

KÜÇÜK VE MİKRO ÖLÇEKLİ ENERJİ YATIRIMI İÇİN HİBRİT ENERJİ MODELİ

Mustafa Yıldız, Ferhat Bingöl

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
mustafayildiz@iyte.edu.tr, ferhatbingol@iyte.edu.tr

ÖZET

Türkiye 2014 yılında küçük ve mikro ölçekli lisanssız enerji üretimi için yasal düzenleme yapmıştır ve iki yenilenebilir enerji kaynağı esas ilgi alanı olarak dikkate alınmaktadır; rüzgar ve güneş enerjisi. Her iki teknoloji için de ayrı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen henüz hibrit sistem değerlendirme metodolojisi ve sonuçları ülke çapında yapılmamıştır. Bu tez Türkiye'nin sayısal hibrit enerji kapasitesini yaratmayı hedeflemektedir. Çalışma, verilen alanın küçük ölçekli rüzgar ve güneş esaslı toplam enerji kapasitesini içerecek ve ayrıca bu iki kaynaktan üretilen maksimum kapasitesini elde etmek için optimum dengeyi önermektedir. Çalışma yatırım yapılamayan alanları örneğin çevresel korunan alanlar, tarihi alanlar, şehir merkezleri vb. kapsamamaktadır.

Bu bağlamda, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE), Makine Mühendisliği binasına ait elektrik tüketimi ile Urla bölgesinde bulunan bir evin elektrik tüketimleri dikkate alınarak, ölçülmüş ve uydular aracılığı ile elde edilmiş rüzgar ve güneş verileri kullanılmıştır. Elektrik tüketim ve enerji kaynaklarına ait verilerin girdi olarak kullanılabilirdiği basit bir arayüze sahip Hibrit Optimizasyon Aracı (HOT) geliştirilmiştir. Bu araç ile ilgilenilen konuma ait veriler sayesinde en uygun rüzgar türbini ve PV panel sayısı hesaplanmış ve farklı senaryolar için sonuçlar bulunmuştur. Bu sonuçlar, dünya çapında ticari olarak kullanılan ve kabul görmüş olan Homer Pro yazılımı ile yapılan hesap ve sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

1. GİRİŞ

Enerji, günümüzde tüm canlıların yaşamlarının devamı için gereken en temel ihtiyaçtır. Özellikle son yıllara hızla ilerleyen teknoloji, beraberinde enerjiye duyulan ihtiyacı da artırmıştır. Ancak, kullanılan enerji kaynaklarının sonsuz olmaması, enerji üretimi için yeni yöntemlerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Fosil enerji kaynaklarının tükenebilir olmasının ve ömürlerinin çok uzun olmayacağına anlaşılması ile birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde araştırmalar derinleştirilmiş ve hem çevre dostu olan hem de kaynağını tüketmeden enerji üretimine imkan sağlayan sistemler geliştirilmiştir. Kömür, petrol ve doğalgaz tükenen kaynaklar olup fosil enerji kaynakları; rüzgar, güneş, hidrolik, jeotermal biyokütle, hidrojen, gelgit ve dalga yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Fosil kaynaklar geçmişten günümüze büyük oranda kullanılmakta olup, yenilenebilir enerji kaynakları hızla yaygınlaşmaktadır, ancak hidrojen, gelgit ve dalga enerjisi ülkemizde yaygınlaşmamıştır.

Bilinen ilk enerji kullanımı yanma ile meydana gelen ısı sayesinde, ısınma, kuruma, su ve yiyecek ısıtma gibi eylemler için gerçekleşmiştir. Bu amaçla kullanılan ilk kaynak ağaç olmuş ve önemini kömürün keşfedilmesi ile kaybetmiştir. Yanma ile meydana gelen enerji sayesinde, Thomas Newcomen, 1712 yılında ilk buhar motorlu pompayı keşfetmiş ve endüstriyel devrimin başlamasına ilk adımı atmıştır [1]. Böylece enerjiye olan talep başlamıştır. Dünya'da olduğu gibi Türkiye'de de kömürün önemli bir enerji kaynağı olarak kullanılmasına devam edilmektedir ve 2016 yılında Türkiye'de üretilen enerjinin 22,1%'si kömür ile üretilmiştir ancak dünyada tahmini kömür rezervinin 142 yıl sonunda tükeneceği bilinmektedir [2]. Petrol ise M.Ö. 4000

yılından beri kullanılan önemli bir enerji kaynağıdır ancak dünya rezervinin bilinen ömrü 54 yıl olarak belirlenmiştir. Bu sürenin Türkiye için 18 yıl olduğu bilinmektedir [3]. M.Ö. 211 yılında kazılan kuyulardan, ısınma, su kaynatma ve aydınlatma amacıyla bambu borular ile taşınarak enerji kaynağı olarak kullanılan [3] doğal gaz ise günümüzde ülkemizin 47,2% enerjisinin üretiminde kullanılmakta ve ülkemizdeki rezervlerin tahmini ömrü 10 yıl olarak ön görülmektedir [2].

