

## Küçük ve mikro ölçekli enerji yatırımı için hibrit enerji modeli Hybrid energy model for small and micro scale energy investments

Mustafa YILDIZ<sup>1</sup> , Ferhat BİNGÖL<sup>2\*</sup> 

<sup>1,2</sup>Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir.  
mustafayildiz@iyte.edu.tr, ferhatbingol@iyte.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.11.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 07.05.2018  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.60329  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Türkiye çatı üstü güneş ve küçük ölçekli rüzgâr türbinleri gibi farklı olasılıklarda yeni düzenlemelere 2017 yılında gitmiştir. Her iki teknoloji için de ayrı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen henüz hibrit sistem değerlendirme metodolojisi ve sonuçları ülke çapında yaygın değildir. Bu çalışma, verilen tesis alanın mikro ölçekli rüzgâr ve güneş eşaslı toplam enerji kapasitesine göre iki kaynaktan üretilen enerjiyi azami noktaya ulaştırmak için önerilmiş, Hibrit Optimizasyon Aracı (Hybrid Optimization Tool)-HOT-olarak isimlendirilmiş bir model içerir. Son kullanıcının basit aylık bilgileri girerek yıllık üretim tahmini yapmasına olanak verir. Modelin karşılaştırılması yaygınca kullanılan ve ticari yazılım HOMER ile yapılmıştır. Sonuçta yapılan tahminlerin mikro sistemlerin ekonomik modelini tehlikeye atmayacak belirsizlikte çalışarak fizibilite çalışmalarında ön-analiz için kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit enerji, Rüzgâr, Güneş, Fizibilite

### Abstract

Turkey has announced the new regulations regarding roof-top solar and small-scale wind turbines in 2017. Although there are different studies conducted for both technologies, there is not a clear methodology to assess hybrid energy systems. This study includes a calculation model, named as Hybrid Optimization Tool abbreviated as HOT, proposed to get maximum amount of energy produced by micro scale wind-solar hybrid energy system, based on the total installed capacity of these two resources for the specified location. It provides the end user to estimate annual energy production via simple inputs. It has been compared with well-known commercial software; HOMER. As a result, it has been found that the model is able to predict results which can be used for the pre-analysis stage on the feasibility studies of micro scale hybrid systems, working with acceptable uncertainties which do not endanger the economic model.

**Keywords:** Hybrid energy, Wind, Solar, Assessment

## 1 Giriş

Rüzgâr enerjileri Türkiye ve dünyada hızlı bir şekilde ana enerji kaynağı olma yolunda mesafe kat etmektedir. 2018 yılı başı itibari ile dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü, 2017 yılında eklenen 52.6 GW kapasite ile birlikte 539 GW üzerinde olup [1], 2018 yılı ocak ayı verilerine göre Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücü 6872 MW'a ulaşmıştır. Ayrıca 2017 yılı içerisinde yapılan yaklaşık 4000 MW kapasite yarışması yapılmıştır [2]. 2017 yılında kurulan yeni rüzgâr türbinlerinin de devreye girmesi ile ülkemizin enerji üretiminin ortalama %6.0 rüzgâr enerjisinden sağlanmış [3]. Bir diğer önemli yenilenebilir enerji kaynağı güneştir. Gelişen teknolojisi ile güneş enerjisi sistemleri de günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve dünyada toplam kurulu güç 2016 yılı sonu itibari ile 306 GW olarak belirtilmiş ve 2017 yılı sonunda 387 GW Kurulu güce ulaşması beklenmektedir [4]. Türkiye'de 2017 yılı itibari ile kurulu güneş enerjisi üretim sistemleri kapasitesi 832.5 MW olarak belirtilmektedir [3]. 2017 yılı içerisinde yapılan yeni düzenlemeler ile hem büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri hem de bina çatılarına kurulacak mikro ölçekli sistemler sayesinde güneş enerjisine dayalı enerji üretiminin hızla artması beklenmektedir [5]. Rüzgâr ve güneş enerjisinin yanında başta yerel kaynaklara dayalı üretim olarak Hidrolik ve jeotermal enerji ilk sıralardadır. Bunun yanında tümüyle ya da kısmi olarak dış kaynaklı enerjiden elektrik üretimi de yapılmaktadır (ör: doğal gaz, kömür). Bu çeşitliliğin sebebi tek bir enerji kaynağına bağımlı olmak riskinden uzaklaşmak içindir. Enerjinin sürekliliğini artırmak için birden fazla enerji kaynağı kullanmak gerekmektedir.

Ülkemiz enerji kaynakları büyük ölçekli elektrik üretimi yaparak şebekeye aktarır ancak küçük ve mikro üretimlerde

hibrit sistemlerde kullanılabilir. Birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanıldığı enerji sistemlerine hibrit enerji sistemleri adı verilmektedir [6].

