DÜMF Mühendislik Dergisi

web: http://dergipark.gov.tr/dumf

Araştırma Makalesi / Research Article

Rüzgâr türbini ile fotovoltaik modüler sistemin karşılaştırılması: Ege Üniversitesi-İzmir örneği

Levent BİLİR*
Yaşar Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İzmir
levent.bilir@yasar.edu.tr ORCID: 0000-0002-8227-6267, Tel: (232) 570 82 49

Hüseyin Günhan ÖZCAN
Yaşar Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İzmir
huseyin.ozcan@yasar.edu.tr ORCID: 0000-0002-8639-6338, Tel: (232) 570 82 93

Nurdan YILDIRIM
Yaşar Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
nurdan.yildirim@yasar.edu.tr ORCID: 0000-0001-5140-6340, Tel: (232) 570 82 51

Hüseyin GÜNERHAN
Ege Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir
huseyin.gunerhan@ege.edu.tr ORCID: 0000-0003-4256-2418, Tel: (232) 311 51 25

Geliş: 16.09.2019, Revizyon: 09.03.2020, Kabul Tarihi: 22.05.2020

Öz

Bu çalışmada rüzgâr ve güneş enerjisi bakımından önemli potansiyele sahip olan İzmir'de bulunan Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü binası için yaklaşık aynı kapasiteye sahip bir rüzgâr türbini (55 kW) ile fotovoltaik modüler sisteminin (54,4 kW) enerji üretimi ve ekonomik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Makina Mühendisliği Bölümü binasının iklimlendirilmesinde klimalar kullanılmaktadır ve ele alınmış olan rüzgâr türbini ve fotovoltaik modüler sisteminin bu klimaların elektrik kullanımının ne kadarını karşılayabilecekleri incelenmiştir. Her iki sistemin enerji üretimleri TRNSYS yazılımı ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Makina Mühendisliği Bölümü binasının çatısında kurulu bulunan ölçüm istasyonundan alınmış olan dakikalık rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımı verileri saatlik veriye çevrilmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Sonuç olarak ısıtma sezonunda fotovoltaik modüler sistemin ihtiyacın %88,85'i kadar, rüzgâr türbininin ise %72,15'i kadar elektrik üretimi gerçekleştirebileceği hesaplanmıştır. Soğutma sezonunda ise fotovoltaik modüler sistemin ihtiyacın %202,25'i, rüzgâr türbininin ise %114,45'i düzeyinde elektrik üretimi yapabileceği belirlenmiştir. Fotovoltaik modüler sisteminin basit geri ödeme süresi 9,19 yıl, rüzgâr türbinin basit geri ödeme süresi ise 14,52 yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde; Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü binası için fotovoltaik modüler sisteminin kurulumunun enerji üretimi açısından ve ekonomik olarak rüzgâr türbini kurulumdan daha tercih edilir durumda olduğu görülmüştür.

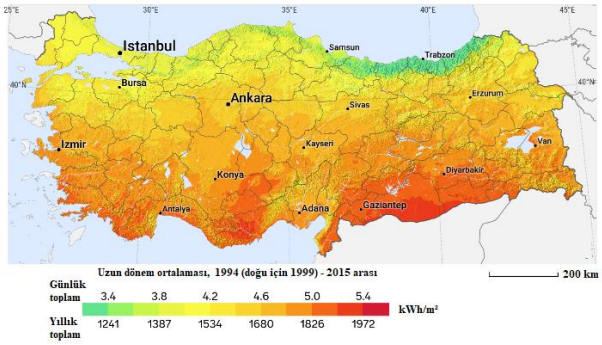
Anahtar Kelimeler: *Rüzgâr Türbini; Fotovoltaik Sistem; Yenilenebilir Enerji; TRNSYS Analizi; Basit Geri Ödeme Süresi*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.620774

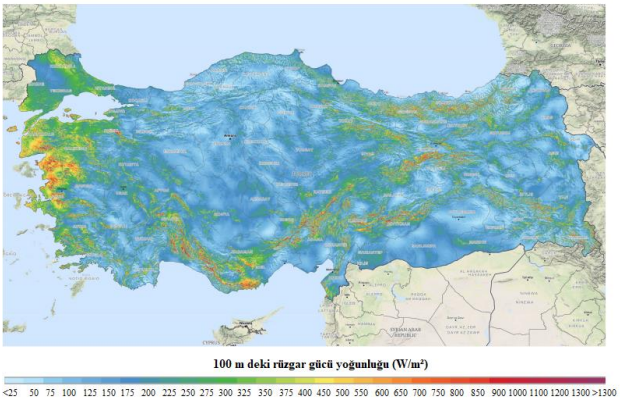
Giriş

Türkiye'de son yıllarda yenilenebilir enerji uygulamaları sıklaşmış ve özellikle rüzgâr türbinleri ile fotovoltaik sistemler konusunda yüksek yatırımlar gerçekleştirilmiştir. 2018 yılı itibariyle güneş enerjisi santral sayısı 5.868 adet, toplam kurulu güç ise 5.063 MW değerine ulaşmıştır. Bu santrallerden 2018 yılında elde edilen elektrik enerjisi 7.477,3 GWh'dir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019 (a)). 2018 yılında işletmedeki rüzgâr enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücü ise 7.005 MW'tır ve aynı yıl bu santrallerden elde edilen elektrik enerjisi 19.882 GWh değerindedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019 (b)). Rüzgâr ve güneş enerjisinin kullanımına yönelik Türkiye'de her iki yenilenebilir enerji türü için yüksek potansiyel bulunmasının sonucu olarak bu değerlerin elde edildiği görülmüştür. Türkiye geneli için ortalama güneş ışınımı 3,6 kWh/m^2'dir, toplam güneşlenme süresi ise 2.160 saat/yıl olmaktadır (Melikoglu, 2016). Şekil 1'de görüldüğü üzere Türkiye'nin özellikle orta ve güney kesimlerinde bu değerler ortalamadan daha yüksek gerçekleşmekte ve güneş enerjisi yatırımlarına daha elverişli bir zemin hazırlamaktadır.



Şekil 1. Türkiye'de yatay düzleme gelen günlük ve yıllık güneş ışınımı değerleri (Global Solar Atlas, 2019)

Şekil 2 ile görülebileceği üzere rüzgâr enerjisi potansiyeli Türkiye'nin Ege ve Marmara bölgelerinde yüksek mertebelerdedir ve dolayısıyla genel olarak rüzgâr enerjisi santralleri bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır.