Fosil enerji kaynaklarının tahmini ömürlerinin kısa olması, alternatif enerji üretim yöntemleri arayışını başlatmıştır. Rüzgar, M.Ö 7. Yüzyıldan günümüze insan gücünün yerine yel değirmenlerinde ve gemilerde kullanılmaktadır [4]. Ancak 1891 yılında Danimarka'lı bilim adamı Poul La Cour elektrik şebekesi ile kullanılan ilk rüzgar türbinini bulmuştur ve ilk rüzgar enerji santrali 1980 yılında Hampshire, Birleşik Krallık'ta inşa edilmiştir [5]. 2016 yılı Temmuz verilerine göre dünya rüzgar enerjisi kurulu gücü 500 GW üzerinde olup [6], Türkiye rüzgar enerjisi kurulu gücü 6,106 MW ve enerji üretiminin 4.5%'sidir [7]. Bir diğer önemli yenilenebilir enerji kaynağı, bilinen ilk enerji ve ısı kaynağı olan güneştir. Uzun yıllar sadece ısınma amaçlı faydalanılmış olsa da 1839 yılında Edmund Becquerel ilk fotovoltaiik hücreyi keşfetmiş ve güneş sayesinde enerji üretimine ilk adımı atılmıştır [8]. Gelişen teknolojisi ile güneş enerjisi sistemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmakta ve dünyada toplam kurulu güç 227 GW olarak belirtilmiştir [9]. Türkiye'de güneş enerjisine dayalı enerji üretimi yeni düzenleme ve çalışmalarla artmakta olup 2016 yılı itibari ile 660 MW kurulu güce sahiptir [2].

Hidrolik enerji ilk olarak M.Ö. 200 yıllarında su değirmenlerinde buğday öğütme, deri işleme, tahta kesme ve su pompalama amacıyla kullanılmıştır [10]. 18. Yüzyılda, Bernard Forest de Belidor tarafından yayınlanan "Architecture Hydraulique" hidrolik makineleri anlatmış ve zamanla jeneratörler ile hidrolik makineler arasındaki ilişki gelişmiştir [11]. 2016 yılı itibari ile ülkemizin hidrolik enerji ile enerji üretiminin toplam enerji üretiminin 33,7%'sidir [2]. Jeotermal enerji kaynağından enerji üretimi dünyada ilk olarak 1904 yılında İtalya'da gerçekleşmiş olup [12] günümüzde dünyada toplam 13.3 GW kurulu güç vardır [13]. Ülkemizde 725.2 MW kurulu gücünde jeotermal enerjisine dayalı enerji üretim santrali bulunmaktadır [14].

Fosil enerji kaynaklarının tükeneceği gerçeği dikkate alınarak ülke yönetimleri, sivil toplum kuruluşları, üniversiteler ve tüm ilgili kuruluşlar yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekteki önemini yaymakta ve araştırma, geliştirme ve yatırımları bu alanlarda ilerletmektedir. Bunun yanında bilinmektedir ki, tek bir enerji kaynağına bağımlı olmak riskleri artırmaktadır. Enerjinin sürekliliğini artırmak için birden fazla enerji kaynağı kullanmak gerekmektedir. Birden fazla enerji kaynağının bir arada kullanıldığı enerji sistemlerine hibrit enerji sistemleri adı verilmektedir. Mevcut fosil yada yenilenebilir kaynağa, fosil yada yenilebilir enerji kaynağının eklenmesi ile hibrit enerji sistemi oluşturulabileceği gibi kurulumlarını birlikte yapmak da mümkündür. Bu çalışma kapsamında da en yaygın olarak kullanılan, kurulum kolaylığı ve enerji kaynağının ulaşılabilir olması sebebiyle rüzgar ve güneş enerji sistemleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, 2013 yılında yayınlanan lisanssız enerji üretimi yönetmeliği [15] dikkate alınmış ve kısıtlamalarına, özellikle 1 MW kapasite sınırına sadık kalınmıştır.

Bu çalışmada özel izin ile tarafımıza sağlanan Urla Rüzgar Santrali'nde ölçülen rüzgar verileri [16] ile NASA tarafından sağlanan Güneş verileri [17] kullanılarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği binasına ait elektrik tüketim değerleri dikkate alınmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Aynı zamanda farklı senaryoların görülebilmesi için Urla bölgesinde bulunan bir evin elektrik tüketimi dikkate alınmış ve bu bölgede ölçülmüş veri olmamasından dolayı NASA tarafından sağlanan rüzgar ve güneş verileri [17] kullanılmıştır. Her iki lokasyon için de hem geliştirilen araç hem de National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından geliştirilen dünyada kabul görmüş ve ticari olarak tüm dünyada kullanılan Homer Pro yazılımı [18] ile hesaplar yapıp, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Birim maliyet olarak şebekeden 1 kWh enerji satın almak 0,12 USD, şebekeye rüzgardan üretilen 1 kWh enerji satmak 0.073 USD, güneşten üretilen 1 kWh enerji satmak 0.133 USD ve 100 kW rüzgar türbini yatırım maliyeti 220.000 USD, 20 yıllık bakım ve işletme maliyeti 220.000 USD, 100 kW PV panel yatırım maliyeti 170.000 USD, 20 yıllık bakım ve işletme maliyeti 85.000 USD olarak piyasa verilerine dayanarak kabul edilmiştir.