Şu ana kadar bahsi geçen tüm enerji kaynakları hibrit enerji kaynağı olarak kullanılabilir olsa dahi, kaynağı her yerde olan iki enerji kaynağı rüzgâr ve güneşten mikro hibrit enerji üretim tesis kurmak sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Diğer enerji kaynaklarında iki ya da daha fazla enerji kaynağını aynı yerde bulmak zor olabilir. Bu çalışma kapsamında da rüzgâr ve güneş enerji sistemleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında. 2013 yılında yayınlanan lisanssız enerji üretimi yönetmeliği [7] dikkate alınmış ve kısıtlamalarına, özellikle 1 MW kapasite sınırına sadık kalınmıştır.

Geçmişten günümüze yapılan akademik çalışmalarda da en çok incelenen hibrit enerji sistemi tasarımları rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar ile bu çalışma arasında birçok benzerlik olduğu gibi belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Yapılan birçok çalışmada [8]-[22], enerji sistemi şebekeden bağımsız olarak tasarlanmış talep dikkate alınarak batarya kapasitesi belirlenmiş ve bu kapasite dikkate alınarak rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemi modellenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada ise, talep dikkate alınarak şebekeye bağlantılı olacak şekilde batarya olmaksızın sistem tasarımı yapılmıştır. Rüzgâr enerjisinin hesaplanmasında Weibull dağılımı bazı çalışmalarda [23]-[29] olduğu gibi bu çalışmada da dikkate alınmıştır. Rüzgâr hızının ölçüldüğü yükseklikten başka bir yükseklikte rüzgâr hızının tahmininin, birçok çalışmada üzerinde durulmamasına karşın, bazı çalışmalar [30],[31] da olduğu gibi bu çalışmada da Güç Yasası dikkate alınmıştır. Bu bağlamda incelendiğinde, bu çalışma geçmişte yapılan hibrit enerji sistemleri çalışmalarına

göre farklılıklar içermektedir. En belirgin farklılık ise, mevcut çalışmalarda kısa aralıklı zaman serisi ile sonuca gidilirken, bu çalışmada on iki (12) ay için, aylık ortalama veriler dikkate alınarak, hassas veriler ile elde edilen sonuçlara yakınsamanın gerçekleştirilmiş olmasıdır. Geliştirilen bu yöntem ile kullanıcıların ilgilendiklerini konular hakkında azami bilgi ile üretim kapasitesi tahmini yapabilmeleri hedeflenmektedir.

## 2 Rüzgâr ve güneş verisinin toplanması ve değerlendirilmesi

Rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı enerji üretiminde enerji kaynağının sistemin kurulacağı alandaki potansiyelinin bilinmesi, doğru ve karlı yatırımın yapılması için çok önemlidir. Bu nedenle de dünyada kabul edilen standartlara uygun olarak ölçüm sistemleri bulunmaktadır. Türkiye'de kabul edilen ölçüm standardı Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından yazılan ve Aletler ve Gözlem Yöntemleri Komisyonu (CIMO) tarafından denetlenerek onaylanan WMO/CIMO No. 8 [29] kullanılmaktadır. Bu standarda göre, rüzgâr türbini kurulacak sahayı temsil eden bir noktada rüzgâr verilerini ölçmek için rüzgâr ölçüm istasyonu (RÖİ) kurulmalıdır. Aynı şekilde güneş enerjisi potansiyeli ölçümü amacıyla güneş enerjisi ölçüm istasyonu (GÖİ) güneş enerjisi sitemi kurulacak sahada ölçüm yapmalı ve yerinde veri kaydı yapmalıdır.

### 2.1 Rüzgâr enerji

WMO/CIMO No.8'e göre. RÖİ yüksekliği kurulacak türbin yüksekliğinin en az yüzde 80'i yüksekliğinde olmalı ve üzerinde rüzgâr hızının ölçülmesi için en az iki farklı yükseklikte birer adet rüzgâr hız sensörü (anemometre) ile en az bir adet rüzgâr yön sensörü bulunmalıdır. Birer adet hız ve yön sensörlerinin 30 m yüksekliğe uygun bir şekilde kurulurken diğer hızölçer en yüksek noktaya kurulmalıdır. Sensör sayıları daha fazla kullanılarak, daha hassas analizler yapılmasına imkân sağlanır ancak listelenen cihazlar asgari standartlardır. Kaydedilen veriler kullanılarak rüzgâr hızı Weibull dağılımı [30],[31] ile ifade edilen boyut ( $A$  [m/s]) ve şekil ( $k$  [-]) parametrelerine bağlıdır (Denklem 1).

