, WTG32, WTG34, WTG38 şeklinde verilmiştir. Seçilen 15 adet türbinin üretim verileri, rüzgar hızı verileri 01.01.2012 yılından 31.12.2015 yılına kadar 10'ar dakikalık frekanslar halinde alınmıştır. Bir rüzgar türbinin ekonomik durumu en temelde ürettiği elektrik enerjisine bağlıdır. Elektrik üretiminde en temel ve en önemli etkileyici girdi rüzgar hızıdır.

Şekil 2'te seçilen 15 türbinin çalışma dönemi içerisinde aylık ortalama rüzgar hızına bağlı aylık ortalama üretimlerinin dağılımına ait regresyon doğrusu gösterilmiştir. Aylık ortalama rüzgar hızı (m/sn) yatay ekseninde, aylık ortalama üretim miktarında (kWh) dikey ekseninde gösterilmiştir. Daha sonra eğilim çizgisi eklenerek regresyon doğrusu oluşturulmuştur. Aylık ortalama üretimi bir çıktı olarak aldığımızda rüzgar hızındaki bir birimlik artış veya azalış üretim miktarını 82.319.692 kWh arttırmakta veya azaltmaktadır. Aynı RES sahasında farklı ortalamalarda rüzgar hızlarına sahip olan rüzgar türbinlerinin elektrik üretim miktarlarında farklı olmaktadır. Bu farklılık çok önemli bir sonuçtur. Aynı bölgede her bir türbinin aynı üretimi sağlamasını beklemek yanlıştır.



Şekil 2: 15 Adet Rüzgar Türbinine Ait Rüzgar Hızı ve Üretim Miktarı

Şekil 2’te seçilen 15 türbinde görüldüğü gibi aynı bölgede benzer üretim kapasitesine sahip rüzgar türbinlerinin farklı rüzgar hızına sahip olmalarından kaynaklı olarak farklı düzeyde üretim miktarlarına sahip oldukları görülmektedir.

Çalışmanın uygulama kısmı 3 aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla;

Birinci aşamada, seçilen 15 adet türbinin 01.01.2012-31.12.2015 tarihleri arasındaki gerçekleşen 10’ar dakikalık üretim verileri aylık üretim verisine dönüştürülmüştür. Böylece her bir rüzgar türbini için aylık üretim verisi oluşturulmuştur. Her bir rüzgar türbinin 48 aylık gerçekleşmiş aylık üretim verisi hesaplanmıştır. Verideki bu dönüşümden sonra her bir türbinin 48 gözlemden oluşan aylık üretim sonuçlarının nasıl bir dağılım gösterdiği ve karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla Rockwell Software tarafından geliştirilen ARENA programında veriler analiz edilmiştir. ARENA program sonuçlarında her bir türbinin karakteristik durumu belirlenmiş ve türbinlere ait üretimin nasıl bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

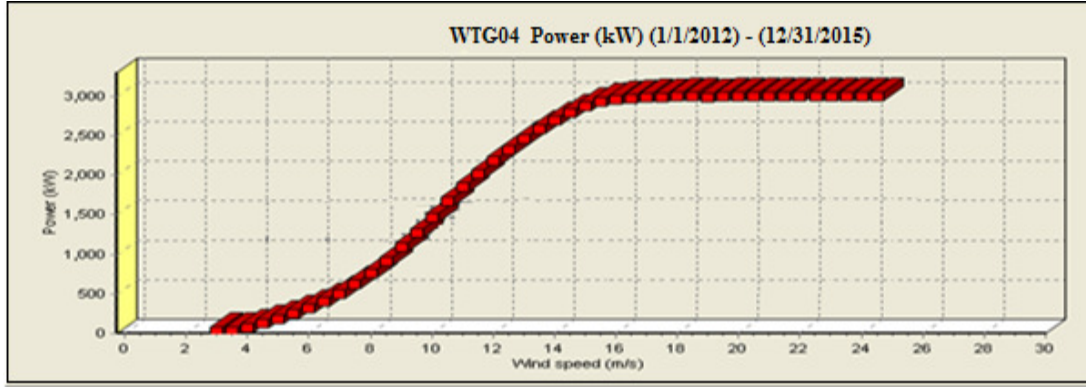
İkinci aşamada, seçilen 15 adet rüzgar türbininin ARENA sonuçlarına bağlı kalınarak türbinlerin gelecekteki üretimi MİNİTAB programı ile tahmin edilmiştir. MİNİTAB programında her bir rüzgar türbininin gerçekleşmiş 48 aylık üretim değeri referans alınarak türbinlerin gelecek aylardaki üretim değerleri aylık olarak tahmin edilmiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında rüzgar türbininin ekonomik ömrü ortalama 25 yıl olarak ele alınmaktadır. Bu durumda ikinci bölümde MİNİTAB programı ile geçmiş 4 yılın aylık üretim verileri ile gelecek 21 yılın aylık üretim verileri tahmin edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, rüzgar türbininin 25 yıllık ekonomik ömrü içerisinde 4 yılın gerçekleşmiş aylık verileri ile 21 yılın tahmin edilen aylık verileri yıllık veriye dönüştürülmüştür. 15 adet rüzgar türbininin yıllık üretim verilerinden yola çıkarak RES10 yatırımında bulunan her bir türbinin geri ödeme süresi simülasyon analizi ile test edilmiştir. Çalışmanın uygulama aşamasının bu kısmında simülasyon işlemleri için, Oracle şirketi tarafından geliştirilmiş yatırım projeleri değerlendirme programı olan Crystal Ball adlı yazılım kullanılmıştır.

Yukarıdaki bahsi geçen üç aşama 15 türbinin herbiri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Uygulamanın aşamaları örnek olması açısından 15 adet türbinden biri olan WTG04 kodlu rüzgar türbininde gösterilmiştir.

### 3.2 WTG04 Rüzgar Türbininin Ekonomik Analizine Ait Girdiler

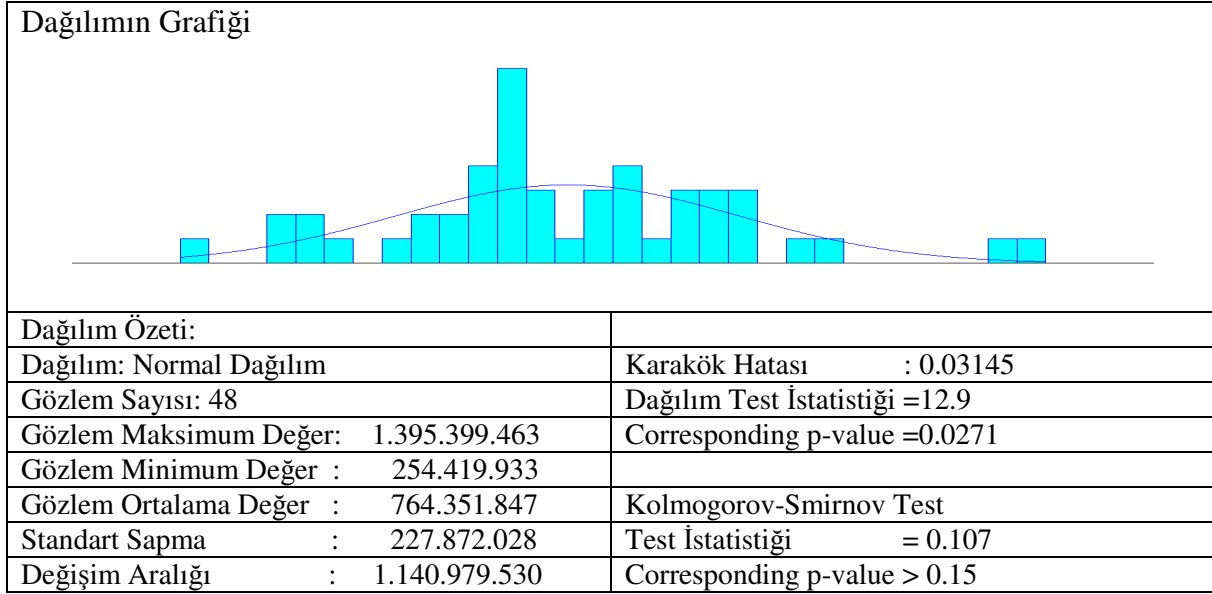
WTG04 kodlu rüzgar türbini RES10 yatırımı içerisinde seçilen 15 adet rüzgar türbinlerinden birisidir. WTG04 kodlu rüzgar türbini diğer türbinler içerisinde elektrik üretimi dikkate alındığında geçmiş 4 yıl içerisinde en iyi performans gösteren türbindir. Şekil 3'te WTG04 türbine ait olan güç eğrisi (Power Curve) gösterilmiştir. WTG04 kodlu türbinin 01.01.2012-31.12.2015 yılları arasında frekans olarak 10'ar dakikalar gerçekleşmiş rüzgar hızı ve enerji üretim değeri kullanılarak ilgili periyot aralığındaki güç eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 3: WTG04 Rüzgar Türbininin Güç Eğrisi