2. RÜZGAR VE GÜNEŞ VERİSİNİN TOPLANMASI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Rüzgar 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 [19] kullanılmaktadır. Bu standarda göre, rüzgar türbini kurulacak sahayı temsil eden bir noktada rüzgar verilerini ölçmek için rüzgar ölçüm istasyonu (RÖİ) kurulmalıdır. Aynı şekilde güneş enerjisi potansiyeli ölçümü amacıyla güneş enerjisi ölçüm istasyonu (GÖİ) güneş enerjisi sistemi kurulacak sahada ölçüm yapılmalı ve yerinde veri kaydı yapılmalıdır. Rüzgar ve Güneşe dayalı enerji üretimi sistemleri için yukarıda belirtilen standartlarda ölçüm yapılması zorun olmamakla uydular ile kaydedilen veriler kullanılabilir ve yapılan enerji analizleri sonrası enerji sistemleri kurulabilmektedir.

WIMO/CIMO No.8'e göre, RÖİ yüksekliği en az 60 m olmalı ve üzerinde rüzgar hızının ölçülmesi için en az iki farklı yükseklikte birer adet rüzgar hız sensörü (anemometre) ile en az iki adet rüzgar yön sensörü bulunmalıdır. Yön sensörlerinin biri en az 30 m yükseklikte olmalı ve en yüksekte bulunan hız sensöründen en az 2.5 m aşağıda konumlandırılmalıdır. Sensör sayıları daha fazla kullanılarak, daha hassas analizler yapılmasına imkan sağlanır. Kaydedilen veriler kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılır ve enerji üretim değerlerine ulaşılır.

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

U: Rüzgar hızı (m/s)
A: Weibull A (boyut) parametresi (m/s)
k: Weibull k (şekil) parametresi

Weibull dağılımı, rüzgar hızının olasılık dağılımını vermektedir. Bu nedenle rüzgar hızının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Weibull parametrelerinin hesaplanabilmesi için;

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

$$\sigma = A \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{U}\right)^{-1,089} \quad (4)$$

$$A = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (5)$$

Farklı yüksekliklerde ölçülen rüzgar hızlarının aşağıdaki formülde kullanılması sayesinde dikey rüzgar hızı değişimi ve dolayısıyla rüzgar türbini gövde yüksekliğinde rüzgar hızı hesaplanabilir.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

v , z yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı,
 v_0 , z_0 yüksekliğinde ölçülen rüzgar hızı,
 α , yeryüzü sürtünme katsayısı. (yüzeyde bulunan bitki örtüsü ve yapılara bağlı olarak değişkendir. Bilinen yüksekliklerde ölçülen hızlara göre hesaplanır.)

Hesaplanan α değeri dikkate alınarak bilinen yükseklikte ölçülen rüzgar hızı ve yükseklik bilgisi ile istenen yükseklikte rüzgar hızı hesaplanabilir. Rüzgar türbininin enerji üretimini hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$P = \frac{1}{2} \rho v U^3 A_s C_p \quad (7)$$

P : Rüzgar türbini enerji üretimi
 ρ : Hava yoğunluğu [kg/m³]
 U : Rüzgar hızı [m/s]
 A_s : Rüzgar türbin kanadı süpürme alanı [m²]
 C_p : Rüzgar türbini kapasite faktörü

Çalışmamızda, Formül (7) kullanımı yerine, rüzgar türbini güç eğrisinde istenen rüzgar hızına karşılık gelen enerji çıktısını kullanan ve enerji üretim değerlerini hesaplayan bir araç geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan rüzgar türbini modeli Polaris P25-100 tipi rüzgar türbini olup 100 kW güç kapasitesine sahip ve 30 m gövde yüksekliğindedir [20]. Ayrıca hesaplamalara, rüzgar türbininde elektriksel, çevresel faktörlerden, türbin arıza ve bakım süreçlerinden, gölgeleme etkilerinden meydana gelebilecek kayıplar 15% kayıp olarak dahil edilmiştir.

WIMO/CIMO No.8'e göre, GÖİ üzerinde güneş radyasyon verisini toplayan piranometre, güneşlenme süresini ölçen güneşlenme sensörü, anemometre, rüzgar yön sensörü, termometre ve bağıl nem sensörü bulunması gerekmektedir. Piranometre yere paralel olarak 2-5 m yüksekte olmalı ve 1 m² 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.

$$P_{PV} = A n_{PV} H_R n_d \rho_g \quad (8)$$

P_{PV} : PV panel enerji üretimi [W]
 A : PV panel alanı [m²]
 n_{PV} : PV panel modül verimliliği
 H_R : Solar radyasyon değeri [kWh/m²/gün]
 n_d : Akım taşıma indirgeme faktörü
 ρ_g : Yeryüzü yansımaya faktörü

Çalışmamızda n_d değeri invertör, kablo verimlilikleri transformatör kayıpları gibi kayıpları temsil etmektedir ve 0.8 kabul edilmiştir. Yeryüzüne gelen güneş ışınlarının yansımaya sebebi ile olan kayıplar ise ρ_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 [21] ve dokümanda belirtildiği üzere 19.7% olarak alınmaktadır. Ancak aşağıdaki formül ile Formül (8) 'de kullanılan iki parametre tek bir parametreye dönüşmektedir.