$$U = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1)$$

Weibull dağılımı (Denklem 2), rüzgâr hızının en doğal dağılıma yakın olduğu varsayılan bir istatistiki olasılık dağılımını ifade eder. Bu nedenle rüzgâr hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right) \quad (2)$$

Weibull parametrelerinin hesaplanabilmesi için ölçülmüş rüzgâr hızının ortalamasına ( $U$  [m/s]). standart sapmasına ( $\sigma$ ) dayalı ampirik hesaplama yöntemleri kullanılabilir (Kidmo et al., 2015) (Denklem 3 ve 4);

$$k = \left(\frac{\sigma}{U}\right)^{-1.089} \quad (3)$$

$$A = \frac{U}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

Farklı yüksekliklerde ölçülen rüzgâr hızlarının sayesinde ise (Denklem 5) dikey rüzgâr hızı değişimi ve dolayısıyla rüzgâr türbini ile ilgili, örneğin gövde, yükseklikteki rüzgar hızı hesaplanabilir [27].

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad (5)$$

$v_1, v_2$ ; sırasıyla alt ve üst ölçüm noktalarını  $z_1, z_2$ ; bu ölçümlerin yüksekliklerini ifade eder ve bu değerlerinin yerlerine konulması ile çözülecek denklemde  $\alpha$  yeryüzü sürtünme katsayısını ifade eder. Bu katsayı kullanılarak en yüksekteki değerler kullanılarak daha yüksek bir noktadaki rüzgâr hızı yine aynı denklem ile hesaplanabilir. Elde edilen değerlerle ise rüzgâr türbininin enerji üretimini hesaplamak için Denklem 6. formül kullanılmaktadır.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A_s \cdot C_p \quad (6)$$

$P$ : Rüzgâr türbini enerji gücünü [Watt],  $\rho$ : Hava yoğunluğu [ $\text{kg/m}^3$ ],  $U$ : Rüzgâr hızı [m/s],  $A_s$ : Rüzgâr türbin kanadı süpürme alanı [ $\text{m}^2$ ] ve  $C_p$ : Rüzgar türbini kapasite faktörünü temsil eder [32]. Türbin üreticileri  $A_s$  ve  $C_p$  değerlerine dayalı olan  $U$  bilgisine göre alınacak  $P$  değerini veren bir güç eğrisini kullanıcılara sunarlar. Bu çalışmada da rüzgâr türbini güç eğrisinde istenen rüzgâr hızına karşılık gelen enerji çıktısını kullanan ve enerji üretim değerlerini hesaplayan bir araç geliştirilmiştir. Seçilen rüzgâr türbini modeli Polaris P25-100 tipi rüzgâr türbini olup 100 kW güç kapasitesine sahip ve 30 m gövde yüksekliğindedir [33]. Ayrıca hesaplamalara. Rüzgar türbininde elektriksel, çevresel faktörlerden, türbin arıza ve bakım süreçlerinden, gölgeleme etkilerinden meydana gelebilecek kayıplar %15 kayıp olarak dahil edilmiştir. Günümüz son nesil rüzgâr türbinlerinde bu kayıp %10'lara kadar düşmektedir. Ancak, küçük türbinlerde arız ve bakım süreçlerinin daha uzun sürdüğü bilindiğinden daha yüksek bir rakam tercih edilmiştir.

### 2.2 Güneş enerjisi

WMO/CIMO No.8'e göre. GÖİ üzerinde güneş radyasyon verisini toplayan piranometre, güneşlenme süresini ölçen güneşlenme sensörü, anemometre, rüzgâr yön sensörü, termometre ve bağıl nem sensörü bulunması gerekmektedir. Piranometre yere paralel olarak 2-5 m yüksekte olmalı ve 1 m<sup>2</sup> alana gelen güneş radyasyon miktarını ölçmelidir. Güneşlenme süresi de ölçülerek güneş kaynaklı enerji üretimi hesabında en önemli veriler GÖİ ile toplanacaktır. Bu cihazların engellenmemesi ve gölgeleme etkisi olmaması için ölçüm istasyonuna en yakın yapı, istasyon yüksekliğinin en az on katı mesafede olmalıdır. Günümüzde uydular ile kaydedilen veriler de yüksek çözünürlüklere ulaştığından güvenilir kabul edildiğinden özellikle lisanssız güneş enerjisi sistemlerinin analizlerinde kullanılmaktadır. Fotovoltaik (PV) paneller ile enerji üretimi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$P_{PV} = A_p n_{PV} H_h n_d \rho_g \quad (8)$$

Burada  $P_{PV}$ : PV panel enerji üretimi [W],  $A_p$ : PV panel alanı [ $\text{m}^2$ ],  $n_{PV}$ : PV panel modül verimliliği,  $H_h$ : Solar radyasyon değeri [ $\text{kWh/m}^2/\text{gün}$ ],  $n_d$ : Akım taşıma indirgeme faktörü ve  $\rho_g$ : Yeryüzü yansımaya faktörünü temsil eder.