Şekil 3'te WTG04 kodlu türbine ait güç eğrisinin yatay ekseninde rüzgar hızı (m/sn) olarak yer alırken dikey ekseninde üretim (kW) olarak gösterilmektedir. WTG04 kodlu türbin rüzgar hızı yaklaşık olarak 2.4 m/sn olduğunda üretime başlamakta, rüzgar hızı yaklaşık olarak 16,5 m/sn olduğunda tam kapasiteye erişmekte ve rüzgar hızı 25 m/sn olduğunda türbin üretimi durdurmaktadır.

WTG04 kodlu rüzgar türbinine ait uygulanan analizin birinci aşamasında rüzgar türbinin 01.01.2012-31.12.2015 yılları arasındaki gerçekleşen 10'ar dakikalık üretim verileri aylık üretim verisine dönüştürülmüştür. Böylece WTG04 rüzgar türbini için aylık üretim verisi oluşturulmuştur. Verideki bu dönüşümden sonra, türbinin 48 gözlemden oluşan aylık gerçekleşmiş üretim sonuçlarının nasıl bir dağılım gösterdiği ve karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla Rockwell Software tarafından geliştirilen ARENA programında veriler analiz edilmiştir. ARENA program sonuçlarında her türbinin karakteristik durumu belirlenmiş ve türbinlere ait üretimin nasıl bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. WTG04 rüzgar türbini için ARENA sonucu Şekil 4'te gösterilmiştir.



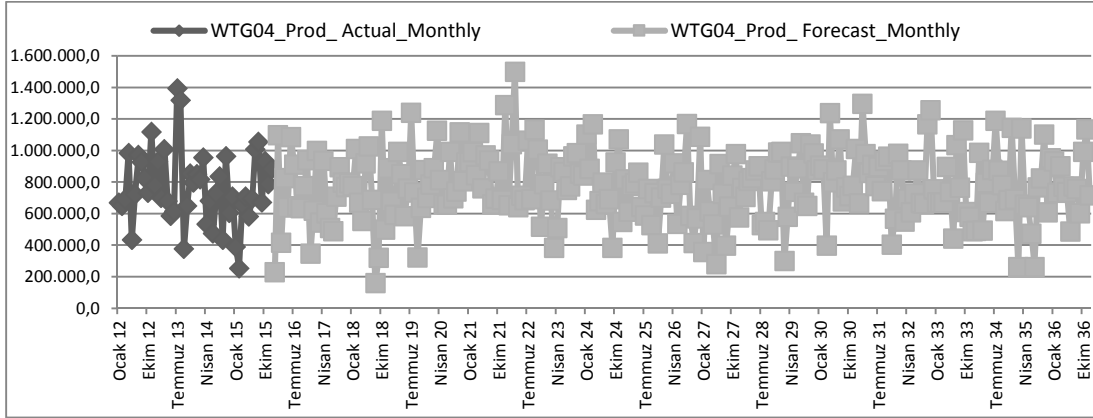
#### Şekil 4: WTG04 Rüzgar Türbinine Ait ARENA Analizi Sonuçları

Şekil 4'te WTG04 türbinine ait 48 aylık gözlemlerin ARENA programı sonuçları yer almaktadır. Sonuçlara göre WTG04 türbinin aylık gerçekleşen maksimum üretim değeri 1.395.399.463 watt, gerçekleşen minimum üretim değeri 254.419.933 watt, gerçekleşen ortalama üretim değeri 764.351.847 watt, standart sapması 227.872.028 watt ve gerçekleşen aylardaki değişim aralığı 1.140.979.530 watt'tır. WTG04 türbinin dağılımının üçgen dağılımına uygunluğunu test istatistiğinde görülmektedir. Test istatistiğindeki değer (corresponding p-value) "0.0271" olup "0.05" den küçük olduğundan dolayı test istatistiğinin normal dağılıma uygun olduğu kabul edilmektedir.

Daha sonra ARENA sonuçlarındaki analiz çıktıları referans alınarak MİNİTAB programı ile türbinin gelecek üretim değerleri tahmin edilmiştir. Türbinin gelecek üretim tahmini yapılırken türbine ait geçmiş 48 gözlemin karakteristik yapısı ve istatistiki değerleri dikkate alınarak gelecek 252 aylık üretimi (türbinin geriye kalan 21 yıllık üretiminin tahmini) hesaplanmıştır. Analizin bu aşaması çalışmanın ikinci aşamasını oluşturmaktadır.

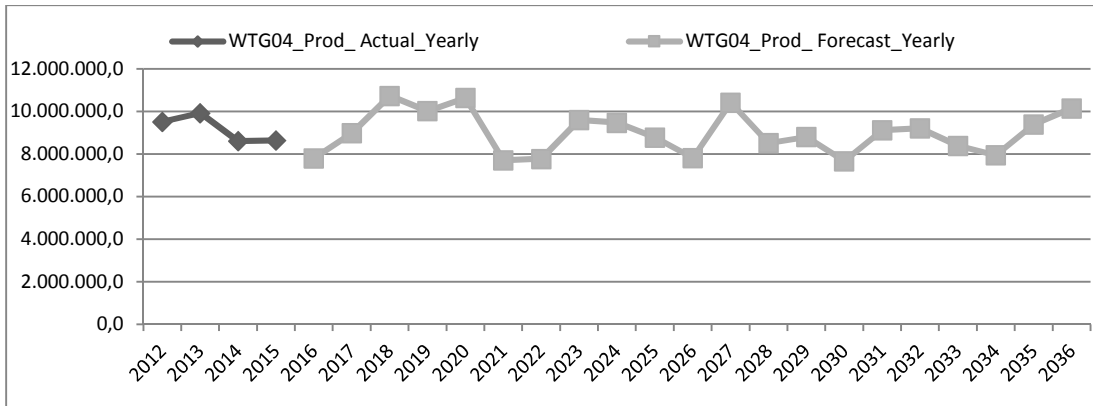
RES10 yatırımı yapılmadan ölçüm direklerinden alınan ortalama rüzgar hızı verileri, yatırım yapıldıktan sonra türbinden alınan rüzgar hızı verileri ile yaklaşık değerlerde olduğu görülmüştür. Bununla birlikte Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün Balıkesir ili için hazırladığı rüzgar enerjisi potansiyeli atlasındaki verilerde dikkate alındığında RES yatırımının bulunduğu bölgedeki rüzgar hızı ortalama olarak yaklaşık 9 (m/sn) olup bu rüzgar hızı yatırım yeri için ölçülen rüzgar hızı verileri ile de benzerlik göstermektedir. Rüzgar üretiminde en önemli girdi rüzgar hızıdır. Rüzgardan elde edilen enerji, rüzgar hızının küpüyle doğru

orantılıdır (Yılmaz vd., 2005: s.1). Çalışmada rüzgar hızının gelecekte de değişmeyeceği varsayılarak üretimin bu rüzgar hızından sağlanacağı düşünülmüştür.