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

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 aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

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

3. RÜZGAR-GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Rüzgar-Güneş hibrit enerji sistemi modellenmesi esas olarak ekonomik analize dayanmaktadır. Analiz, birim ünite ile enerji üretimi hesaplaması, enerji talebini karşılayacak sistemi modelleme, modellenen sistemin aylık talebe göre fazla yada az olması ile şebekeye satış yada şebekeden alım ile ekonomik olarak sonuçları geliştirilen araç ile görecektek şekilde devam etmektedir. Kullanıcının aşağıdaki tabloyu doldurması ile geliştirilen araca yapılacak girdiler belirlenmiş olacaktır ve araç içerisinde sonuçlar otomatik olarak hesaplanacaktır.

Tablo 1. Rüzgar-Güneş Hibrit Enerji Sistemi veri giriş tablosu

Proje Adı:			Konum:			Tarih
Saha Adı:						
RÜZGAR VERİSİ			GÜNEŞ VERİSİ		ENERJİ İHTİYACI	
Data	Weibull A	Weibull k	Hava Yoğunluğu (kg/m ³)	Solar Radyasyon (kWh/m ² /gün)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Enerji İhtiyacı (kW)
Months						
Ocak						
Şubat						
Mart						
Nisan						
Mayıs						
Haziran						
Temmuz						
Ağustos						
Eylül						
Ekim						
Kasım						
Aralık						
Ortalama						
Toplam						

Ölçülmüş verilerin bulunmaması durumunda Weibull parametreleri olmayacaktır. Bu tip durumlarda elde olan rüzgar hızları direkt olarak araç içerisinde kullanılabilir. Geliştirilen araç (HOT) aşağıdaki şekilde hesaplamaları yapmaktadır.

Tablo 2. HOT hesaplama adımları

1	Tablodaki veriler HOT içerisine girilir.
2	HOT içerisinde ilgili kısımlara rüzgar hızı ölçüm yüksekliği, türbin gövde yüksekliği, türbinde oluşacak kayıp faktörü, solar radyasyon, PV panel kapasitesi, akım taşıma indirgeme faktörü, yeryüzü yansıma faktörü değerleri ile enerji alım ve satış fiyatları ve proje ömrü girilir. Aynı zamanda birim rüzgar türbini ve aynı kapasitede PV panel için yatırım, işletme ve bakım maliyetleri gerekli alana girilir.
3	Diğer bir girdi kısmında türbin güç eğrisi bilgileri yer alır. Her rüzgar hızında türbinde üretilen enerji değeri yazılır ve bu bilgi enerji üretim hesabında temel girdilerden biridir.
4	Weibull parametrelerine göre ölçüm yüksekliğinde rüzgar hızını hesaplar. Weibull parametrelerinin olmaması durumunda rüzgar hızları ilgili kısma direkt girilebilir.
5	Formül (6) ile gövde yüksekliğinde rüzgar hızı otomatik olarak hesaplanır.
6	Gövde yüksekliğinde hesaplanan rüzgar hızları ile türbin güç eğrisinde gerekli rüzgar hız aralığında interpolasyon ile ilgili rüzgar hızına karşılık gelen türbin enerji üretim değeri hesaplanır.
7	6. adımda hesaplanan değer rüzgar türbininde meydana gelen kayıplar dikkate alınarak belirtilen kayıp faktörü ile çarpılır ve bir türbinden üretilen net enerji miktarı hesaplanır.
8	2. adımda girilen solar radyasyon, PV panel kapasitesi, akım taşıma indirgeme faktörü ve yeryüzü yansıma faktörü değerleri ile bir PV panelden üretilen net enerji değeri hesaplanır.
9	2. adımda girilen aylık enerji ihtiyacı, her ay için bir rüzgar 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	9. adımda belirlenen birinci enerji kaynağı güneş olursa, hibrit sistem oluşturmak adına 1 rüzgar türbini sabit tutularak geriye kalan enerji ihtiyacı PV panel ile tamamlanır. Birincil enerji kaynağının rüzgar olması durumunda aylık enerji talebi bir rüzgar türbininin net enerji üretimine bölünerek aylık rüzgar türbin sayısı bulunur. Tam olmayan rakamlar bir alt tam sayıya yuvarlanarak talebin fazlasının sadece rüzgar 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 rüzgar türbini ve PV panel ile aylık ihtiyaç duyulan enerji miktarı karşılanmış olur.
11	10. adımda her ay için bulunan rakamların ortalaması alınır ve tek bir konfigürasyon oluşturulur. Hesaplanan rakamların tam sayı olmaması durumunda rüzgar türbini sayısı bir alt tam sayıya, PV panel sayısı bir üst tam sayıya yuvarlanır ve son rakamlar elde edilir.
12	11. adımda 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 yada eksik enerji miktarı yine ilk girdi sayfasında belirtilen enerji alım/satım rakamları ile çarpılarak aylık ödenen yada satılan enerjinin değeri hesaplanır ve toplamı ile 1 yıl için yapılan ödeme/kazanç hesaplanır.
14	13. adımda yapılan yıllık ödeme/kazanç değeri proje ömrü ile çarpılarak proje süresinde oluşacak ödeme/kazanç değeri bulunur.
15	11. adımda 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. adım'da 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.