Çalışmamızda  $n_d$  değeri invertör, kablo verimlilikleri transformator kayıpları gibi kayıpları temsil etmektedir ve 0.8 kabul edilmiştir. Yeryüzüne gelen güneş ışınlarının yansımaya sebebi ile olan kayıplar ise  $\rho_g$  ile gösterilmekte ve 0.8 olarak kabul edilmektedir. Bu değerler proje özelinde değişkenlik gösterecek ve sonuçları önemli şekilde etkileyecektir. Modül verimliliği PV panel teknik dokümanında verilmektedir.

Hesaplamalarda kullanılan solar PV panel modeli ise Panasonic N330 tipi PV panel olup bir panel 330 W kapasiteye sahiptir [34] ve dokümanda belirtildiği üzere %19.7 olarak alınmaktadır. Ancak aşağıdaki formül ile Formül (8)'de kullanılan iki parametre tek bir parametreye dönüşmektedir.

$$P_{pk} = A_p n_{pv} \quad (9)$$

PV panel pik güç değeri isminden de anlaşılacağı üzere 330 W olup yukarıdaki formülde panel alanı ve modül verimliliğinin birlikte değerlendirilmesi sonucu bu güç değerine ulaşılmaktadır ve bu nedenle PV panel enerji üretimini hesaplanmasını sağlayan formül Denklem 10 gibi tanımlanmaktadır.

$$P_{PV} = P_{pk} H_h n_d \rho_g \quad (10)$$

### 3 Rüzgâr güneş hibrit enerji sisteminin modellenmesi

Rüzgâr-Güneş hibrit enerji sistemi modellemesi esas olarak ekonomik analize dayanmaktadır. Analiz, birim ünite ile enerji üretimi hesaplaması, enerji talebini karşılayacak sistemi modelleme, modellenen sistemin aylık talebe göre fazla ya da az olması ile şebekeye satış ya da şebekeden alım ile ekonomik olarak sonuçları geliştirilen araç ile görecektir şekilde devam etmektedir. Kullanıcının girdi olarak rüzgâr ve güneş bilgilerini girmesi gerekmektedir. Bu işlem bir tablo yöntemiyle yapılır ve sistem optimizasyonu otomatik olarak yapar. Bu çalışmada iki farklı nokta için optimizasyon çalışması yapılmış ve bu konular hakkındaki bilgiler Tablo 1 ve 2'de sunulmuştur.

### 4 Bulgular

Bu çalışmada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Binasına ve İzmir Urla bölgesinde bulunan bir eve ait elektrik tüketimleri dikkate alınmıştır (Tablo 2 ve 3) daha sonra veriler hem HÖT hem de sektörde bu konuda uzun yıllardır geliştirilen Homer Pro yazılımına girdi olarak kullanılmıştır. Kullanılan veriler ile elde edilen ve çalışmamızda dikkate alınan konfigürasyonlar ve Hesaplamalardan elde edilen veriler ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Sonuçlarda beklenen benzerlik İYTE sonuçlarında görülmesine karşın Urla'da bulunan örnek ev gruplarında görülemez. Bunun sebepleri aşağıda listelenmiştir;

- İYTE senaryosunda kullanılan rüzgâr verisi ölçülmüş veridir. Bu nedenle hassas güvenilir sonuçlar sağlamaktadır,
- Urla örnek ev senaryosunda, ölçülmüş veri yerine rüzgâr ve güneş verileri NASA'nın sunduğu modellemelerden sağlanmıştır. Bu veriler 1°x 1° enlem-boylam çözünürlüğündedir ve enerji hesaplamaları için yeterli çözünürlükte değildir. Veri setinde İYTE ve Urla'da bulunan örnek ev için alınan verilerin aynı olduğu gözlenmiştir. Ancak, bunun güneş için olabileceği bilinse de rüzgâr için mümkün olmadığı bilinmektedir,
- Ölçülmüş rüzgâr verisi 10 dk. veriler olmakla birlikte bunların aylık ortalamaları HÖT ve Homer Pro içerisinde kullanılmıştır. Ancak NASA verisi Homer Pro içerisine otomatik olarak saatlik inmekte ve saatlik değerlendirilmesine rağmen, bu veriler aylık ortalama olarak HÖT içerisinde kullanılabilmektedir. Bu nedenle de kullanılan veriler farklı değerlendirilmiştir ve sonuca etki etmiştir.