**Şekil 5: WTG04 Rüzgar Türbininin Aylık Bazda Gerçekleşmiş ve Tahmini Üretim Değerleri (kWh)**

Şekil 5’de MİNİTAB sonucunda tahmini aylık üretim değerleri ile gerçekleşmiş üretim değerlerinin aylık cinsten değerleri gösterilmiştir. Daha sonra aylık veriler yıllık veriye dönüştürülerek yıllık bazda üretim değerleri elde edilmiştir. Yıllık üretim değerleri Şekil 6’da gösterilmiştir.



**Şekil 6: WTG04 Rüzgar Türbininin Yıllık Bazda Gerçekleşmiş ve Tahmini Üretim Değerleri (kWh)**

Analizin üçüncü aşamasında, rüzgar türbinlerinin gerçekleşmiş ve tahmini üretim değerlerine ait sonuçlarından yola çıkarak yatırımın ekonomik analizi yapılacaktır. Bunun için üçüncü aşamada ekonomik analizi yapabilmek için Crystall Ball programından yararlanılmıştır. Crystal Ball programı, Microsoft Excel programı üzerinde bir eklenti olarak çalışmaktadır. Programın

çalıştırılabilmesi için, rüzgar enerjisi yatırımına ait girdilerin Excel üzerinde oluşturulması gerekir.

**Tablo 1: Rüzgar Enerjisi Yatırımında Varsayım Olarak Tanımlanan Girdi Değişkenler ve WTG04 Rüzgar Türbinine Ait Varsayımlar**

<b>VARSAYIMLAR</b>		
<b>Üretim Parametreleri</b>	<b>Değer</b>	<b>Ünite</b>
Ünite Sayısı	1	
Birim Ünite Gücü	3	MW
Elektrik Satış Fiyatı	0,073	USD/kWh
Yerel Teşvikler (Rotor ve Nasel)	0,013	USD/kWh
Yerel Teşvikler (Jeneratör)	0,01	USD/kWh
Yerel Teşvikler (Türbin)	0,008	USD/kWh
Yerel Teşvikler (Türbin Kulesi)	0,006	USD/kWh
Euro/Dolar Kuru	1,26	(Euro/Dolar)
Kapasite Kullanım Oranı	40,95%	
İlk Yıl Elektrik Üretimi	8.748.612	(kWh/KWp )/Ünite
<b>İşletme Giderleri</b>		
Bakım Onarım Giderleri	30.000	Euro / Ünite
Güvenlik Giderleri	1.200	USD/Çalışan Per./Aylık
Güvenlik Çalışan Sayısı	0,25	Çalışan Personel
Sistem Kullanım Giderleri	35.000	USD/Ünite-Yıl
Elektrik Kalite Gideri	2.900	USD/Ünite-Yıl
Sistem İşletim Gideri	225	USD/ Ünite-Yıl
Diğer İşletim Giderleri	820	USD/ Ünite-Yıl
Faaliyet Giderleri Artış Oranı	1%	%
<b>Yatırım Harcamaları</b>		
EPC Maliyeti	900.000	Euro/ MW
EPC KDV'ye Ödenen Oran	20,00%	
Türbin Şalt Saha Maliyeti	50.000	USD/Ünite
Arazi İhtiyacı(Kamulaştırma)	10.000	m <sup>2</sup> /Ünite
Arazi Maliyeti	3,00	USD /m <sup>2</sup>
Türbine Erişim Yollarının Maliyeti	100.000	USD/Ünite
Proje Geliştirme Maliyeti	25.000	USD/ MW
Lisans Ücretleri	10.000	USD/ MW
Bakım Onarım Ekipmanları	25.000	USD/Ünite
Diğer Maliyetler	10.000	USD/Ünite
<b>Finansal Değişkenler</b>		
Yıpranma-aşınma oranı	0,50%	%
Faiz Oranı	7,50%	%
Sermaye Rasyosu(Ser./ Top. Kay.)	50,00%	%
İşletme Sermayesi İhtiyacı	100.000	USD/Ünite
Amortisman Süresi	25	Yıl
Enflasyon Oranı - US Dollar	2,00%	
KDV Oranı	18%	
Kurum Vergisi	20,00%	
Özsermaye Beklenti Oranı	12,00%	

RES10 projesinde projede kullanılacak varsayımlar olarak tanımlanan girdi değişkenler her bir türbin için aynı olup Tablo 1’de gösterilmiştir. Rüzgar enerjisi yatırımında kullanılan parametreler literatürdeki kaynaklardan yararlanılarak oluşturulmuştur (Tansi, 2012: s.62). Tablo 1’de WTG04 kodlu rüzgar türbinine ait varsayım olarak tanımlanan girdi değişkenler üretime ait parametreler, işletme giderleri, yatırım harcamaları ve finansal değişkenler olmak üzere dört grup altında toplanmıştır:

WTG04 kodlu rüzgar türbininin üretimine ait parametrelerden biri birim ünite gücü olup türbinin birim ünite gücü 3 MW’dır. Bir diğer girdi elektrik satış fiyatı olup birim kW için YEKDEM tarafından RES’ler için alım garantisi olarak belirlenen 7,3 cent(\$ ) alınmıştır. Elektrik alım fiyatının yanında RES yatırımlarında yerli aksam kullanmak birim elektrik satışı için teşviklerde yer verilmiştir. RES yatırımında yerli rotor ve nasele kullanılması halinde birim kW için 1,3 cent(\$), yerli jeneratör kullanılması halinde birim kW için 1 cent(\$), yerli türbin kullanılması halinde birim kW için 0.8 cent(\$), yerli türbin kulesi kullanılması halinde birim kW için 0.6 cent(\$) teşvik sağlanmaktadır. Üretime ait diğer bir parametrede Euro/Dolar kurudur. 01.01.2012-31.12.2015 tarihleri arasında günlük Euro/Dolar kuru verisi dikkate alınmış olup ilgili tarihlerde kurun ortalama değeri “1.26” dir. Üretim parametrelerinden biride kapasite kullanım oranıdır. Kapasite kullanımını iyi durum, normal durum ve kötü durum senaryoları için dikkate alınan bir değişkendir.

WTG04 kodlu rüzgar türbinine ait ikinci girdi değişkenler grubunda işletme giderleri yer almaktadır. İşletme giderlerinde ünite başına yıllık bakım onarım gideri 30.000 Euro olarak belirlenmiştir. RES yatırımında çalışan personel sayısı ortalama olarak 4 türbin için bir kişi olduğu varsayılmaktadır. Çalışan kişinin aylık masrafı ortalama olarak 1.200 dolar olarak belirlenmiştir. İşletmenin faaliyet masrafları olarak RES yatırımlarında kamuya yıllık olarak ödenen ünite başına, 35.000 dolar sistem kullanım gideri, 2.900 dolar elektrik kalite gideri, 225 dolar sistem işletim gideri yapılmaktadır. Faaliyet giderlerine ilaveten harici olarak ünite başına 820 dolar türbinin çalışmasına ait diğer olağan dışı işletim giderleri olduğu varsayılmıştır. Faaliyet giderlerinde her yıl %1 oranında artış olacağı varsayılmıştır.

WTG04 kodlu rüzgar türbinine ait üçüncü girdi değişken grubu ise yatırım harcamalarıdır. RES projeleri için yatırım ilk üretime geçinceye kadar türbinin kurulması ve elektrik iletiminin tamamlanması için yapılan harcamaların tamamıdır. Yatırım harcamaları içerisinde türbin maliyeti MW başına 900.000 euro olarak belirlenmiştir. Türbinin kurulacağı yerle ilgili zemin çalışmasında şalt saha maliyeti için birim türbin başına 50.000 dolarlık maliyetin olduğu



varsayılmıştır. Türbin başına 10.000 m<sup>2</sup> arazi kullanımı olup birim m<sup>2</sup> için 3 dolar ödenmiştir. Türbine erişim yolunun açılması için türbin başına 100.000 dolar masraf yapılmaktadır. RES yatırımının yapımı öncesinde ön fizibilite ve proje geliştirme sürecinde üretim hacmi MW başına 25.000 dolar harcama yapılmaktadır. Projeye başlanırken 10.000 dolar MW başına lisans ücreti ödenmektedir. Bunlara ilaveten yatırım harcamaları içerisinde ünite başına bakım onarım ekipman alımı ile ilgili olarak 25.000 dolarlık harcama yapılacağı varsayılmıştır. Son olarak ünite başına diğer maliyetler 10.000 dolar olarak varsayılmıştır.