Şekil 2. Türkiye'de ortalama rüzgâr enerjisi değerleri (Global Wind Atlas, 2019)

Türkiye'nin batısında, Ege denizi sahilinde bulunan İzmir ili hem rüzgâr hem de güneş enerjisi uygulamaları için uygun bir noktadadır. Bu nedenle, İzmir ili Bornova bölgesinde bulunan Ege Üniversitesi kampüsü içerisindeki Makina Mühendisliği Bölümü binasına kurulu ölçüm istasyonundan 2019 yılı boyunca alınan güneş ışınımı, dış sıcaklık, rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü veri grubu bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Bu veri grubu altında hemen hemen aynı kapasiteye sahip bir rüzgâr türbini ile fotovoltaik modüler sistemin üreteceği enerji miktarları hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Rüzgâr türbini ve fotovoltaik modüler sistemin ayrı ayrı veya hibrit bir sistem olarak incelendiği yayınlar birçok farklı ülke için gerçekleştirilmiştir. Yakın geçmişte rüzgâr türbini veya fotovoltaik sistemin ayrı şekilde incelendiği yayınlara ait örnekler ise aşağıda verilmiştir.

İran'ın farklı bölgelerinde küçük rüzgâr türbinlerinin konutsal alanda kullanımı HOMER yazılımı ile incelenmiştir. Ele alınan bölgelerin %30'u için rüzgâr türbinlerinin ekonomik olarak uygun olduğu ve en uygun türbin kapasitesinin ise 3 kW olduğu belirtilmiştir (Hosseinalizadeh vd., 2017). Balıkesir'deki 11 farklı meteoroloji istasyonundan alınan rüzgâr hızı verilerinin kullanımı ile bu bölgelere kurulacak 5 farklı rüzgâr türbininin enerji üretimleri belirlenmiş ve ekonomik olarak karşılaştırılmıştır (Aslan, 2018). Afrika'da rüzgâr türbinleri ile kurulacak bağımsız mikro şebekelerin fotovoltaik sistem

ve Diesel jeneratörlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Ortalama rüzgâr hızının 6 m/s'den yüksek olduğu yerlerde rüzgâr türbinlerinin fotovoltaik sistem ve dizel jeneratörler ile ekonomik olarak rekabet edebileceği belirtilmiştir. Afrika'da bu koşulları sağlayan çok fazla bölge bulunmadığı tespit edilmiştir (Gabra vd., 2019). 10 kW kapasiteli bir rüzgâr türbini için enerji ve ekserji analizleri İran'da bulunan iki ayrı şehir için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu iki şehir için rüzgâr türbininden elde edilen elektriğin maliyeti de hesaplanmıştır (Ehyaei vd., 2019). Türkiye'de bulunan 77 meteoroloji istasyonundan alınan veriler kullanılarak bu bölgelerin ortalama rüzgâr hızı değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca Çanakkale ve İstanbul şehirleri için Weibull parametre değerleri hesabı değişik seneler için gerçekleştirilmiştir ve rüzgâr enerjisi güç yoğunluğu değerleri belirlenmiştir (Arslan vd., 2020).

Rüzgâr türbini ve fotovoltaik sistemin bir arada hibrit şekilde kullanılması ile ilgili çalışmalardan örnekler de aşağıda özetlenmektedir.

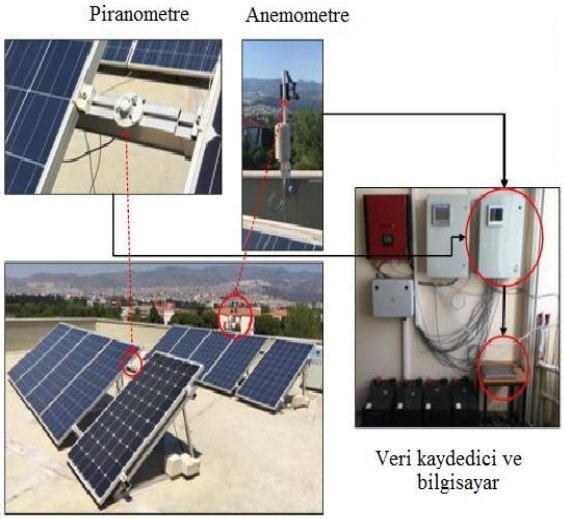
3 kW kapasiteli bir rüzgâr türbini, 17,97 m^2 panel alanına sahip fotovoltaik sistem ve 1 kW net güç çıkışı olan yakıt pilinden oluşan hibrit bir sistemin, iklimlendirme ihtiyacı hariç tutularak günlük 5 kWh elektrik ihtiyacı bulunan bir evin gereksiniminin ne kadarını karşılayabileceğinin analizi Ankara'da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Atılım Üniversitesi kampüsünde ölçülen rüzgâr verileri ile Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan güneş ışınım verileri kullanılmış olup, Kasım ayı haricinde enerji ihtiyacının tümünün karşılanabildiği görülmüştür (Devrim ve Bilir, 2016). Yer kaynaklı ısı pompası kullanılarak ısıtılan ve soğutulan, İzmir ilinde kurulu 150 m^2'lik bir seranın iklimlendirme ve aydınlatma ihtiyacı için gerekli olan elektrik miktarı Design Builder ve Energy Plus yazılımları kullanılarak üç değişik ürün yetiştirilmesi koşullarında hesaplanmıştır. Aylık olarak bu ihtiyacın ne kadarının sera çatısının güney yönüne bakan kısmı üzerine kurulacak olan 66 adet panelin yer aldığı fotovoltaik sistem ile karşılanabileceği araştırılmıştır. Ayrıca aylık olarak fazla üretilen elektriğin şebekeye satıldığı, eksik elektrik enerjisinin de şebekeden alındığı düşünülerek bir ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak kullanılan sistemin geri ödeme süresi 7 – 7,4 sene aralığında belirlenmiştir (Yildirim ve Bilir, 2017). Ürdün'de bulunan bir çimento fabrikasında uygulanmak üzere 26 MW kapasiteli rüzgâr türbini, 20,75 MW kapasiteli fotovoltaik sistem ve 16,80 MWh kapasiteli Lityum-İyon pillerden oluşan bir hibrit sistem göz önüne alınmıştır. Bu sistemin elektrik ihtiyacını karşılama oranı, elektrik maliyeti göz önüne alınarak belirlenmiştir. Sonuç olarak sistemin basit geri dönüş süresi 3,44 yıl hesaplanmıştır (Al-Ghussain vd., 2018). Avrupa'da ayrı iklim bölgelerinde yer alan beş farklı şehir için 117 m^2'lik müstakil bir evin çatısına kurulacak 2,5 kW kapasiteli fotovoltaik sistem ve 2,5 kW kapasiteli bir rüzgâr türbininden oluşan şebekeye bağlı hibrit sistem ele alınmıştır. Evin iklimlendirme ihtiyacının ısı pompasıyla sağlandığı düşünülerek, aydınlatma ve diğer ekipmanlar ile birlikte toplam elektrik ihtiyacı Design Builder ve Energy Plus yazılımlarıyla belirlenmiştir. Ayrıca, incelenen hibrit sistemin belirlenen bu ihtiyacı ne oranda karşılayacağı tespit edilmiştir. Aylık elektrik üretimi ve elektrik ihtiyacı karşılaştırılarak şebekeye elektrik satışı veya şebekeden elektrik alımının maliyeti belirlenmiştir. Sonuç olarak sistemin basit geri ödeme süresi ile birlikte sistemin üretimi için kullanılan enerjiyi de göz önüne alan enerji geri ödeme süresi hesaplanmıştır. Basit geri ödeme süresinde en düşük değer Madrid için bulunurken enerji geri ödeme süresinde en düşük değerin İzmir'e ait olduğu belirlenmiştir (Bilir ve Yildirim, 2018). Portekiz'de bulunan Tomar bölgesinde bir endüstriyel binanın elektrik ihtiyacı için kurulması düşünülen 4 kW kapasiteli bir rüzgâr türbini ile seçilen fotovoltaik sistemin karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak fotovoltaik sistemin daha iyi performansa, daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha az yer