Tablo 1: İYTE Makine Mühendisliği rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemi veri giriş tablosu örneği.

Proje Adı: Makine Mühendisliği binası için rüzgâr-güneş hibrit enerji sistemi	Konum: Gülbahçe-Urla		Tarih			
	Boylam: 38.317°K		Enlem: 26.64°D			
Saha Adı: MEK	Rüzgâr Verisi		Güneş Verisi	Enerji İhtiyacı		
	Weibull A (m/s)	Weibull k (-)	Hava Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Solar Radyasyon (kWh/m <sup>2</sup> /gün)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Enerji İhtiyacı (kWh)
Ocak	7.94	1.11	1.251	2.17	7.7	29123
Şubat	10.46	1.97	1.249	3.03	8.0	41681
Mart	8.60	1.48	1.237	4.43	10.8	43167
Nisan	9.33	1.59	1.216	5.82	15.7	35173
Mayıs	7.68	1.82	1.193	7.28	21.4	30172
Haziran	9.18	2.08	1.174	8.34	26.1	45124
Temmuz	11.27	2.56	1.164	8.23	28.8	59216
Ağustos	12.44	2.62	1.165	7.34	28.5	63129
Eylül	10.06	2.14	1.180	5.86	24.5	51632
Ekim	9.64	2.01	1.202	4.07	19.2	13657
Kasım	10.56	1.91	1.227	2.56	13.3	22764
Aralık	10.19	1.77	1.237	1.82	9.0	34289
Ortalama	9.78	1.92	1.210	5.08	17.8	39094
Toplam				60.95		469127

Tablo 2: Urla-Örnek ev rüzgar-güneş hibrit enerji sistemi veri giriş tablosu örneği.

Proje Adı: Urla'da Bulunan Bir ev için Rüzgar-Güneş Hibrit Enerji Sistemi			Konum: Urla		Tarih	
Saha Adı: URLA			Boylam: 38.332°K			
			Enlem: 26.78°D			
Rüzgar Verisi		Güneş Verisi		Enerji İhtiyacı		
Aylık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Hava Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	Solar Radyasyon (kWh/m <sup>2</sup> /gün)	Ortalama Sıcaklık (°C)	1 Evin Enerji İhtiyacı (kWh)	100 Evin Enerji İhtiyacı (kWh)	
Ocak	6.21	1.251	2.17	7.7	718.0	71800
Şubat	7.22	1.249	3.03	8.0	673.0	67300
Mart	6.43	1.237	4.43	10.8	533.0	53300
Nisan	5.57	1.216	5.82	15.7	481.0	48100
Mayıs	4.74	1.193	7.28	21.4	254.0	25400
Haziran	4.65	1.174	8.34	26.1	298.5	29850
Temmuz	5.35	1.164	8.23	28.8	200.0	20000
Ağustos	5.15	1.165	7.34	28.5	262.0	26200
Eylül	5.02	1.180	5.86	24.5	282.0	28200
Ekim	6.31	1.202	4.07	19.2	493.0	49300
Kasım	5.88	1.227	2.56	13.3	434.0	43400
Aralık	6.14	1.237	1.82	9.0	533.0	53300
Ortalama	5.72	1.210	5.08	17.8	430.1	43010
Toplam			60.95		5161.5	516150

Tablo 3: HOT hesaplama adımları; gri adımlar girdi ve çıktıları simgeler.