WTG04 kodlu rüzgar türbinine ait dördüncü girdi değişken grubu yatırımın finansmanı ile ilgilidir. RES yatırımında her yıl bir önceki yıla göre kapasite kaybı olduğu varsayılmıştır. Kapasite kaybı olarak yıpranma ve aşınma oranı % 0,5 olarak seçilmiştir. Yatırım finansmanı için borçla veya özsermaye ile finansman seçenekleridir vardır. Borçla finansman olarak merkez bankasının gecelik borç alma faizi dikkate alınmıştır. Borçla finansman oranında yıllık % 7,5 girdi değişken olarak kullanılmıştır. Bir diğer kaynak maliyeti de özsermaye maliyetidir. Özsermaye maliyeti, Varlık Fiyatlama Modeli'nden yararlanılarak yıllık yaklaşık olarak %12 alınmıştır. İşletmenin çalışma sermayesinin ünite başına 100.000 Dolar olduğu varsayılmıştır. Yatırımın amortisman süresi 25 yıl olup yatırım ekonomik ömrü boyunca amortismanın eşit olarak ayrıldığı düşünülmüştür. Dolar bazında yıllık enflasyon oranı %2 olarak alınmıştır. Yatırımda vergi oranı olarak KDV oranı %18, kurumlar vergisinde %20 olarak alınmıştır.

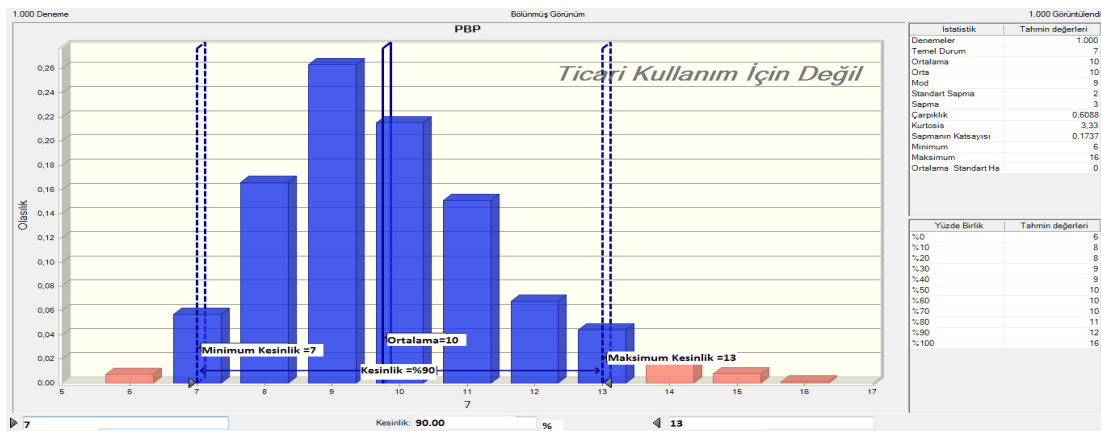
Yukarıda girdi değişken olarak tanımlanan varsayımlar açıklanmıştır. Finansal modellemede bu varsayımlar girdi değişken olarak kullanılmaktadır. Yapılacak simülasyon analizi için bu varsayımların olasılık dağılımlarının tek tek tanımlanması gerekmektedir. Yatırımı etkileyen bu girdi değişkenlerden 27 adedi için olasılık dağılımları belirlenmiş ve Crystal Ball programında girdi değişken olarak tanımlanmıştır. Girdi değişken bir noktada yatırımı etkileyen bağımsız değişken olarak tanımlanmaktadır.

Girdi değişkenlerden birincisi elektrik satış fiyatı olup birim elektrik satışın 7.3 cent dolardan YEKDEM'e satış fiyatını ifade etmektedir. Elektrik satış fiyatı sabit bir fiyat olduğundan dolayı olasılık dağılımında sabit seçilmiştir. Bağımsız değişkenlerden ikincisi, üçüncüsü, dördüncüsü ve beşincisi sırasıyla Tablo 1'de ki teşvikler olup olasılık dağılımı elektrik satış fiyatında olduğu sabit seçilmiştir. Bağımsız değişkenlerden altıncısı Euro/Dolar kurudur. Ortalama kur 1.26 olup normal dağılım sergilediği varsayımında standart sapması 0.02 olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerden yedincisi olan kapasite kullanımının normal dağılım sergilediği varsayılmıştır. Kapasite kullanımı simülasyonu farklı senaryolara göre yaparken önemli bir girdi değişkendir.

Faaliyet giderlerinden bakım onarım giderleri, güvenlik giderleri, güvenlik çalışan sayısı, sistem kullanım giderleri, elektrik kalite gideri, sistem işletim gideri ve diğer işletim giderlerinin tamamının normal dağılım sergilediği varsayılmıştır. Girdi değişkenlerden biride türbin maliyetidir. Türbin maliyet değerinin dağılımının üçgen dağılıma sahip olduğu tahmin edilmektedir. Türbin maliyetinin MW başına minimum değeri 850.000 Euro, normal durum değerinin 900.000 Euro, kötü durum değerinin 950.000 Euro olduğu varsayılmıştır. Diğer yatırım harcamlarındaki girdi değişkenler ve finansal değişkenler için normal dağılıma sahip bir olasılık dağılımının olduğu varsayılmıştır. Bütün girdi bağımsız değişkenlere ait olasılık dağılımları değişkenlerin karakteristik özelliklerine bağlı olarak Crystall Ball programında oluşturulmuştur. Bağımsız değişken olarak 27 adet değişken seçilmiş olup bunlar; elektrik satış fiyatı, yerel teşvikler (rotor ve nasele), yerel teşvikler (jeneratör), yerel teşvikler (türbin), yerel teşvikler (türbin kulesi), euro/dolar kuru, kapasite kullanım oranı, bakım onarım giderleri, güvenlik giderleri, güvenlik çalışan sayısı, sistem kullanım giderleri, elektrik kalite gideri, sistem işletim gideri, diğer işletim giderleri, türbin maliyeti, türbin şalt saha maliyeti, arazi ihtiyacı (kamulaştırma), arazi maliyeti m<sup>2</sup> başına, türbine erişim yollarının maliyeti, proje geliştirme maliyeti, lisans ücretleri, bakım onarım ekipmanları, diğer maliyetler, yıpranma aşınma oranı, faiz oranı, işletme sermayesi ihtiyacı, özsermaye beklenti oranıdır. Belirlenen 27 bağımsız değişkenler ile bir finansal model oluşturularak bağımlı (çıktı) değişken olan geri ödeme süresi bütün türbinler için Crystall Ball programı yardımı ile simüle edilmiştir.

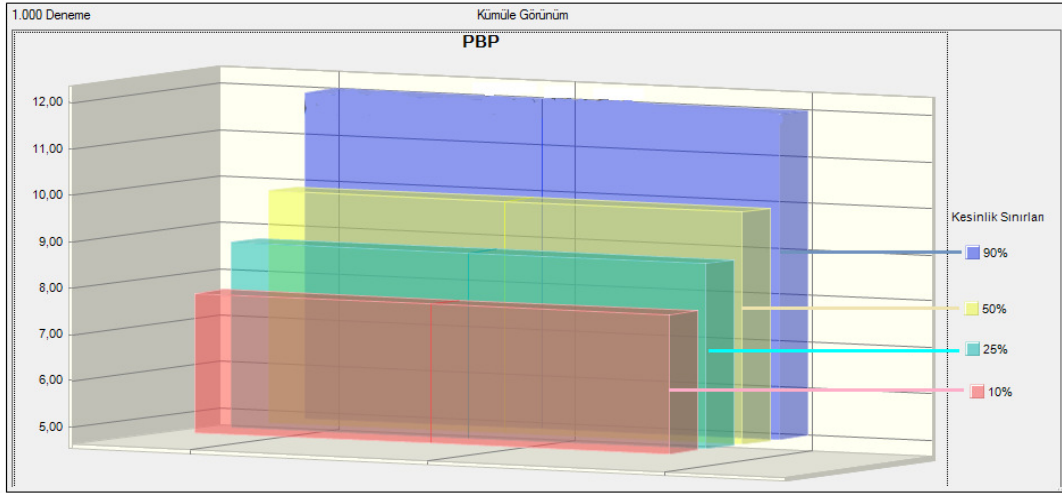
### 3.3 WTG04 Rüzgar Türbininin Ekonomik Analizi Sonuçları

WTG04 kodlu rüzgar türbini için tahmin sonuçları, eğilim sonuçları, duyarlılık analizi sonuçları ve değişkenlere ait korelasyonu gösteren matris sonuçları aşağıda sırasıyla gösterilmiştir.