gereksinimine sahip olduğu belirtilmiştir (Pinheiro vd., 2019).

Yukarıdaki örnekler ile birçok bölge için rüzgâr türbini ve fotovoltaik sisteminin kullanıldığı enerji teknolojileri incelenmiştir. Ancak bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunda meteoroloji istasyonlarından alınan rüzgâr hızı, dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımı değerleri kullanılmıştır. Güneş ışınımı ve dış hava sıcaklığı değerleri incelenen dar bir bölge için (örneğin bir il için) farklı konumlarda önemli ölçüde değişmeyeceği için sistemin kurulacağı noktanın yakınlarındaki bir meteoroloji istasyonundan alınan güneş ışınımı ve dış hava sıcaklığı değerlerinin kullanımı çoğu zaman herhangi bir hataya neden olmaz. Hâlbuki sistem kurulumu için ele alınan noktadaki rüzgâr hızı değerleri meteoroloji istasyonundan alınan değerlerle bazen önemli farklılıklar içerebilmektedir. Bu durum rüzgâr türbini ile üretilen enerji hesabında hatırı sayılır derecede hata yapılmasına neden olabilir. Bu çalışmada Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü binası çatısına kurulan ve yerden yüksekliği 30 m olan ölçüm istasyonu ile bir dakika aralıklı rüzgâr hızı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu değerler kullanılarak oluşturulan saatlik ortalama rüzgâr hızları ise analizlerde kullanılmıştır. Aynı zamanda rüzgâr yönü, dış hava sıcaklığı ve eğimli yüzeydeki güneş ışınımı (fotovoltaik panellerin eğim açısı olan 37°) ölçümleri de gerçekleştirilerek analizlerde yer almıştır. TRNSYS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler deneysel çalışmalar ile ölçülen iklim veri grubu ile çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda hemen hemen aynı kapasiteye sahip olan fotovoltaik modüler sistem ile rüzgâr türbinin aylık enerji üretimleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak her iki teknoloji kullanımı için basit geri ödeme süreleri hesaplanmıştır. Ayrıca, Makina Mühendisliği Bölümü binasındaki mekânların ısıtma ve soğutmasında kullanılan klima cihazlarının elektrik tüketim miktarlarının ne ölçüde rüzgâr türbini ve fotovoltaik modüler sistem ile karşılanabildiği araştırılmıştır.

Veri Toplama Sistemi

Bu çalışmada küçük ölçekli rüzgâr türbinine ait enerji üretimini belirleyen rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü ile fotovoltaik modüler sistemin enerji üretiminde belirleyici olan 37° eğimli yüzeydeki güneş ışınımı değerleri bir dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Bu ölçüm işlemleri sırasında Şekil 3 ile gösterildiği gibi silikon fotodiyot piranometre (Deltaohm, 2019 (a)) ve katı hal manyetik sensör ile rüzgârgülü ve potansiyometre içeren anemometre (Davis Instruments, 2019) cihazları kullanılmıştır. Anemometrenin hemen altında ise kapasite nem sensörü ve platinyum sıcaklık sensörünün yer aldığı silindirik koruyuculu bir dış hava ölçüm istasyonu yer almaktadır (Deltaohm, 2019 (b)). Her iki cihazdan alınan mili volt veya mili amper mertebesindeki sinyaller veri kaydedici aracılığıyla güneş ışınımı (W/m^2), rüzgâr hızı (m/s) ve rüzgâr yönü (°) veri grubuna dönüştürülerek depolanmıştır (Elimko, 2019). Ardından ilgili kaydediciye ait yazılım programı kullanılarak istenilen veri grubu ölçüm aralığı ve periyodu göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu çalışmada bir dakika aralıkla ölçülen veri grubu tüm yılı kapsayan analizler gerçekleştirildiğinden ötürü bir saatlik veri grubuna dönüştürülmüştür.

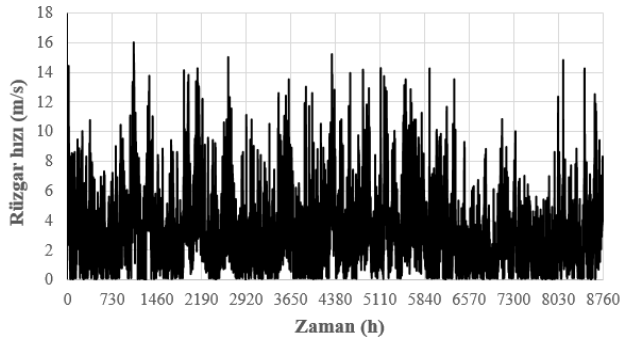


Şekil 3. Veri toplama düzeneği

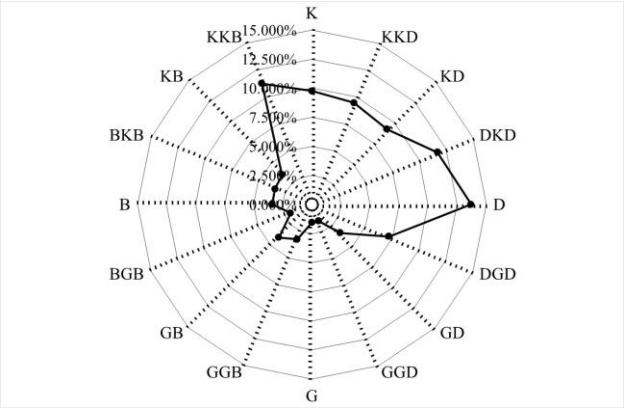
Rüzgâr ve Güneş Işınımı Verileri

2019 yılında gerçekleştirilmiş ölçümler sonucunda ele alınan konuma ait yıllık ortalama

rüzgâr hızının 2,90 m/s, 37º eğimli yüzeye düşen yıllık ortalama güneş ışınımının ise 407,07 W/m^2 olduğu tespit edilmiştir. Rüzgâr hızının değişimi Şekil 4'te sunulmaktadır. Ayrıca rüzgârın esme yönünü gösteren grafik Şekil 5'te verilmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere hâkim rüzgâr yönü doğu yönüdür.