Adım	İşlem
1	Veri giriş tablosundaki bilgiler girdi olarak kullanılır
2	HOT içerisinde ilgili kısımlara rüzgâr hızı ölçüm yüksekliği, türbin gövde yüksekliği, türbinde oluşacak kayıp faktörü, solar radyasyon. PV panel kapasitesi, akım taşıma indirgeme faktörü, yeryüzü yansımaya faktörü değerleri ile enerji alım ve satış fiyatları ve proje ömrü girilir. Aynı zamanda birim rüzgâr türbini ve aynı kapasitede PV panel için yatırım, işletme ve bakım maliyetleri gerekli alan girilir.
3	Türbin güç eğrisi bilgileri girilir. Her rüzgâr hızında türbinde üretilen enerji değeri yazılır ve bu bilgi enerji üretim hesabında temel girdilerden biridir.
4	Weibull parametrelerine göre ölçüm yüksekliğinde rüzgâr hızı dağılımı hesaplar. Weibull parametrelerinin olmaması durumunda rüzgâr hızları ilgili kısma direkt girilebilir.
5	Formül (6) ile gövde yüksekliğinde rüzgâr hızı otomatik olarak hesaplanır.
6	Gövde yüksekliğinde hesaplanan rüzgâr hızları ile türbin güç eğrisinden rüzgâr hızına karşılık gelen türbin enerji üretim değeri hesaplanır.
7	6. adımda hesaplanan değer rüzgâr türbininde meydana gelen kayıplar dikkate alınarak belirtilen kayıp faktörü ile çarpılır ve bir türbinden üretilen net enerji miktarı hesaplanır.
8	Solar radyasyon. PV panel kapasitesi, akım taşıma indirgeme faktörü ve yeryüzü yansımaya faktörü değerleri ile bir PV panelden üretilen net enerji değeri hesaplanır.
9	2. adımda girilen aylık enerji ihtiyacı, her ay için bir rüzgâr türbini net enerji üretimine ve aynı kurulu kapasitede güneş panelinin net enerji üretimine bölünür ve enerji üretim değerleri ile satış rakamları kıyaslanarak daha ekonomik olan birincil enerji kaynağı olarak belirlenir.
10	Birincil enerji kaynağı güneş olursa, hibrit sistem oluşturmak adına bir rüzgâr türbini sabit tutularak geriye kalan enerji ihtiyacı PV panel ile tamamlanır. Birincil enerji kaynağının rüzgâr olması durumunda aylık enerji talebi bir rüzgâr türbininin net enerji üretimine bölünerek aylık rüzgâr türbin sayısı bulunur. Tam olmayan rakamlar bir alt tam sayıya yuvarlanarak talebin fazlasının sadece rüzgâr türbini ile karşılanmasının önüne geçilir. Her ay için bu işlem olarak yapılır ve arda kalan enerji ihtiyacı aylık olarak bir PV panel net enerji üretimine bölünür ve aylık PV panel rakamı hesaplanır. Tam olmayan rakamlar bir üst tam sayıya yuvarlanır ve her ay için farklı rakamlarda rüzgâr türbini ve PV panel ile aylık ihtiyaç duyulan enerji miktarı karşılanmış olur.
11	Her ay için bulunan rakamların ortalaması alınır ve tek bir konfigürasyon oluşturulur. Hesaplanan rakamların tam sayı olmaması durumunda rüzgâr türbini sayısı bir alt tam sayıya. PV panel sayısı bir üst tam sayıya yuvarlanır ve son rakamlar elde edilir.
12	Oluşan konfigürasyon ile aylık rüzgar ve güneş verileri dikkate alınarak aylık enerji üretimi hesaplanır. İlk girdi sayfasında belirtilen enerji talebi ile arasındaki fark her ay için hesaplanır.
13	Her ay için fazla ya da eksik enerji miktarı yine ilk girdi sayfasında belirtilen enerji alım/satım rakamları ile çarpılarak aylık ödenen ya da satılan enerjinin değeri hesaplanır ve toplamı ile 1 yıl için yapılan ödeme/kazanç hesaplanır.
14	Yıllık ödeme/kazanç değeri proje ömrü ile çarpılarak proje süresinde oluşacak ödeme/kazanç değeri bulunur.
15	Belirlenen konfigürasyon ile 2. adımda girilen birim ünite maliyetleri çarpılarak proje ömrü boyunca yatırımcı tarafından ödenecek olan yatırım maliyeti olacaktır hesaplanır.
16	15. adım ve 14. adımda bulunan değerler arasındaki fark yatırımcının proje ömrü boyunca ödediği net yatırım maliyeti olacaktır.
17	Bilinen enerji tüketimi için bilinen birim enerji maliyeti dikkate alınarak proje ömrü boyunca yatırım olmaması halinde ödenecek enerji maliyeti hesaplanır.
18	16. ve 17. Adımlarda hesaplanan değerler arasındaki fark yatırımcının proje sonunda net kazancı/zararı olacaktır.
19	16. adımda hesaplanan net yatırım maliyeti ile proje süresince ihtiyaç duyulan enerji miktarına bölünerek proje süresince birim enerji maliyeti hesaplanır.
20	18. adımda hesaplanan değerlerin 16. adımda hesaplanan değere bölünmesi ile elde edilen değer projenin karlılık oranı olacaktır.

Tablo 4: Sonuç tablosu.