### Şekil 7: WTG04 Kodlu Rüzgar Türbininin Normal Durum Sonuçlarına Göre Yatırımın Geri Ödeme Süresinin (PBP) Tahmin Sonuçları

Şekil 7’de Minitab programı sonucunda gelecek üretim tahminlerini de dikkate alan üretim sonuçlarına göre yatırımın geri ödeme süresinin tahmin sonuçları gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda ortalama geri ödeme süresi 8 yıl olarak bulunmuştur. %90 ihtimalle geri ödeme süresi minimum 7 ve maksimum 13 yıldır. Türbinler için ekonomik ömür 25 yıl olarak belirlenmiştir. Yatırım projelerinde geri ödeme süresinin en kötü haliyle yatırımın ekonomik ömrü içinde sağlanması beklenmektedir. Yatırımın ekonomik ömrü içerisinde karşılanması yatırımın kabul edilmesini pozitif yönde etkilemektedir. Dağılım ölçütleri olarak çarpıklık değeri “0.6088” ve basıklık değeri (kurtosis) “3.33” dür. Tahmin değerlerine ait diğer istatistikî değer sonuçları şekil 8’in yanında verilmiştir.

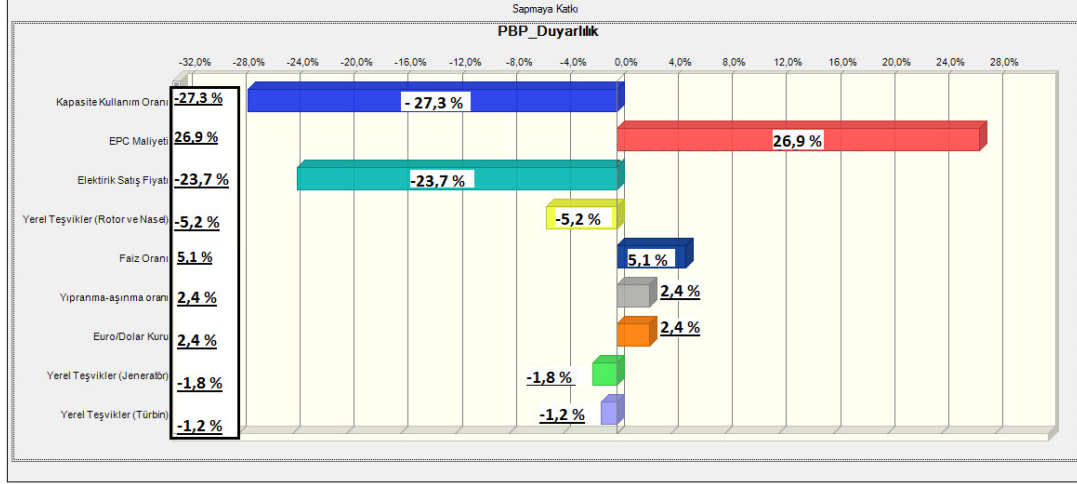


### Şekil 8: WTG04 Kodlu Rüzgar Türbininin Normal Durum Sonuçlarına Göre Yatırımın Geri Ödeme Süresinin (PBP) Eğilim Sonuçları

Şekil 8’de Minitab programı sonucunda gelecek üretim tahminlerini de dikkate alan üretim sonuçlarına göre yatırımın geri ödeme süresinin (PBP) eğilim sonuçları gösterilmiştir. Eğilim sonuçlarına bakıldığında yatırımın geri ödeme süresi, %10 keskinlik sınırları içerisinde yaklaşık olarak 4½ ile 7 yıl aralığında, %25 keskinlik sınırları içerisinde yaklaşık 4½ ile 8½ yıl aralığında, %60 keskinlik sınırları içerisinde 4½ ile 9½ yıl aralığında, %90 keskinlik sınırları içerisinde yaklaşık olarak 4½ ile 12 yıl aralığındadır.

Şekil 9’da Minitab programı sonucunda gelecek üretim tahminlerini de dikkate alan üretim sonuçlarına göre yatırımın geri ödeme süresine ait (PBP) duyarlılık analizi sonuçları gösterilmiştir. Yatırımın geri ödeme süresini en çok etkileyen değişkenler duyarlılık analizi

yardımıyla belirlenmektedir. Duyarlılık analizi sonuçlarına göre yatırımın geri ödeme süresi, “-27,3 %” oranında kapasite kullanma oranı, “26,9 %” oranında türbin maliyetine, “-23,7 %” oranında elektrik satış fiyatı, “-5,2 %” oranında rotor ve nasele teşviklerine, “5,1 %” oranında faiz oranı, “2,4 %” oranında yıpranma ve aşınma, “2,4 %” oranında Euro/Dolar kuru, “-1,8 %” yerel teşvikler (jeneratör), “-1,2 %” oranında yerel teşvikler (türbin) duyarlıdır.



**Şekil 9: WTG04 Kodlu Rüzgar Türbininin Normal Durum Sonuçlarına Göre Yatırımın Geri Ödeme Süresinin (PBP) Duyarlılık Analizi Sonuçları**

Yatırımın geri ödeme süresi için bu girdi değişkenler önemlidir. Yatırım değerlemesinde kriter olarak geri ödeme süresinin mümkün olduğunca kısa olması istenmektedir. Girdi değişkenlerden gelir sağlayıcı veya arttırıcı olanlar geri ödeme süresini kısaltan bir diğer ifade ile, negatif etkilemekteyken nakit çıkışına neden olan veya nakit çıkışını arttırıcı değişkenler geri ödeme süresini uzatan bir diğer ifade ile pozitif (geri ödeme süresini arttırıcı şekilde) etkilemektedir.

Şekil 10’da Minitab programı sonucunda gelecek üretim tahminlerindeki dikkate alan üretim sonuçlarına göre yatırımın geri ödeme süresini (PBP) duyarlılık analizi sonuçları da dikkate alınarak değişkenlere ait korelasyon matrisi gösterilmiştir. Korelasyon matrisi sonuçlarında geri ödeme süresi, elektrik satış fiyatı ile “-0,3396”, türbin maliyeti ile “0,3615”, Euro/Dolar kuru ile “0,1078”, faiz oranı ile “0,1569”, kapasite kullanım oranı “-0,3647”, yerel teşvik (rotor ve nasele) “-0,1593” oranında korelasyona sahiptir. Geri ödeme süresini etkileyen girdi değişkenlerinden nakit girişine neden olan değişkenlerle negatif yönlü korelasyon ilişkisi varken, nakit çıkışına neden olan değişkenlerle pozitif korelasyon ilişkisi vardır. WTG04 kodlu rüzgar türbini için gerçekleşmiş ve gelecek üretim tahminlerindeki dikkate alındığı normal durum

sonuçlarına göre simülasyon analizi yapılmıştır. Değişkenlerle yapılan diğer duyarlılık analizlerinde, projeye en fazla duyarlılığa sahip olan değişkenlere genel olarak bakıldığında Euro/Dolar kuru, özsermaye maliyeti ve türbin maliyeti öne çıkmaktadır.