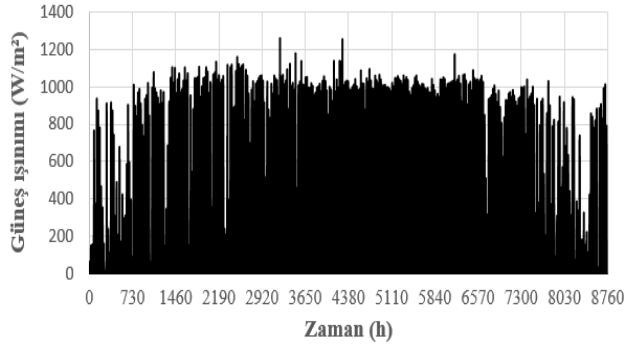


Şekil 4. Saatlik rüzgâr hızı değerleri

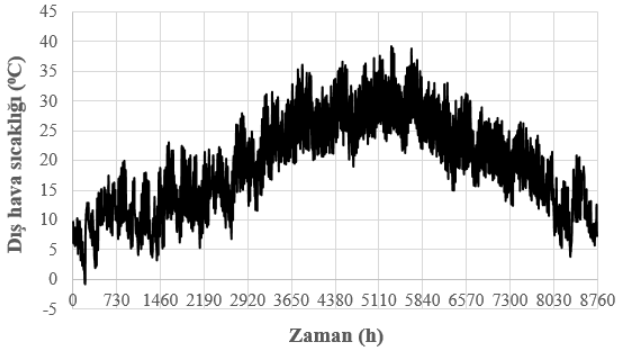


Şekil 5. Rüzgâr yönü

Eğimli yüzeye ait küresel güneş ışınımının ve dış hava sıcaklığının değişimi sırasıyla Şekil 6 ve 7'de gösterilmektedir.



Şekil 6. Saatlik güneş ışınımı değerleri



Şekil 7.Saatlik dış sıcaklık değerleri

Ele Alınan Rüzgâr Türbini ve Fotovoltaik Paneller

Bu çalışmada incelenen rüzgâr türbini ve fotovoltaik modüler sistemin özellikleri aşağıda tanımlanmıştır.

Rüzgâr Türbinine Ait Teknik Özellikler

Çalışmada 55 kW kapasiteli bir rüzgâr türbininin analizi yapılmıştır. Türbin devreye giriş hızının düşük olması nedeniyle bu model seçilmiştir. Türbinin verileri Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1. Rüzgâr türbininin karakteristik değerleri (Ecoenergy Renewables, 2019)

Özellik	Değer	Birim
Nominal Güç	55	kW
Devreye Girme Hızı	2,5	m/s
Nominal Hız	9	m/s
Devreden Çıkma Hızı	25	m/s
Rotor Çapı	20	m
Göbek Yüksekliği	34	m

Fotovoltaik Modüler Sistemine Ait Teknik Özellikler

Fotovoltaik modüler sistemde yer alan panellerin birim kapasiteleri gelişen teknoloji ile artmaktadır. Bu çalışmada da yüksek güç üretimi potansiyeli bulunan 320 W kapasiteye sahip fotovoltaik paneller kullanılmıştır (Sun Power, 2019). Ele alınan bina çatısı göz önünde bulundurulduğunda 170 adet panel yerleştirilebilmektedir. Böylelikle toplam fotovoltaik panel kapasitesi 54,4 kW olmaktadır. İlaveten bu çalışma kapsamında Makina Mühendisliği Bölümü binasındaki mekânların ısıtma ve soğutmasında kullanılan

klima cihazlarının aylık elektrik tüketim miktarlarının ne kadarını karşılayabildikleri araştırıldığından ötürü alternatif akım (AC) elde edilmesi önem kazanmaktadır. Bu nedenle fotovoltaik panellerin üreteceği doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi evirici (inverter) kullanımı ile gerçekleştirilecektir. Her 5 adet fotovoltaik panelin 1 adet eviriciye bağlandığı modüler bir yapı oluşturulmuştur. Bu kapsamda ele alınan panel ve evirici özellikleri Tablo 2 (a) ve (b) ile verilmektedir.

Tablo 2. Fotovoltaik modüler sisteme ait karakteristik değerler

a) Fotovoltaik panel özellikleri (Sun Power, 2019)

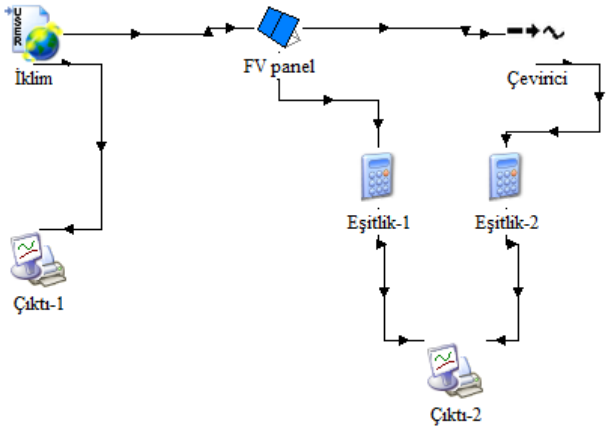
Özellik	Değer	Birim
Maksimum Güç	320	W
Verim	19,9	%
Maksimum Güçte Sıcaklık Katsayısı	-0,35	%/°C
Panel Alanı	1,63	m^2
Referans Sıcaklık	20	°C
Referans Koşullarında Güneş Işınımı	800	W/m^2

b) Evirici özellikleri (Trannergy, 2020)

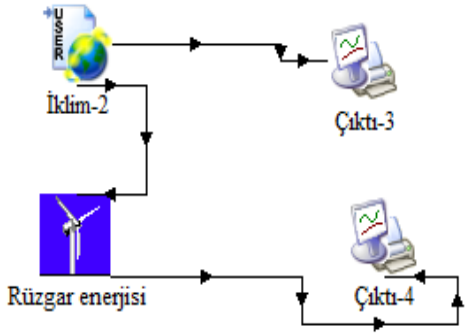
Özellik	Değer	Birim
Maksimum DC Güç	2,3	kW
Maksimum Güçte Gerilim Aralığı	70-450	V
Verim	96,5	%
AC Güç	2	kW
Boyutlar (en-boy-yükseklik)	0,32-0,38-0,14	m