Konfigürasyon No.	İYTE						URLA								
	1		2		ORAN (%)		1		2		3				
Model	HOT	HOMER PRO	HOT	HOMER PRO	HOT	HOMER PRO	HOT	HOMER PRO	HOT	HOMER PRO	HOT	HOMER PRO			
Rüzgâr Türbini Kapasitesi [kW]	100	100	200	200	100	100	100	100	100	100	100	100			
PV Panel Kapasitesi [kW]	178.2	180	46.2	40	534.6	525.0	660.0	650.0	396.0	400.0	396.0	400.0			
Toplam Kapasite [kW]	278.2	280	246.2	240	634.6	625.0	760.0	750.0	496.0	500.0	496.0	500.0			
Yıllık Enerji Üretimi [kWh]	494628	582386	84.9	620435	651555	95.2	730344	991933	73.6	879442	1192434	73.8	565552	791431	71.5
20 yıllık Toplam Kazanç [USD]	38276	226287	16.9	298841	364857	81.9	390022	948396	41.1	697377	1352569	51.6	44411	537014	8.3
20 yıllık Enerji Maliyeti [USD/kWh]	0.091	0.072	126.4	0.074	0.066	112.1	0.137	0.080	171.3	0.138	0.072	191.7	0.136	0.089	152.8
20 yıllık Karlılık Oranı [%]	30.2	50.4	59.8	42.8	51.8	82.6	-9.7	23.0	-42.1	-8.8	23.5	-37.4	-11.5	21.6	-53.1

Bu farklılıkların giderilmesi için aynı kalitede ölçülmüş veriler kullanılması ve HOT ile Homer Pro'nun eşdeğer girdiler ile hesap yapması gerekmektedir. Saatlik ve aylık veri farkından doğan sonuç değişimi bu sayede giderilebilir.

Buna ek olarak, sistemlerin ekonomik olarak daha uygun hale gelmesi için özellikle rüzgâr türbinlerinde birden fazla kullanılması durumunda daha yüksek kapasiteye sahip daha az sayıda mümkünse tek rüzgâr türbini kullanılması maliyetleri ciddi anlamda düşürecek ve yatırımı daha uygulanabilir hale getirecektir. Bu şekilde yapılan değerlendirmelere bir de kapasitenin artması ile artan enerji üretiminin, fazla yapılacak enerji satış sayesinde, yatırımın geri dönüş süresinin kısaltıldığı ya da uzadığı eklenmelidir. Böylece en uygun konfigürasyon bulunur ve yatırım en iyi şartlarda gerçekleştirilmiş olur.

## 5 Sonuçlar

Hibrit enerji sistemlerinin Türkiye'de, yakın gelecekte, kullanımının çok yaygınlaşması beklenmektedir. Bu nedenle de yeni sistemlerin değerlendirilmesi için bu çalışma ile geliştirilmiş olan araç (HOT) ve benzeri yazılımlar artması da beklenmektedir. Basit ve hızlı bir şekilde kullanılarak ön değerlendirme yapılmasına imkân sağlayan HOT bu gelişime bir örnek olarak değerlendirilebilir.

Sektörde kullanılan çok profesyonel yazılımlar ve metotlar vardır ve yüksek maliyetlerle yatırımcılara sunulmaktadır. HOT yazılımının amacı ise hızlı bir ön çalışma yapılması ve profesyonel yöntemlere başvuru kararının verilmesine yardımcı olmaktır. Tablo 3'te sunulan 20 adımdan ilk 3 adımda verilerin girilmesi sayesinde geriye kalan tüm adımlar HOT tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu bakımdan hem ulaşılması kolay girdi bilgileri ile hem de basit ara yüzü ile kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Tablo 4'te verilen sonuçlar ölçülmüş verilerle incelendiğinde, güvenilir girdiler kullanılması halinde elde edilen sonuçların Homer Pro ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Özellikle İYTE örneğinde kullanılan rüzgâr verilerinin hassasiyetinin yüksek olması ve hem HOT hem de Homer Pro içerisinde aynı

verilerin kullanılmış olması, sonuçlarda oluşan farklılığı minimize etmiştir ve hatta daha fazla rüzgâr enerjisine ağırlık verilmesi durumunda daha da hassas sonuçlar alınabildiğini göstermiştir. Ancak bir önceki başlık altında da belirtildiği üzere NASA tarafından sağlanan verilerin hassasiyetinin  $1^\circ \times 1^\circ$  enlem-boylam çözünürlüğünde olması nedeniyle, URLA örneğinde, özellikle rüzgâr verilerinin hassasiyetinin güvenilir olmadığı açıkça görülmektedir. Buna ek olarak Homer Pro içerisinde indirilen güneş verileri saatlik olmakla birlikte HOT içerisinde aylık ortalamaları alınmıştır. Hem veri hassasiyeti hem de farklı ortalama yöntemleri kullanıldığından iki model arasında farklılıklar İYTE senaryosuna nazaran URLA senaryosunda daha fazla olmaktadır. Ancak tüm sonuçlar dikkate alındığında, açıkça görülmektedir ki, geliştirilen araç HOT, ticari olarak dünya çapında kullanılan Homer Pro ile benzer sonuçlara ulaşabilmektedir. Bu da geliştirilen aracın gelecekte yapılacak çalışmalar ile daha güvenilir hale getirilebileceğini göstermektedir.