**Şekil 10: WTG04 Kodlu Rüzgar Türbininin Normal Durum Sonuçlarına Göre Geri Ödeme Süresini (PBP) Etkileyen Değişkenlere Ait Korelasyon Matrisi**

Girdi değişkenlerden biride yatırımın nakit akışlarını belirleyen kapasite faktörüdür. Bütün bunlar dikkate alınarak WTG04 kodlu rüzgar türbini için Minitab programı gelecek üretim tahminleri dikkate alındığında normal üretim durumu sonucunda yapılan simülasyondan başka iki farklı senaryo içinde simülasyonlar tekrar yapılmıştır. Toplamda üç farklı senaryoda, yatırımın iyi durumu, normal durumu ve kötü durumları dikkate alınmıştır. Bu üç senaryo için yatırımı birbirinden farklı kılan girdi değişkenlerden (bağımsız değişkenlerden), kapasite kullanım oranı, türbin maliyeti, Euro/Dolar kuru, özsermaye maliyetine birbirinden farklı değerler verilerek simülasyonlar tekrardan yapılmıştır.

**Tablo 2: İyi Durum, Normal Durum ve Kötü Durum Senaryoları İçin Girdi Değişkenlerindeki Değerler**

Girdi Değişkenler	Senaryolar		
	İyi Durum	Normal Durum	Kötü Durum
Kapasite Kullanım Oranı	Maksimum Kapasite	Ortalama Kapasite	Minimum Kapasite
Türbin Maliyeti	800.000 Euro/MW	900.000 Euro/MW	1.000.000 Euro/MW
Euro/Dolar Kuru	1,15	1,26	1,35
Özsermaye Maliyeti	10 %	12 %	15 %

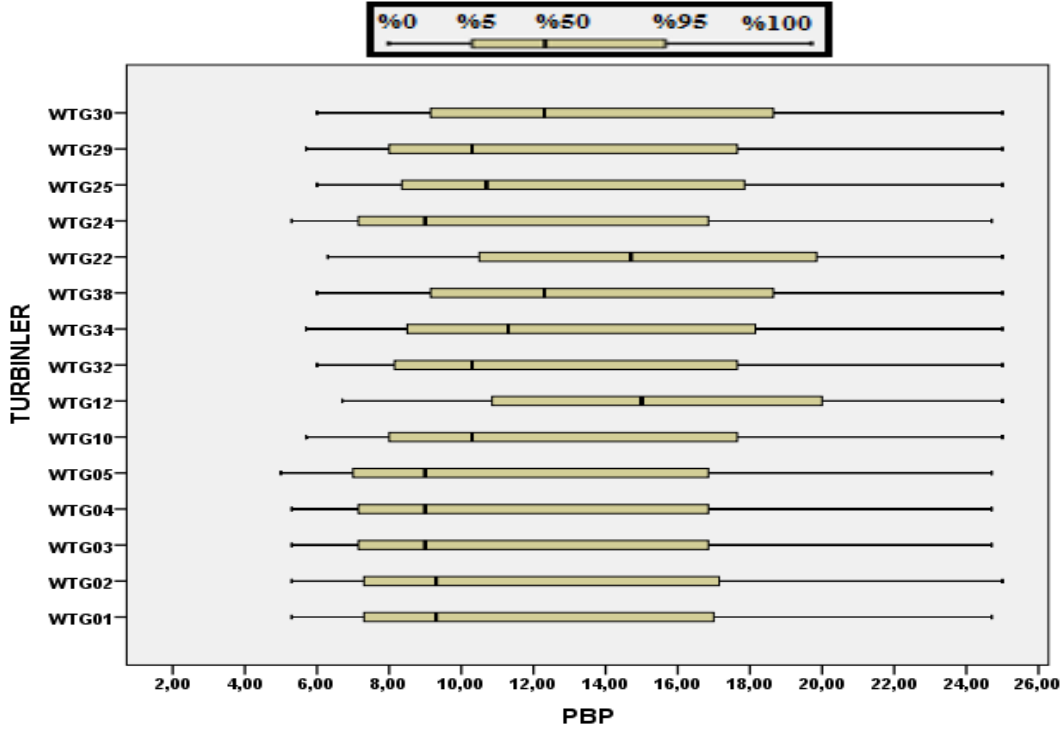
Tablo 2’de üç farklı senaryo için girdi değişkenlerdeki değerlerin alternatif değerleri gösterilmiştir. Girdi değişkenlerden kapasite kullanım oranında yatırım için oluşturulan üç senaryo için kapasite kullanım değerleri belirlenmiştir. İyi durum senaryosu için kapasite kullanım oranı maksimum kapasite, normal durum senaryosu için ortalama kapasite, kötü durum senaryosu için kapasite kullanım oranı minimum kapasite olarak belirlenmiştir. Maksimum değer, ortalama değer ve minimum değer Minitab programı sonucunda yatırımın ekonomik ömrü içerisindeki üretim tahminlerinden oluşturulan kapasite kullanım değerlerinden elde edilmiştir. WTG04 kodlu rüzgar türbini için Minitab programı sonucunda gelecek üretim tahminlerini dikkate alan üretim sonuçlarına uygulanan Crystal Ball programı aşamaları üç farklı senaryoya uygulanarak RES10 yatırımındaki bütün türbinler için simülasyon analizi gerçekleştirilmiştir. WTG04 kodlu rüzgar türbini için yapılan bütün adımlar RES10 yatırımından seçilen 15 türbinin tamamı için yapılmış ve her bir türbinin geri ödeme süresi üç farklı senaryo dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Tablo 3’te rüzgar türbinlerinin iyi durum, normal durum ve kötü durum senaryoları için geri ödeme süreleri ve üç farklı senaryo için Minitab programı sonucu türbinlerin kapasite kullanımları gösterilmiştir.

**Tablo 3: Rüzgar Türbinlerinin İyi Durum, Normal Durum ve Kötü Durum Senaryoları İçin Geri Ödeme Süreleri ve Üç Farklı Senaryoya Göre Kapasite Kullanım Oranları**

		WTG01	WTG02	WTG03	WTG04	WTG05	WTG10	WTG12	WTG32	WTG34	WTG38	WTG22	WTG24	WTG25	WTG29	WTG30
Geri Ödeme Süresi	Normal Durum	9,3	9,3	9,0	9,0	9,0	10,3	15,0	10,3	11,3	12,3	14,7	9,0	10,7	10,3	12,3
	İyi Durum	5,3	5,3	5,3	5,3	5,0	5,7	6,7	6,0	5,7	6,0	6,3	5,3	6,0	5,7	6,0
	Kötü Durum	24,7	25,0	24,7	24,7	24,7	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	24,7	25,0	25,0	25,0
Kapasite Kullanım Oranı (%)	Normal Durum	39,3	37,5	39,2	40,8	42,5	32,7	27,1	30,9	34,6	30,2	27,9	39,3	31,9	33,9	30,4
	İyi Durum	29,8	22,1	29,4	29,1	28,9	23,6	19,2	22,7	20,8	22,0	19,8	28,3	24,3	24,9	20,3
	Kötü Durum	33,9	32,3	33,2	34,3	34,8	28,5	23,2	27,6	26,9	25,1	22,6	32,8	27,6	29,5	25,2

Tablo 3’te rüzgar türbinleri verilen kodları ile sütunlarda yer almaktadır. Satırda ilk grupta türbinlerin üç farklı senaryoya göre geri ödeme süreleri gösterilmektedir. İkinci grupta ise türbinlerin üç farklı senaryoya göre Minitab programı sonucu elde edilen üretim değerleri dikkate alındığında kapasite kullanım oranı gösterilmektedir. Tablo 4’ün verileri SPSS programına yüklenerek grafiklerle gösterimi aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 11’de 15 adet rüzgar türbininin her birine ait üç farklı senaryoya (iyi durum, normal durum ve kötü durum) göre oluşan değerlerle her bir türbininin geri ödeme süresi gösterilmiştir. Boxplot sonuçlarında her bir türbin için kutu içerisinde bulunan medyan değerine göre WTG12, WTG22 türbinleri yaklaşık 15 yıl olup, seçilen 15 türbin içerisinde geri ödeme süresi olarak en kötü değere sahip olan türbinler olarak gözükmektedir.