TRNSYS Programı ile Gerçekleştirilen Nümerik Çalışmalar

Mühendislikte yer alan birçok problemde birbiri ile bağıntılı değişkenlerin modellenmesi ve benzetimi gerçekleştirilirken bilgi teknolojisi uygulamasının yanı sıra iyi bir ara yüze sahip, zaman açısından avantaj sağlayan ve olabildiğince hatasız çözüm sunan bir yazılım programı gereksinimi özellikle son yıllarda ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda günümüzde birçok alanda çeşitli yazılım programları geliştirilmiş olup, bu çalışma kapsamında zamana bağlı benzetim sisteminin oluşturulabildiği, tam ve genişletilebilir bir işlem çevresine sahip TRNSYS yazılım programına yer verilmiştir (TRNSYS, 2019). Program aracılığıyla gerçekleştirilen modelleme ve benzetim çalışmaları sırasında kullanılan bileşen modelleri ise sırasıyla fotovoltaik modüler sistem ve küçük ölçekli rüzgâr türbini için Şekil 8 (a) ve (b) ile gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. a) Fotovoltaik modüler sisteme, b) Rüzgâr türbinine ait TRNSYS modelleri

Şekil 8 (a)'dan görüleceği üzere fotovoltaik modüler sisteme ait gerçekleştirilen modelleme ve benzetim çalışmaları kapsamında öncelikle deneysel çalışmalar ile oluşturulan ve bir saatlik periyodu kapsayan iklim veri grubunu okuyabilen bir iklim modeli kullanılmıştır. Bu modele ait dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı çıktı değerleri ise tekli/çoklu kristalin panel performans modeli için girdi parametreleri olarak belirlenmiştir. Ayrıca PV panel grubunu temsilen kullanılan performans modelinin ürettiği güç çıktısı batarya kullanımının olmadığı fotovoltaik sistemler için evirici modeli bileşeninin güç girdisi ile ilişkilendirilmiştir. İklim koşulları, PV panel

grubu ve evirici arasındaki girdi-çıktı parametre eşleştirmelerine ek olarak Şekil 8 (a)'daki Eşitlik-1 ve Eşitlik-2 bileşenlerine yer verilmiştir. Bu sayede 5 adet fotovoltaik panel ve 1 adet eviriciden oluşan modüler yapı toplam 170 adet fotovoltaik panel ve 34 adet eviricinin yer aldığı sistemi oluşturmak için kullanılmıştır. Son olarak Şekil 8 (a) da gösterilen çıktı bileşenleri vasıtasıyla benzetim çalışmaları sırasında iklim veri grubu özellikleri ile fotovoltaik panellere ait DC ve AC güç-enerji grafiklerin çizilmesi ve sonuçların veri dosyasına kaydedilmesi sağlanmıştır.

Şekil 8 (b) ile ise küçük ölçekli rüzgâr türbinine ait modelleme ve benzetim çalışmaları kapsamında kullanılan bileşenler görülmekte olup, fotovoltaik modüler sistemden farklı olarak güç ve rüzgâr hızı karakteristiğine bağlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi modeli kullanılmıştır.

En genel anlamda Şekil 8 (a) ve (b) ile verilen bileşenlerden iklim modeline ait dış dosya, Veri Toplama Sistemi bölümünde tanımlanan iklim ölçüm veri grubu kullanılarak oluşturulmuştur. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi, tekli/çoklu kristalin panel performans modeli ve evirici modeli bileşenlerine ait parametreler ise sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 (a) ve Tablo 2 (b) ile verilen değerler yardımıyla oluşturulmuştur.

Ekonomik Değerlendirme

Bu çalışma kapsamında her ne kadar yenilenebilir enerji türleri arasında yer alan fotovoltaik modüler sistem ve rüzgâr türbini, çevresel ve sürdürülebilirlik açısından avantajlara sahip olsa da teknik incelemenin ekonomik değerlendirme ile birleştirilerek uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda basit geri ödeme süresi her iki sistem için ilk yatırım maliyetleri ve gerçekleştirilen enerji üretim değerlerine karşılık gelen yıllık kazançlar dikkate alınarak aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Basit\ geri\ ödeme\ süresi = \frac{ilk\ yatırım\ maliyeti}{yıllık\ kazanç} \quad (1)$$

İlk yatırım maliyetleri sistem bileşenleri, kurulum, yerine ulaşım, bağlantı işlemleri vb. kalemlerin ele alınması ile anahtar teslim olarak fotovoltaik modüler sistem ve rüzgâr türbini için sırasıyla 1.300 USD/kW, yaklaşık olarak 7.540 TL/kW (Bilir ve Yildirim, 2018) ve 1.248 Euro/kW, yaklaşık 7.990 TL/kW (Baltic Energy Conservation Agency, 2018) olarak ele alınmıştır. Elektriğin kWh başına maliyeti ise orta gerilim, çift terimli tarife için mesken tipi kullanıcı temel alınarak gündüz saatlerindeki kullanım için tüm bedeller ve vergiler de göz önünde bulundurularak 0,5445 TL olarak belirlenmiştir (EPDK, 2019).

Bulgular ve Tartışma

Dünyada ve ülkemizde son yıllarda yenilenebilir enerji uygulamaları sıklaşmış ve özellikle rüzgâr türbinleri ve fotovoltaik sistemler konusunda yüksek yatırımlar gerçekleştirilmiştir. Yatırım kararları ele alındığında ise ana belirleyici unsurun yatırımın gerçekleştirildiği bölgeye ait iklim özellikleri olduğu görülmektedir. Bu sebeple, Tablo 3'te görüleceği üzere öncelikle 2019 yılı boyunca bir dakika aralıklı ölçümlerden elde edilen ve kullanıcı tanımlı iklim veri işleyicisi modelinin dış dosyasını oluşturulan iklim veri grubu aylık ortalama değerlere dönüştürülerek verilmiştir. Tabloda 37° eğimli yüzeye düşen ışınım sütununda yer alan iki farklı değer sırasıyla tüm zamanı ve sadece güneşlenme süresinin olduğu zamanı kapsamaktadır. Tablo 3'te yer alan iklim veri değerlerini girdi olarak kabul eden ve Şekil 8a ile verilen fotovoltaik modüler sisteme (paneller ve eviriciler) ve Şekil 8b ile gösterilen küçük ölçekli türbine ait saatlik güç üretimleri Şekil 9 ile verilmiştir.

Şekil 9'da kırmızı, mavi ve pembe ile gösterilen ifadeler saatlik olarak sırasıyla fotovoltaik panellere ait üretime, eviricilere ait kayıplara ve rüzgâr türbini tarafından elde edilen üretim değerlerine karşılık gelmektedir.