## 6 Kaynaklar

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). "Global Wind Statistics Report", Brussels, Belgium, Technical Report, 4, 2018.
- [2] Turkish Wind Energy Association. "Turkish Wind Energy Statistics Summary Report". Ankara, Turkey, 44, 2018.
- [3] Strateji Geliştirme Başkanlığı. "Dünya ve Ülkemiz Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü". Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 84, 2016.
- [4] Solar Power Europe. "Global Market Outlook 2017-2021", Brussels, Belgium, Technical Report, 82, 2017.
- [5] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. "Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Üretimi Başvurularının Teknik Değerlendirmesi Hakkında Yönetmelik. Birinci Bölüm". Ankara, Turkey, 49, 2017.
- [6] Abbasi, T, Abbasi SA. *Renewable Energy Sources: Their Impact On Global Warming and Pollution*. 1<sup>st</sup> ed. New Delhi, India, PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.

- [7] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. "Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 30, 2013.
- [8] Borowy BS, Salameh ZM. "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 11(2), 367-375, 1996.
- [9] Barley, CD, Debra JL, Lawrence TF. *Sizing wind/photovoltaic hybrids for households in inner Mongolia*. National Renewable Energy Laboratory, 1997.
- [10] Vick BD, Clark R, Ling J, Ling S. "Remote solar, wind and hybrid solar/wind energy systems for purifying water". *Journal of Solar Energy Engineering*, 125(1), 107-111, 2003.
- [11] Zhou W, Yang H, Fang Z. "Battery behavior prediction and battery working states analysis of a hybrid solar-wind power generation system". *Renewable Energy*, 33(6), 1413-1423, 2008.
- [12] Hocaoğlu FO, Gerek ÖN, Kurban M. "A novel hybrid (wind-photovoltaic) system sizing procedure". *Solar Energy*, 83(11), 2019-2028, 2009.
- [13] Engin M. "Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System". *International Journal of Photoenergy*, 13, 85-98, 2013.
- [14] Li J, Wei W, Xiang J. "A Simple sizing algorithm for stand-alone PV/Wind/Battery hybrid microgrids". *Energies*, 5(12), 5307-5323, 2012.
- [15] Matthew Z. "Dual- source energy storage-control and performance, advantages in advanced vehicles". *EVS-20*, Long Beach, California, 15-19 November 2003.
- [16] Diaf S, Diaf D, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system". *Energy Policy*, 35(11), 5708-5718, 2007.
- [17] Yang H, Wei Z, Chengzhi L. "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system". *Applied Energy*, 86(2), 163-169, 2009.
- [18] Nfah EM, Ngundam JM, Tchinda R. "Modelling of solar/diesel/battery hybrid power systems for far-north Cameroon". *Renewable Energy*, 32(5), 832-844, 2007.
- [19] Nfah EM, Ngundam JM. "Modelling of wind/Diesel/battery hybrid power systems for far North Cameroon". *Energy Conversion and Management*, 49(6), 1295-1301, 2008.
- [20] Rehman S, Sahin AZ., "A wind-solar PV hybrid power system with battery backup for water pumping in remote localities". *International Journal of Green Energy*, 13(11), 1075-1083, 2012.
- [21] Bayod-Rújula AA, Haro-Larrode ME, Martínez-Gracia A., "Sizing criteria of hybrid photovoltaic-wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid". *Solar Energy*, 98(C), 582-591, 2013.
- [22] Nogueira CE, Vidotto ML, Niedzialkoski SK, Melegari de Souza SN, Chaves LI, Edwiges T, Bentes dos Santos D, Werncke I. "Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 151-157, 2014.
- [23] Belmili H, Haddadi M, Bacha S, Almi MF, Bendib B, "Sizing stand-alone photovoltaic-wind hybrid system: Techno-economic analysis and optimization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 821-832, 2014.
- [24] Mokheimer, Esmail MA, et al., "A New Study for Hybrid PV/Windoff-Grid Power Generation Systems with the Comparison of Results from Homer". *International Journal of Green Energy*, 12(5), 526-542, 2015.
- [25] Yang, Hongxing, Lin Lu, and Wei Zhou., "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system". *Solar Energy*, 81(1), 76-84, 2007.
- [26] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliği. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2012.
- [27] Seguro JV, Lambert TW, "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(1), 75-84, 2000.
- [28] Troen I, Petersen, EL. *European Wind Atlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, 1989.
- [29] Hansen, MOL, *Aerodynamics of Wind Turbines*. 2<sup>nd</sup> ed. Lyngby, Denmark, T&F Group, 2000.
- [30] Polaris America LLC, *Power Curve-P25-100*, 2005.
- [31] Panasonic Electric Works Europe AG. *Photo voltaic module HIT® VBHN330S/47/VBHN325S/47*. 2016.