Yukarıda anlatılan 20 adımdan ilk 3 adımda verilerin girilmesi sayesinde geriye kalan tüm adımlar geliştirilen araç (HOT) tarafından otomatik olarak hesaplanacaktır. Bu bakımdan basit arayüzü ile kullanım kolaylığı sağlamaktadır ve yatırım öncesi yatırımcının büyük maliyetler ile gerçekleşmesi planlanan enerji yatırımı öncesinde ön fizibilite çalışması yapmasına ve düşünülen yatırım hakkında fikir sahibi olmasına imkan sağlamaktadır.

4. RÜZGAR-GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ ANALİZİ

Bu çalışmada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makine Mühendisliği Binasına ve İzmir, Urla bölgesinde bulunan bir eve ait elektrik tüketimleri dikkate alınmış ve yukarıda belirtilen rüzgar ve güneş verileri kullanılarak hem HOT ile hem de Homer Pro yazılımı ile hesaplamalar yapılmıştır. Bu bölümde, çalışmamızda bulunan konfigürasyonlar, bu konfigürasyonlara ait hem HOT hem de Homer Pro ile hesaplanan sonuçlar, bu sonuçlar arasındaki farklar ve sebepleri anlatılmaktadır. İlk olarak, kullanılan veriler ile elde edilen ve çalışmamızda dikkate alınan konfigürasyonlar aşağıdaki gösterilmektedir.

Tablo 3. HOT - IYTE Rüzgar-Güneş Hibrit Sistem Konfigürasyonları

Konfigürasyon No.	Rüzgar Türbini Kapasitesi	PV Panel Kapasitesi	Toplam Kapasite
1	100 kW	178,2 kW	278,2 kW
2	200 kW	46,2 kW	246,2 kW

Tablo 4. Homer Pro - IYTE Rüzgar-Güneş Hibrit Sistem Konfigürasyonları

Konfigürasyon No.	Rüzgar Türbini Kapasitesi	PV Panel Kapasitesi	Toplam Kapasite
1	100 kW	180 kW	280 kW
2	200 kW	40 kW	240 kW

Tablo 5. HOT - Urla-Örnek Ev Rüzgar-Güneş Hibrit Sistem Konfigürasyonları

Konfigürasyon No.	Rüzgar Türbini Kapasitesi	PV Panel Kapasitesi	Toplam Kapasite
1	100 kW	534,6 kW	634,6 kW
2	100 kW	660,0 kW	760,0 kW
3	100 kW	396,0 kW	496,0 kW

Tablo 6. Homer Pro - Urla-Örnek Ev Rüzgar-Güneş Hibrit Sistem Konfigürasyonları

Konfigürasyon No.	Rüzgar Türbini Kapasitesi	PV Panel Kapasitesi	Toplam Kapasite
1	100 kW	525,0 kW	625,0 kW
2	100 kW	650,0 kW	750,0 kW
3	100 kW	400,0 kW	500,0 kW

Yukarıdaki tablolarda gösterilen konfigürasyonlar için yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak aşağıdaki tablolarda verilmektedir.

Tablo 7. IYTE Makine Mühendisliği Binası - HOT ve Homer Pro Konfigürasyon-1 Sonuçları

	HOT	Homer Pro	Bağlı fark (%)
1 yıllık Enerji Üretimi (kWh)	494628,4	582386,0	84,9
20 yıllık toplam kazanç (USD)	38276,2	226287,3	16,9
20 yıllık birim enerji maliyeti (USD)	0,091	0,072	126,4
20 yıllık karlılık oranı (%)	30,16	50,41	59,8

Tablo 8. IYTE Makine Mühendisliği Binası - HOT ve Homer Pro Konfigürasyon-2 Sonuçları

	HOT	Homer Pro	Bağlı fark (%)
1 yıllık Enerji Üretimi (kWh)	620435,4	651555,4	95,2
20 yıllık toplam kazanç (USD)	298841,4	364856,8	81,9
20 yıllık birim enerji maliyeti (USD)	0,074	0,066	112,1
20 yıllık karlılık oranı (%)	42,79	51,81	82,6

Tablo 9. Urla Örnek Ev - HOT ve Homer Pro Konfigürasyon-1 Sonuçları

	HOT	Homer Pro	Bağlı fark (%)
1 yıllık Enerji Üretimi (kWh)	730344,2	991932,5	73,6
20 yıllık toplam kazanç (USD)	390021,5	948395,6	41,1
20 yıllık birim enerji maliyeti (USD)	0,137	0,080	171,3
20 yıllık karlılık oranı (%)	-9,67	22,96	-42,1

Tablo 10. Urla Örnek Ev - HOT ve Homer Pro Konfigürasyon-2 Sonuçları

	HOT	Homer Pro	Bağlı fark (%)
1 yıllık Enerji Üretimi (kWh)	879442,2	1192434,3	73,8
20 yıllık toplam kazanç (USD)	697377,2	1352568,7	51,6
20 yıllık birim enerji maliyeti (USD)	0,138	0,072	191,7
20 yıllık karlılık oranı (%)	-8,80	23,54	-37,4