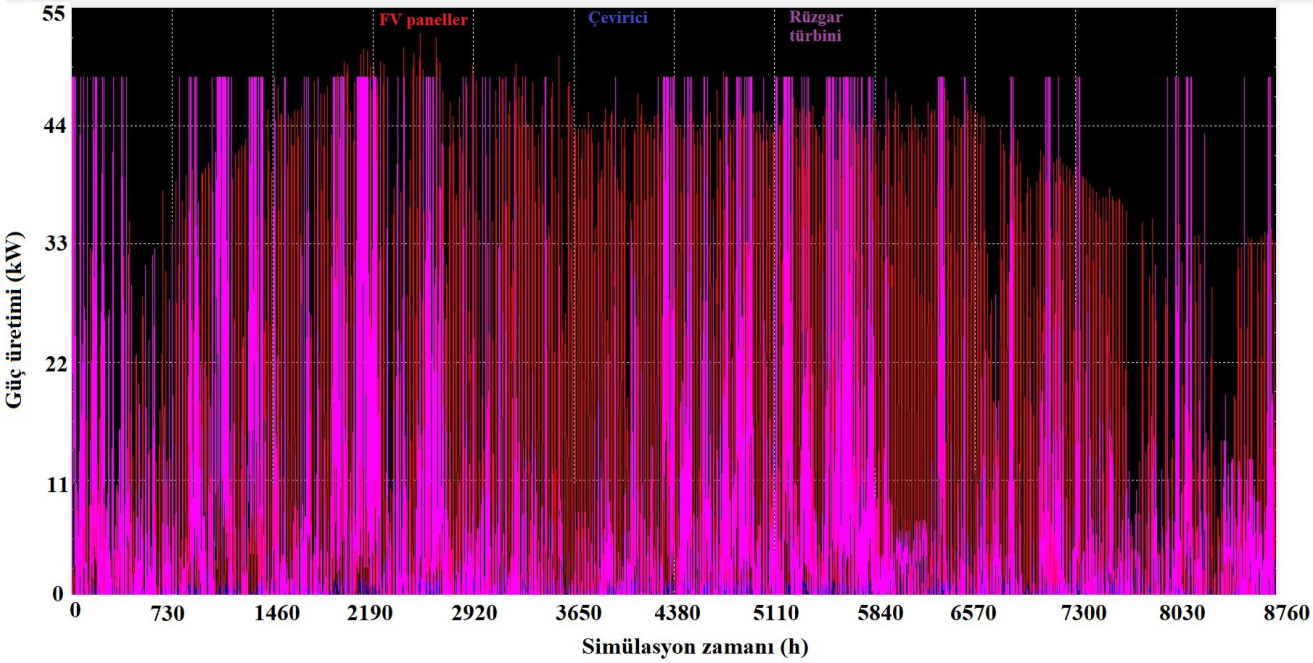
Tablo 3. İklim veri grubu

Aylar	Işınım (W/m^2)	Dış Hava Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hız (m/s)
Ocak	72,57/170,32	9,03	2,82
Şubat	185,59/394,66	10,21	3,87
Mart	256,89/491,33	13,44	3,40
Nisan	246,95/428,43	16,25	3,06
Mayıs	252,88/400,29	20,97	2,14
Haziran	294,40/441,59	26,40	2,37
Temmuz	316,74/486,88	28,40	3,41
Ağustos	319,48/535,34	29,52	4,19
Eylül	295,55/524,12	24,96	2,58
Ekim	228,59/459,64	21,17	2,18
Kasım	150,15/327,59	17,89	1,98
Aralık	96,00/224,60	11,84	2,68
Ocak-Aralık	226,31/407,07	19,17	2,90

Bu çalışma kapsamında amaç mühendislik binasında yer alan klimaların enerji ihtiyacını mümkün mertebe karşılamak olduğundan, fotovoltaik modüler sisteme ve rüzgâr türbinine ait saatlik güç üretimleri AC kısımda hesaplanmıştır. Genel olarak fotovoltaik modüler sisteme ait saatlik elektrik üretiminin benzer kapasite değerlerine sahip rüzgâr türbinine göre tüm yıl göz önünde bulundurulduğunda daha yüksek seviyelerde gerçekleştiği söylenebilir. Bu fark sadece Ocak, Şubat ve Aralık aylarında gözlemlenmemiştir. Bunun temel sebebi Tablo 3'ten görüleceği üzere ilgili aylardaki ışınım değerlerinin düşük değerlere sahip olmasıdır.

Gerek fotovoltaik modüler sistem gerekse rüzgâr türbini için saatlik güç üretimlerinin elde edilmesinin ardından her iki yenilenebilir enerji teknolojisine ait yıllık analizler gerçekleştirilmiş ve mühendislik binasında yer alan klimalara ait enerji tüketim değerleri de göz önünde bulundurularak (Özkan, 2018) Tablo 4 ile sunulan değerler elde edilmiştir. Tablo 4'ten görüleceği üzere fotovoltaik modüler sistem tüm klimalara ait yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilmekte olup, rüzgâr türbini ise %86,75 oranına karşılık gelen bir enerji üretebilmektedir.

Sadece soğutma ve ısıtma periyodu dikkate alındığında ise fotovoltaik modüler sistem klimalara ait ısıtma ihtiyacının %88,85'ine karşılık gelen bir enerji üretimi



Şekil 9. Fotovoltaik modüler sisteme ve rüzgâr türbinine ait simülasyon sonucu

gerçekleştirmiştir. Soğutma ihtiyacı için ise ışınım değerlerinde meydana gelen artışa ve klima ihtiyacında ısıtma fonksiyonuna göre azalışa bağlı olarak bir hayli yüksek oranda (%202,25) üretim elde edilmiştir. Rüzgâr türbini ise klimalara ait soğutma ihtiyacının üzerinde bir üretim gerçekleştirmiştir (%114,45), fakat ısıtma ihtiyacını %72,15 oranında karşılayabilmiştir.

Tablo 4. Yıllık enerji üretim ve tüketim değerleri (kWh).

Aylar	Enerji Üretimi		Enerji Tüketimi
	FV Sistem	Rüzgâr Türbini	Klimalar
Ocak	2.288,49	4.813,52	22.942,70 (ısıtma)
Şubat	4.861,38	7.812,57	
Mart	7.729,52	6.888,18	
Nisan	7.721,64	5.144,56	22.102,50 (soğutma)
Mayıs	8.287,42	2.194,82	
Haziran	8.993,13	3.204,61	
Temmuz	10.002,35	6.077,77	
Ağustos	9.696,94	8.674,24	
Eylül	8.184,39	2.892,52	18.984,20 (ısıtma)
Ekim	6.635,31	2.630,99	
Kasım	4.599,46	1.861,92	
Aralık	2.953,69	3.352,59	
Toplam	**81.953,72**	**55.548,29**	**64.029,40**