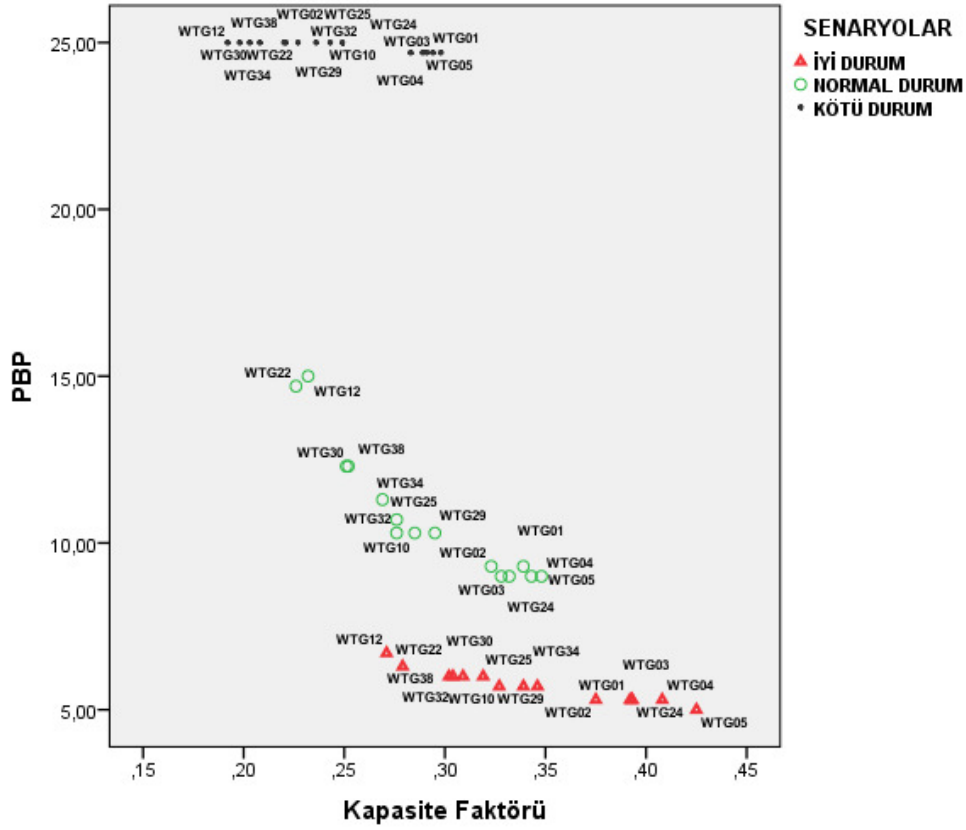


Şekil 11: Türbinlerin Farklı Senaryo Sonuçlarına Göre Geri Ödeme Süresi (PBP)

Diğer türbinlerin boxplot sonuçlarında bulunan medyan değerleri 9 ile 12 yıl arasında yer almaktadır. Medyan değeri normal durum senaryosu sonucuna yakın bir değer olarak alındığında, yatırımın ekonomik süre içerisinde kendini geri amorti edip etmediğini göstermekte kullanılan bir göstergedir.

Şekil 12’de 15 adet rüzgar türbininin üç farklı senaryo durumu dikkate alındığında kapasite faktörlerine göre türbinlerin her birinin geri ödeme süresi (PBP) gösterilmiştir. Kapasite faktörü arttıkça (azaldıkça) türbinin ekonomik performansı artmaktadır (azalmaktadır).





**Şekil 22: Türbinlerin Farklı Senaryolarda Kapasite Faktörlerine Göre Geri Ödeme Süresi (PBP)**

Şekil 12, Şekil 11'deki geri ödeme sürelerinin farklı bir gösterimidir. Buna göre ekonomik durum değerlendirmesinde iyi durum senaryosunda türbinlerin tamamı yaklaşık olarak 5 ile 6 yıl arasında yatırımı karşıladığı (geri ödediği) görülmektedir. Ekonominin normal durum senaryosunda WTG22 ve WTG12 türbinlerinin geri ödeme süresi yaklaşık 15 yıl iken, diğer türbinler için 9 ile 12 yıl aralığında olduğu görülmektedir. Ekonominin kötü durum senaryosunda rüzgar türbinlerinin neredeyse tamamının geri ödeme süresi 25 yıl veya 25 yıldan fazla olduğu görülmektedir.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Yatırım projelerinin tamamında olduğu gibi yenilenebilir enerji projelerinde özellikle RES yatırımlarında proje geliştirme süreci önemlidir. İyi bir finansal modellemede yatırımın sonuçlarını etkileyecek olan girdi parametrelerinin, güncel ve mümkün olduğunca gerçeğe yakın olması gerekmektedir. Finansal modellemeden elde edilen sonuçlardan yararlanarak yatırımın geleceği doğru tahmin edilebilir. Bu da projelerin yatırıma değer olup olmadıkları, projelerin ne oranda verim sağladığı, projenin kendini ne kadar sürede geri ödediği ve projeden ne kadarlık bir net kar elde edilebileceği bilgisine ulaşmakta yardımcı olur.



Bu çalışmada, Güney Marmara Bölgesinde bulunan ve Balıkesir ilinde faaliyet gösteren RES10 olarak adlandırılan yatırımının 2012-2015 yılları arasında 15 adet rüzgar türbini verilerinden yararlanarak, yatırımların türbin bazında ve 15 adet türbinden oluşan yatırımın geri ödeme süresine ait değerlendirme yapılmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde ekonomik göstergeler kırılğan ve daha dinamiktir. Bu durum yatırımları ve yatırımcıları etkilemektedir. Bundan dolayı yatırımları tek bir değerlendirme sonucu ile değil olası bütün durumları dikkate alınarak değerlendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Türkiye’de gelişmekte olan bir ülke olduğundan dolayı RES yatırımına ait ekonomik değerlendirme farklı senaryolar ile yapılmıştır. RES yatırımına ait oluşturulmuş olan finansal model simülasyon analizi ile test edilmiştir. Analize ait ekonomik değerlendirmede 27 adet girdi değişken ile 1 adet çıktı değişken belirlenmiştir. Çıktı değişken yatırım projesinin ekonomik değerlendirmesinde önemli olan geri ödeme süresidir.

RES10 yatırımında aynı bölgede seçilmiş 15 rüzgar türbinin geri ödeme süresi simüle edilmiştir. Aynı maliyetlere ve giderlere katlanılarak kurulan rüzgar türbin yatırımlarının geri ödeme süreleri birbirinden farklı sonuçlar göstermektedir. Bu durum RES yatırımcısı için önemlidir. RES yatırımı için aynı bölgedeki rüzgar türbinlerine ait standart bir ekonomik çıktı elde etmek çoğunlukla zordur. Her ne kadar türbinlerin bulunduğu lokasyon aynı olsa da türbinlerin aldığı rüzgar hızı birbirinden farklı olmaktadır. Bu durum Şekil 2’de net bir şekilde görülmektedir. Seçili 15 adet rüzgar türbinine ait 01.01.2012-31.12.2015 tarihleri arasında türbinlerin ortalama rüzgar hızları birbirinden farklılık göstermektedir. Ortalama rüzgar hızı yatırımın kapasite kullanımını etkileyerek nihai olarak yatırım geri ödeme süresini önemli ölçüde etkilemektedir.

Türbinleri birbirinden farklılaştıran diğer bir husus ise güç eğrilerinin farklılaşmasıdır. Şekil 3’te WTG04 kodlu rüzgar türbinin güç eğrisi gibi diğer türbinlerin güç eğrisine bakılıp türbinler karşılaştırıldığında türbinlerin farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Türbinler arasındaki bu ayırıcı fark; aynı yerde kurulu benzer türbinler aynı rüzgar hızında aynı üretimi elde edememektedir. Bunun en önemli nedeni türbinin bulunduğu yerdeki hakim rüzgar yönünün istikrarlılığıdır. Türbin için rüzgar hızı sabitken hakim rüzgar yönündeki değişiklik türbinin türbülansa girmesine ve üretim kaybına uğramasına neden olabilmektedir. Ayrıca bölgede kurulu rüzgar çiftliğinde türbinlerin gölgeleme ve rüzgar kesme etkilerinden dolayı türbinlerin üretimleri farklılaşmaktadır. Bu ise türbinlerin geri ödeme sürelerini farklılaştırmaktadır.