Tablo 11. Urla Örnek Ev - HOT ve Homer Pro Konfigürasyon-3 Sonuçları

	HOT	Homer Pro	Bağlı fark (%)
1 yıllık Enerji Üretimi (kWh)	565551,7	791430,7	71,5
20 yıllık toplam kazanç (USD)	44411,0	537014,2	8,3
20 yıllık birim enerji maliyeti (USD)	0,136	0,089	152,8
20 yıllık karlılık oranı (%)	-11,49	21,63	-53,1

Sonuçların gösterildiği yukarıdaki tablolarda beklenen, sonuçların bağlı farkının 100%'e yakın olmasıdır. Böylece HOT ve Homer Pro ile hesaplanan sonuçların birbirine yakın olduğu ve geliştirilen aracın güvenilirliği hakkında yorum yapılabilir. Bu durumun IYTE için bulunan sonuçlarda doğrulayıcı sonuçlar ile desteklendiğini görmekteyiz. Ancak aksi şekilde Urla'da bulunan örnek ev için bulunan sonuçlar HOT ve Homer Pro'nun farklı olduğunu açıkça göstermektedir. Bunun sebepleri aşağıda listelenmiştir;

- IYTE senaryosunda kullanılan rüzgar verisi ölçülmüş veridir. Bu nedenle hassas güvenilir sonuçlar sağlamaktadır.

- Urla örnek ev senaryosunda, ölçülmüş veriye erişim özel anlaşmalar ve izinler olmadan mümkün olmadığından, rüzgar ve güneş verileri NASA'dan sağlanmıştır. Bu veriler 1°x 1° enlem-boylam çözünürlüğündedir ve enerji hesaplamaları için yeterli çözünürlükte değildir. Bu veri setinde, IYTE ve Urla'da bulunan örnek ev için alınan verilerin aynı olduğu gözlenmiştir. Ancak bunun güneş için olabileceği bilinse de rüzgar için mümkün olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle de sadece NASA verisi kullanılan Urla örnek ev senaryosunda farklılıklar görülmüştür.

- Ölçülmüş rüzgar verisi 10 dakikalık veriler olmakla birlikte bunların aylık ortalamaları HOT ve Homer Pro içerisinde kullanılmıştır. Ancak NASA verisi Homer Pro içerisine otomatik olarak saatlik inmekte ve saatlik değerlendirilmesine rağmen, bu veriler aylık ortalama olarak HOT içerisinde kullanılabilir. Bu nedenle de kullanılan veriler farklı değerlendirilmiştir ve sonuca etki etmiştir.

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 rüzgar türbinlerinde birden fazla kullanılması durumunda daha yüksek kapasiteye sahip daha az sayıda mümkünse tek rüzgar 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 kısaldığı yada uzadığı eklenmelidir. Böylece en uygun konfigürasyon bulunur ve yatırım en iyi şartlarda gerçekleştirilmiş olur.

5. RÜZGAR-GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ BELİRSİZLİK ANALİZİ

Her ölçüm ve hesaplamada olduğu gibi yapılan çalışma sonucu bulunan değerlerde de belirsizlik olacağını unutmamak gerekmektedir. Bu bağlamda çalışmamızda belirsizlik hesaplaması da yapılmıştır. Aşağıdaki denklemde görüldüğü gibi belirsizlik her bir belirsizlik bileşeninin karesinin toplanması ve sonucun karekökünün alınması ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_{\text{Toplam}} = (\varepsilon_{\text{Rüzgar}}^2 + \varepsilon_{\text{Güneş}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Rüzgar enerjisi için dikkate alınan belirsizlik bileşenleri: yapılan ölçüme bağlı belirsizlik, ölçüm yüksekliğinden türbin gövde yüksekliğine rüzgar hızının taşınmasına bağlı belirsizlik, hava yoğunluğuna bağlı belirsizlik, gelecekte rüzgar hızında yaşanabilecek belirsizlik, ve türbin güç eğrisindeki belirsizliktir.

$$\varepsilon_{\text{Rüzgar}} = (\varepsilon_{\text{Ölçüm}}^2 + \varepsilon_{\text{DikeyEkstrapolasyon}}^2 + \varepsilon_{\text{HavaYoğunluğu}}^2 + \varepsilon_{\text{Gelecek}}^2 + \varepsilon_{\text{GüçEğrisi}}^2)^{\frac{1}{2}}$$

Ölçüm cihazlarının kendi teknik dokümanlarında belirtilen belirsizliklere ek olarak ölçüm standartları konusunda Uluslararası banka ve kreditorler tarafından kabul gören Measnet'in (Measuring Network of Wind Energy Institutes) belirlediği standartlar kabul edilmiştir [22]. Measnet'e göre tüm ölçüm kampanyası Measnet tarafından takip edilmiş ise ölçüm belirsizliği 0%, eğer anemometreler Measnet tarafından kalibre edilmiş, dokümanlar Measnet tarafından kontrol edilmiş ise 1-2%, ve eğer hiç bir süreçte Measnet bulunmamışsa 5% ölçüm belirsizliği alınmalıdır. Bu çalışmada lisanslı bir santralden ölçüm verisi alınmasından dolayı 2% ölçüm belirsizliği alınmıştır. NASA verisi için bu değer 2.5% kabul edilmiştir.