Yukarıda verilen tablo teknik değerlendirme sonucundaki özet bilgileri içermektedir. Buna ek olarak gerçekleştirilen ekonomik hesaplamalar sonucunda ise fotovoltaik modüler sistem ve rüzgâr türbini tarafından sağlanan yıllık kazançlar sırasıyla 44.623 TL ve 30.246 TL olarak belirlenmiştir. Ayrıca, fotovoltaik modüler sisteme ve rüzgâr türbinine ait ilk yatırım maliyetleri sırasıyla 54,4 kW ve 55 kW kapasiteye sahip sistemler için 410.176 TL ve 439.450 TL olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sonucunda basit geri ödeme süreleri ise fotovoltaik modüler sistem ve rüzgâr türbini için sırasıyla 9,19 yıl ve 14,52 yıl olarak bulunmuştur. Basit geri ödeme süresi 50 kW kapasiteli bir rüzgâr türbine için Teksas-Amerika Birleşik Devletleri iklim koşulları altında 13 yıl olarak ortaya çıkmıştır (Chang ve Starcher, 2019). Alberta-Kanada da iklim koşulları altında gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise 20 kW kapasiteli türbin için bu süre 9,53 yıl olarak hesaplanmıştır (Kabir vd, 2012). İtalya da düz arazi ve iyi rüzgâr potansiyeli koşullarında ise 38 MW kapasiteye sahip rüzgâr santrali için 13,5 yıllık bir süre ortaya çıkmıştır (Serri vd, 2018). FV sistemler için ise Avustralya da farklı tarife koşullarında gerçekleştirilen çalışmada 7,6 ile 10,75 yıl arasında değişen bir süre elde edilmiştir (Ellabban ve Alassi, 2019). Ülkemiz iklim koşulları altında şebeke bağlantılı çatı tipi fotovoltaik modüler sistemler için gerçekleştirilen güncel bir çalışmada ise güney, orta ve kuzey bölgelerinde sırasıyla 7,75–8,33 yıl, 8,59–10,85 yıl ve 11,65–14,43 yıl aralıklarında değişen geri ödeme süreleri hesaplamıştır (Duman ve Güler (2020). Bu durumda fortovoltaik modüler sistemin ekonomik açıdan daha avantajlı olduğu ve benzetim sonuçları dikkate alındığında 20 yıllık bir ömür kabulü altında yaklaşık 11 yıl boyunca yıllık 44.623 TL kazanç sağladığı söylenebilir. Bu bulgulara ek olarak enerji piyasasındaki ekonomik koşullarının (enflasyon ve faiz oranları, teşvikler, elektrik alım tarifleri, vb.) ve sistem bileşenlerinin değişimi ile zaman içinde bozulmaya uğrama durumlarının da yaşam ömrü boyunca göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Ozcan vd., 2019).

Sonuçlar

Yapılan çalışmada yaklaşık aynı kapasiteye sahip olan bir rüzgâr türbini ile fotovoltaik modüler sistemin enerji üretimi ve ekonomik karşılaştırılması yapılmıştır. Hem güneş hem de rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu İzmir'de bulunan Ege Üniversitesi kampüsündeki Makina Mühendisliği Bölümü binası çatısında kurulu ölçüm istasyonundan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, dış sıcaklık, dış bağıl nem ve güneş ışınımı değerleri dakikalık olarak alınmış ve saatlik veriye çevrilmiştir. Elde edilen verilerle seçilmiş olan rüzgâr türbini ve fotovoltaik modüler sistemin enerji üretimleri TRNSYS programı ile hesaplanmıştır. Makina Mühendisliği Bölümü binasının ısıtılması ve

soğutulmasında kullanılan klimaların enerji ihtiyacı göz önüne alınarak rüzgâr türbininin ve fotovoltaik modüler sistemin bu enerji ihtiyacının ne kadarını karşılayacağı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre rüzgâr türbini kullanılarak ısıtma sezonunda ihtiyacın %72,15'ini, soğutma sezonunda%114,45'ini, tüm yıl göz önünde bulundurulduğunda ise %86,75'ini karşılayabilecek miktarlarda elektrik üretimi gerçekleştirebilmektedir. Fotovoltaik modüler sistem ise ısıtma sezonundaki elektrik ihtiyacının %88,85'i kadar, soğutma sezonundaki elektrik ihtiyacının ise %202,25'i kadar elektrik üretimi gerçekleştirerek tüm ihtiyacı karşılayabilmektedir. Yıllık olarak fotovoltaik modüler sistem klimaların ihtiyacı olan elektriğin yaklaşık %128'i kadar elektrik üretmektedir. Yapılan ekonomik analiz sonucu fotovoltaik sistemin basit geri ödeme süresi 9,19 yıl bulunurken, rüzgâr türbini için bu süre 14,52 yıl olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre, ele alınan Ege Üniversitesi kampüsü içinde rüzgâr türbini kurulumunun hem yıllık enerji üretiminin yetersizliği hem de basit geri ödeme süresinin daha uzun oluşu nedeniyle uygun olmadığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, fotovoltaik modüler sisteminin hem yıllık enerji üretimi ile ihtiyacı tamamen karşılayabilmesi, hem de basit geri ödeme süresinin kısa oluşu nedeniyle uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada TÜBİTAK 3001 programı ile desteklenen 215M016 numaralı "Güneş Enerjisi Destekli Bir Klima Sisteminin Tasarımı, Modellenmesi, Kurulumu, Testi, Simülasyonu ve Farklı Soğutucu Akışkanlar Açısından İleri Ekserji Analizleri ile Değerlendirilmesi" başlıklı araştırma projesi kapsamında elde edilen rüzgâr hızı, dış hava sıcaklığı ve güneş ışınımı verileri kullanılmıştır. Bu kapsamda kuruma teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

Al-Ghussain, L., Ahmed, A., Haneef, F., (2018). Optimization of Hybrid PV-Wind System: Case Study Al-Tafilah Cement Factory, Jordan, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 30, 24-36.

Arslan, H., Baltaci, H., Akkoyunlu, B.O., Karanfil, S., Tayanc, M., (2020). Wind Speed Variability and Wind Power Potential over Turkey: Case Studies for Çanakkale and İstanbul, *Renewable Energy*. 145, 1020-1032.

Aslan, A., (2018). Balıkesir Rüzgâr Enerjisi Potansiyelinin Araştırılması ve Türbinlerin Ekonomik Analiz Kapsamında Karşılaştırılması, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*. 38(1), 25-41.

Baltic Energy Conservation Agency, Benchmarking of small and medium size wind turbine technologies and legal framework http://swipproject.eu/wp-content/uploads/2015/11/D1.1_2.pdf (27.08.2019)

Bilir, L., Yildirim, N., (2018). Modeling and Performance Analysis of a Hybrid System for a Residential Application, *Energy*. 163, 555-569.

Chang, B., Starcher, K., (2019). Evaluation of wind and solar energy investments in Texas, *Renewable Energy*, 132, 1348-1359.