Verimli RES yatırımı için bölgenin rüzgar hızı verileri doğru olarak belirlenmelidir. Yatırım kararı vermeden önce ölçümü yapılan rüzgar verilerine göre türbinler doğru yerleştirilmelidir. RES yatırımının teknik fizibilitesi tamamlandıktan sonra yatırıma ait finansal analiz yapılmalıdır. Bunun için geleneksel finans tekniklerinin yanında birden fazla kombinasyonu bir arada kullanarak daha kapsayıcı olan simülasyon analizi yöntemleride yatırım değerlendirmesinde kullanılmalıdır.

RES10 yatırımının normal durumu değerlendirildiğinde 25 yıllık ekonomik ömrü olan yatırımın yaklaşık olarak yarı zamanında kendini amorti ettiği (geri ödediği) sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan analizler sonucunda uygun rüzgar hızının sağlanması halinde RES yatırımlarının kazançlı olduğu belirlenmiştir. Gelişmekte olan ülkelerden biri olan Türkiye'nin gelecekteki enerji ihtiyacının karşılanmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinin iyi bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

AKÇAY, M.B., KASAP, M., DOĞUÇ, T. ve KASAP, G., 2012, *Finans Mühendisliği ve Risk Yönetimi Perspektifiyle Türev Piyasalar ve Yapılandırılmış Ürünler*, ISBN: 978-975-8535-91-0, Scala Yayıncılık, İstanbul

AY, A., 2010, *Energy Sources And Investment Project Assessment: A Case Study About Wind Energy In Turkey*, Bahçeşehir üniversitesi, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

BEYAZIT, M.F., 2011, *Stokastik Finans Analitik ve Nümerik Çözümler*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

BOLAK, M., 2004, *Risk ve Yönetimi*, ISBN: 975-551-377-0, Birsen Yayınevi, İstanbul.

CARDELL, J. B. ve ANDERSON, C. L., 2010, *Analysis of The System Costs of Wind Variability Through Monte Carlo Simulation*, **In System Sciences (HICSS)**, 2010 43rd Hawaii International Conference on (pp. 1-8). IEEE.

CHARNES, J., 2012, *Financial Modeling With Crystal Ball and Excel*, John Wiley&Sons Ltd, USA.

DESROCHERS, G., BLANCHARD, M. ve SUD, S., 1986, *A Monte-Carlo Simulation Method For The Economic Assessment of The Contribution of Wind Energy to Power Systems*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, (4), 50-56.

DOĞAN, B. T., ÇOLAKOĞLU, A. ve KINCAY, O., 2012, *RETSscreen Analiz Programı ile Hatay'da Rüzgar Enerji Santrali Fizibilite Analizi*, **Tesisat Mühendisliği**, Sayı, 22-27.

Ertürk, M., 2012, *The Evaluation of Feed-In-Tariff Regulation of Turkey For Onshore Wind Energy Based on The Economic Analysis*, **Energy Policy**, 45, 359-367.

FRÖLUNDE, S. G. ve OBLING, P. E., 2010, *Valuation Models for Wind Farms Under Development: A Real Options Perspective*.

GWEC, 2016, *Global Wind Statistics*, (Erişim:04.12.2016) [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report\\_April-2016\\_22\\_04.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf)

HAMAMCIOĞLU, V., 2010, *Rüzgar Enerji Kaynaklı Elektrik Üretiminin Teknik/Ekonomik Analizi ve Yöresel Uygulaması*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

HANÇERLİOĞULLARI, A., 2006, *Monte Carlo Simülasyon Metodu ve MCNP Kod Sistemi*, **Kastamonu Education Journal**, 14(2), 545-546.

HERTZMARK, D., 2007, *Risk Assessment Methods for Power Utility Planning*, **Special Report 001/07**, March 2007. The World Bank, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), Washington D.C.

KHINDANOVA, I., 2013, *A Monte Carlo Model of a Wind Power Generation Investment*, **The Journal of Applied Business and Economics**, 15(1), 94.

LIBERMAN, E. J., 2003, *A life cycle assessment and economic analysis of wind turbines using Monte Carlo simulation* (No. AFIT/GEE/ENV/03-16). Air Force Inst Of Tech Wright-Patterson Afb Oh School Of Engineering And Management.

MORAN, D. ve SHERRINGTON, C., 2007, *An Economic Assessment of Windfarm Power Generation in Scotland Including Externalities*, **Energy Policy**, 35(5), 2811-2825.

OZERDEM, B., OZER, S. Ve TOSUN, M., 2006, *Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey*, **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 94(10), 725-743.

ÖZÇELİK, B. D., 2016, *Türkiye’de Rüzgar Enerjisinin Durumu: Karaburun, Urla, Samandağ ve Hereke Rüzgar Enerjisi Santralleri Fizibilite Analizi*, **Maliye Finans Yazıları**, (106), 49-72

REHMAN, S., AHMAD, A. ve AL-HADHRAMI, L. M., 2011, *Development And Economic Assessment of A Grid Connected 20 MW Installed Capacity Wind Farm*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(1), 833-838.

ROQUES, F.A., NUTTALL, W.J. ve NEWBERY, D.M., 2006, *Using Probabilistic Analysis to Value Power Generation Investment under Uncertainty*, CWPE 0650 and EPRG 065. Electricity Policy Research Group, University of Cambridge, England.

ROSS, S.A., WESTERFIELD, R.W. ve JAFF, J., 2010, *Corporate Finance*, ISBN: 978-007-131308-7, McGraw-Hill/Irwin, USA.

SIMKINS, B. ve SIMKINS, R., 2013, *Energy finance and economics: Analysis and valuation, risk management, and the future of energy* (Vol. 606). John Wiley & Sons.

SPINNEY, P. J., & WATKINS, G. C., 1996, *Monte Carlo Simulation Techniques and Electric Utility Resource Decisions*, **Energy Policy**, 24(2), 155-163.

TANSI, B.N., 2012, *An Assessment of Cameroons Wind and Solar Energy Potential – A Guide for A Sustainable Economic Development*, Hamburg, DEU: Diplomica Verlag.

TUREB, 2016, *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu*, (Erişim: 03.12.206) <http://www.tureb.com.tr/yayinlar/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2016>

VARDAR, A. ve ÇETİN, B., 2007, *Cost Assessment of The Possibility of Using Three Types of Wind Turbine in Turkey*. **Energy Exploration & Exploitation**, 25(1), 71-82.

VARDAR, A. ve ÇETİN, B., 2009, *Economic Assessment of The Possibility of Using Different Types of Wind Turbine in Turkey*, **Energy Sources**, Part B, 4(2), 190-198.

VENETSANOS, K., ANGELOPOULOU, P. ve TSOUTSOS, T., 2002, *Renewable Energy Sources Project Appraisal Under Uncertainty: The Case Of Wind Energy Exploitation Within A Changing Energy Market Environment*. **Energy Policy**, 30(4), 293-307.

VOSE, D., 2000, *Risk Analysis A Quantitative Guide*, ISBN: 0-471-99765-X, John Wiley&Sons Ltd, England.

WILLIAMS, S. K., ACKER, T., GOLDBERG, M. ve GREVE, M., 2008, *Estimating the economic benefits of wind energy projects using Monte Carlo simulation with economic input/output analysis*. **Wind Energy**, 11(4), 397-414.

YILMAZ, V., ARAS, H. Ve ÇELİK, H. E., 2005, *Statistical Analysis of Wind Speed Data*, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi**, C. XVIII, S.2

(Erişim:02.01.2017) <http://riskdynamicsconsultancy.com/monte-carlo-simulasyonu/>

(Erişim:05.01.2017) <http://riskdynamicsconsultancy.com/monte-carlo-karar-agaci-modellemesi-bolum-ii>.