Rüzgar hızının bir yükseklikten diğerine taşınması durumunda oluşan belirsizlik için, farklı α değerleri alınarak rüzgar hızları hesaplanmış ve aralarındaki sapmaya bakılarak 2.9% dikey ekstrapolasyon belirsizliği hesaplanmıştır.

Hava yoğunluğunda oluşan belirsizlik kullanılan sensörlerin teknik verilerinde yer almaktadır sıcaklık ile basınçtan etkilenmektedir. İki sensörün belirsizliği dikkate alındığında 1.02% olarak hesaplanmıştır.

2002 ve 2014 yıllarında gözlemlenen düşük rüzgar hızları gelecekte de aynı durumun oluşabileceğinin habercisidir. Bu nedenle yapılan çalışmalardan [23] elde edilen verilere göre 2% yıllık belirsizlik kabul edilmiştir.

Türbin güç eğrisi belirsizliği 7,8% kabul edilmiş olup farklı sahalarda farklı rüzgar türbinleri ile yapılan değerlendirmeler [24] sonucundan alınmıştır.

Güneş enerjisi ile ilgili olarak solar radyasyon değerindeki ölçüm belirsizliği, modül verimlilik belirsizliği ve gelecekte güneş radyasyon verilerinde yaşanabilecek değişimlerin belirsizliği dikkate alınmıştır.

$$\varepsilon_{\text{Güneş}} = (\varepsilon_{\text{Radyasyon}}^2 + \varepsilon_{\text{Verimlilik}}^2 + \varepsilon_{\text{Gelecek}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Çalışmamızda kullanılan güneş radyasyon verisi NASA tarafından sağlanmıştır ve kendi veri paylaşım siteminde [25, 26] belirsizliği 22,73% olarak belirtilmiştir. Bu değer saatlik veriye aittir ve HOT içerisinde aylık ortalama olarak kullanılan verilerin belirsizliği artacağından 25% olarak kabul edilmiştir.

Modül verimlilik belirsizliği PV panel teknik dokümanında [21] +10% / -0% olarak verilmektedir.

Yıllık güneş radyasyon verisinde yaşanabilecek belirsizlik ise dünyanın farklı bölgelerinde yapılan uzun süreli ölçümlere dayalı hesaplamalar sonucu yayınlanan çalışmadan [27] elde edilmiştir. Çalışma içerisinde Türkiye için İzmir ili verileri değerlendirilmiş ve -6,7% / +4,7% belirsizlik hesaplanmıştır.

Yukarıdaki tüm hesap ve kabuller dikkate alınarak hesaplamalar yapıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 12. Belirsizlik hesaplamaları sonuçları

Belirsizlik Hesapları	Belirsizlik Sonucu
IYTE - HOT Hesaplamaları için	29,0%
IYTE - Homer Pro Hesaplamaları için	27,1%
Urla Örnek Ev - HOT Hesaplamaları için	28,9%
Urla Örnek Ev - Homer Pro Hesaplamaları için	26,9%

6. SONUÇ

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 araç/yazılımlar artacaktır. Basit ve hızlı bir şekilde kullanılarak ön değerlendirme yapılmasına imkan sağlayan HOT beklenen gelişmelere bir adım olarak değerlendirilebilir.

Sektörde kullanılan çok profesyonel yazılımlar ve metotlar vardır ve yüksek maliyetlerle yatırımcılara sunulmaktadır. Bu çalışmanın amacı geliştiren araç HOT ile ön çalışma yapılmasıdır ve profesyonel yöntemlere başvuru kararının verilmesine yardımcı olmaktır. Bu nedenle Homer Pro ile aynı sonuçların bulunması bu çalışmanın bir hedefi değildir.