Davis Instruments, iklim ölçüm cihazları, https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6410_SS.pdf (20.08.2019)

Deltaohm iklim ölüm cihazları (a), http://www.deltaohm.com/ver2012/index.php?main_page=product_info&cPath=1_17&products_id=93 (20.08.2019)

Deltaohm iklim ölüm cihazları (b), http://www.deltaohm.com/ver2012/index.php?main_page=product_info&cPath=1_8_22&products_id=173 (06.03.2020)

Devrim, Y., Bilir, L., (2016). Performance Investigation of a Wind Turbine-Solar Photovoltaic Panels-Fuel Cell Hybrid System Installed at İncek Region – Ankara, *Energy Conversion and Management*. 126, 759-766.

Duman, A. C., Güler, Ö., (2020). Economic analysis of grid-connected residential rooftop PV systems in Turkey. *Renewable Energy*, 148, 697-711.

Ecoenerg Renewables, EC Wind 55kW Wind Turbine, https://eco-energ.co.uk/wind/ec-wind-55kW-wind-turbine/ (15.08.2019)

Ehyaei, M.A., Ahmadi, A., Rosen, M.A., (2019). Energy, Exergy, Economic and Advanced and Extended Exergy Analyses of a Wind Turbine, *Energy Conversion and Management*. 183, 369-381.

Elimko, kayıt ve kontrol cihazları, http://www.elimko.com.tr/files/EPR110.pdf (20.08.2019)

Ellabban, O., Alassi, A., (2019). Integrated Economic Adoption Model for residential grid-connected photovoltaic systems: An Australian case study. *Energy Reports*, 5, 310-326.

EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu), Elektrik birim maliyeti, https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari (21.08.2019)

Gabra, S., Miles, J., Scott, S.A., (2019). Techno-economic Analysis of Stand-Alone Wind Micro-Grids, Compared with PV and Diesel in Africa, *Renewable Energy*. 143, 1928-1938.

Global Solar Atlas, Türkiye Güneş Işınımı Haritası https://globalsolaratlas.info/downloads/turkey (27.08.2019)

Global Wind Atlas, Türkiye Rüzgâr Enerjisi Haritası https://globalwindatlas.info/area/Turkey (27.08.2019)

Hosseinalizadeh, R., Rafiei, E.S., Alavijeh, A.S., Ghaderi, S.F., (2017). Economic Analysis of Small Wind Turbines in Residential Energy Sector in Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 20, 58-71.

Kabir, M. R., Rooke, B., Dassanayake, G. M., Fleck, B. A., (2012). Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation. *Renewable Energy*, 37(1), 133-141.

Melikoglu, M., (2016). The Role of Renewables and Nuclear Energy in Turkey's Vision 2023 Energy Targets: Economic and Technical Scrutiny, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 62, 1-12.

Ozcan, H.G, Gunerhan, G., Yildirim, N., Hepbasli, A., (2019). A comprehensive evaluation of PV electricity production methods and life cycle energy-cost assessment of a particular system, *Journal of Cleaner Production*. 238, Article:117883.

Özkan, Mustafa., (2018). Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölüm Binasının Enerji Verimliliği Profilinin Çıkarılması, *Lisans Tezi*, EÜ Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Pinheiro, E., Bandeiras, F., Gomes, M., Coelho, P., Fernandes, J., (2019). Performance Analysis of Wind Generators and PV Systems in Industrial Small-Scale Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 110, 392-401.

Serri, L., Lembo, E., Airoldi, D., Gelli, C., Beccarello, M. (2018). Wind energy plants repowering potential in Italy: technical-economic assessment. *Renewable Energy*, 115, 382-390.

Trannergy, Eevirici özellikleri, https://www.wechselrichter-reparaturen.net/pdf/trannergy/PVI1300-3000TL-EN.pdf (12.02.2020)

Sun Power, Tekli kristalin panel özellikleri, https://us.sunpower.com/sites/default/files/media-library/data-sheets/ds-e20-series-327-residential-solar-panels.pdf (20.08.2019)

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (a), https://enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes (13.08.2019)

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (b), https://enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar (13.08.2019)

TRNSYS, Zamana bağlı sistem benzetim programı, http://www.trnsys.com/ (20.08.2019)

Yildirim, N., Bilir, L., (2017). Evaluation of a Hybrid System for Nearly Zero Energy Greenhouse, *Energy Conversion and Management*. 148, 1278-1290.

Comparison of a wind turbine and photovoltaic panels: Example of Ege University – İzmir

Extended abstract

Renewable energy use in Turkey has been increased over the years and significant amount of investment has been made in solar and wind energy systems recently. The reason of this fact is that Turkey has great potential in these two renewable energy sources. Solar energy is especially abundant for the south middle of the country, while wind energy potential is high at the Aegean and Marmara regions of Turkey. In the present study, the energy production and economic comparison of a wind turbine (55 kW) and a photovoltaic panel system (54.4 kW), with approximately the same capacity, is accomplished for the Mechanical Engineering department building in Ege University campus area located in İzmir, which is at the Aegean Sea coast of Turkey. Air conditioner units are used for the heating and cooling of the Mechanical Engineering department building and it is investigated how much of electrical energy use of these air conditioner units can be covered by the considered wind turbine and the photovoltaic panel system. Wind speed, direction, outdoor temperature and solar radiation values at 37° inclination (which is the slope angle of the photovoltaic panels) are determined for one-year period using a measurement station installed at the roof of the Mechanical Engineering department building. All data are acquired each minute from the measurement station and they are converted into hourly data in order to be used in the analyses. The necessary climate, wind turbine, photovoltaic panels and converter properties are considered as inputs and the energy generation of both wind and photovoltaic panel systems are calculated using TRNSYS software with the relevant models. For the energy generation calculation of the photovoltaic panel system, user defined weather data processor is used with single photovoltaic panel model and the inverter model without battery utilization. Output components are used in DC and AC power generation plotting and data folder creation. Similarly, for the energy generation calculation of the wind turbine user defined weather data processor is used with wind energy conversion system model depending on power and wind speed characteristics. Again, output components are used for the same purpose. As a result, it is found that the photovoltaic panel system can cover all yearly electrical energy need of the air conditioners, while the wind turbine can provide only 86.75 % of the yearly need. It is calculated that the photovoltaic panel system can generate 88.85% of the need in the heating season. However, the wind turbine is found to supply only 72.15% of the need in this season. It is determined that the photovoltaic panel system can provide 202.25% of the electrical energy need in the cooling season, but the generation of the wind turbine is at a level of 114.45% of the need for the same season. The economic evaluation of both systems is made considering the simple payback time of the systems. The simple payback time of the photovoltaic panel system and the wind turbine are calculated as 9,19 years and 14,52 years, respectively. When the results are taken into consideration, it can be said that the installation of the investigated photovoltaic panel system for the Ege University Mechanical Engineering department building is preferable in terms of both energy generation and economic aspects, compared to the evaluated wind turbine.

Keywords: *Wind Turbine; Photovoltaic Panels; Renewable Energy: TRNSYS Analysis; Simple Payback Time*