Ancak sonuçlar incelendiğinde, güvenilir veriler kullanılması halinde elde edilen sonuçların Homer Pro ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu da geliştirilen aracın gelecekte yapılacak çalışmalar ile daha güvenilir hale getirilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. **Crosby, Alfred W.** *Children of the sun: A history of humanity's unappeasable appetite for energy.* WW Norton, 2006.
2. **Strateji Geliştirme Başkanlığı,** *Dünya ve Ülkemiz Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü,* Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2016. (www.enerji.gov.tr)
3. **Abbasi, Tasneem, and ABBASI SA.** *Renewable energy sources: their impact on global warming and pollution.* PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.
4. **Ages, Early Middle,** *History of wind power,* Wind Power Overview (2010): 23
5. **Office of Energy Efficiency and Renewable Energy,** *Historic Wind Development in New England: The Age of PURPA Spawns the "Wind Farm".* U.S. Department of Energy 2008
6. **World Wind Energy Association WWEA.** 2016 half year report, 2016
7. **Turkish Wind Energy Association.** *Turkish Wind Energy Statistics Report, January 2017,* 2017.
8. **Jones, Geoffrey G., and Loubna Bouamane.** *Power from Sunshine: A Business History of Solar Energy,* 2012.
9. **REN21,** *Renewables 2016 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat), ISBN 978-3-9818107-0-7. 2016.
10. **Williams, James C.** *History of energy,* Energy, 2006
11. **Office of Energy Efficiency and Renewable Energy,** *History of Hydropower,* U.S. Department of Energy
12. **Lund, John W., et al.** Characteristics, development and utilization of geothermal resources-a Nordic perspective. *Episodes* 31.1 (2008): 140-147.
13. **Geothermal Energy Association.** 2016 Annual U.S & Global Geothermal Power Production Report, March 2016.
14. **Aktaş, A., and S. Özer.** Investigation of potential of the olive-pomace oil for biodiesel production, *Ziraat Fakültesi Dergisi-Süleyman Demirel Üniversitesi* 9.1 2014: 132-139.
15. **Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu,** *Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik,* 2013
16. E-mail confirmation, by Taylan KABAS from ENDA Enerji, 2016-10-21
17. **NASA,** Surface Meteorology and Solar Energy, (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/global/text/SSER6metadata.txt>)
18. **Homer Pro web site,** (www.homerenergy.com)
19. **Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Orman ve Su İşleri Bakanlığı,** *Rüzgar ve Güneş Enerjisine Dayalı Lisans Başvurularına İlişkin Ölçüm Standardı Tebliği,* 2012
20. **Polaris America LLC,** ,Power Curve - P25-100
21. **Panasonic Electric Works Europe AG,** Photovoltaic module HIT® VBHN330SJ47 / VBHN325SJ47, N330-N325, 05/2016
22. **Measnet,** *Evaluation of Site-Specific Wind Conditions,* 2009.
23. **NYSERDA, New York State Energy Research and Development Authority, Roeth, Jacques,** *Wind Resource Assessment Handbook,* 2010
24. **German Wind Energy Institute GmbH (DEWI),** *Uncertainty of Annual Energy Production for a Specific Turbine Model Based on a Set of IEC 61400-12 Measurements,*
25. **NASA,** Surface Meteorology and Solar Energy, Accuracy (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s06#s06>)
26. **NASA,** Surface Meteorology and Solar Energy, Methodology (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s07#s07>)
27. **Suri, Marcel, et al.,** *Uncertainties in solar electricity yield prediction from fluctuation of solar radiation.,* 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference. 2007

Ekler

1. IYTE Rüzgar-Güneş Hibrit Enerji Sistemi veri giriş tablosu

Project Name: Wind-Solar Hybrid Energy System for Mechanical Engineering Building of IZTECH				Location: Gülbahçe - Urla			Date
Site Name:				Easting: 465440 ¹			
				Northing: 4241273 ¹			
	WIND DATA			SOLAR DATA			DEMAND
Data	Weibull A	Weibull k	Density (kg/m ³)	Clearness	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	Average Temperature (°C)	Energy Demand (kW)
Months							
January	7,94	1,11	1,251	0,48	2,17	7,7	29.123
February	10,46	1,97	1,249	0,51	3,03	8,0	41.681
March	8,60	1,48	1,237	0,57	4,43	10,8	43.167
April	9,33	1,59	1,216	0,60	5,82	15,7	35.173
May	7,68	1,82	1,193	0,66	7,28	21,4	30.172
June	9,18	2,08	1,174	0,72	8,34	26,1	45.124
July	11,27	2,56	1,164	0,73	8,23	28,8	59.216
August	12,44	2,62	1,165	0,72	7,34	28,5	63.129
September	10,06	2,14	1,180	0,69	5,86	24,5	51.632
October	9,64	2,01	1,202	0,63	4,07	19,2	13.657
November	10,56	1,91	1,227	0,53	2,56	13,3	22.764
December	10,19	1,77	1,237	0,44	1,82	9,0	34.289
Average	9,78	1,92	1,210	0,61	5,08	17,8	39.094
Total					60,95		469.127

1. Coordinate system is UTM ED50.

2. Urla-Örnek Ev Rüzgar-Güneş Hibrit Enerji Sistemi veri giriş tablosu

Project Name: Wind-Solar Hybrid Energy System for an House located in Urla Town			Location: Urla			Date	
Site Name:			Easting:				
			Northing:				
		WIND DATA		SOLAR DATA		DEMAND	
Data Months	Monthly Mean Wind Speed	Air Density (kg/m ³)	Clearness	Solar Radiation (kWh/m ² /day)	Average Temperature (°C)	Energy Demand of one house (kW)	Energy Demand of 100 houses (kW)
January	6,21	1,251	0,48	2,17	7,7	718,0	71.800
February	7,22	1,249	0,51	3,03	8,0	673,0	67.300
March	6,43	1,237	0,57	4,43	10,8	533,0	53.300
April	5,57	1,216	0,60	5,82	15,7	481,0	48.100
May	4,74	1,193	0,66	7,28	21,4	254,0	25.400
June	4,65	1,174	0,72	8,34	26,1	298,5	29.850
July	5,35	1,164	0,73	8,23	28,8	200,0	20.000
August	5,15	1,165	0,72	7,34	28,5	262,0	26.200
September	5,02	1,180	0,69	5,86	24,5	282,0	28.200
October	6,31	1,202	0,63	4,07	19,2	493,0	49.300
November	5,88	1,227	0,53	2,56	13,3	434,0	43.400
December	6,14	1,237	0,44	1,82	9,0	533,0	53.300
Average	5.72	1,210	0,61	5,08	17,8	430,1	43.010
Total				60,95		5.161,5	516.150