

YALOVA ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YALOVA İLİ ARMUTLU İLÇESİNDE ŞEBEKE BAĞLANTILI
RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nusret KARAKUŞ
(115103009)**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Kayhan İNCE

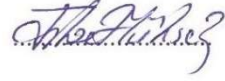
HAZİRAN 2015

YALOVA Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 115103009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Nusret KARAKUŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Yalova İli Armutlu İlçesinde Şebeke Bağlantılı Rüzgar-Hidrojen Hibrit Enerji Sisteminin Teknik ve Ekonomik Modellenmesi” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Kayhan İNCE**
Yalova Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Fikret YÜKSEL***
Yalova Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. İbrahim GÜNEŞ
İstanbul Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Kayhan İNCE
Yalova Üniversitesi



Teslim Tarihi : 29 Mayıs 2015
Savunma Tarihi : 22 Haziran 2015

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Çalışma konusunun belirlenmesi ve yönlendirmelerinden dolayı danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Kayhan İNCE'ye, yardımlarından dolayı bölüm başkanımız Prof. Dr. Fikret YÜKSEL'e, eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek olan anneme ve çalışmam boyunca manevi desteğini esirgemeyen eşime teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmada emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Haziran 2015

Nusret KARAKUŞ
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOL LİSTESİ	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Literatür Araştırması	3
2. HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ	9
2.1. Rüzgar Enerjisi	9
2.1.1. Rüzgar ölçümü	10
2.1.2. Rüzgar potansiyelinin belirlenmesi	12
2.1.3. Rüzgar türbinleri	13
2.1.4. Rüzgar gücü	14
2.1.5. Türbin gücü.....	15
2.1.6. Kapasite faktörü.....	15
2.1.7. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi	15
2.1.8. Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (REPA)	16
2.2. Hidrojen Enerjisi	18
2.2.1. Hidrojenin özellikleri.....	18
2.2.2. Hidrojen enerjisinin avantajları	18
2.2.3. Hidrojen üretim yöntemleri	19
2.2.4. Hidrojenin depolanması.....	20
2.3. Yakıt Pilleri	21
2.3.1. Yakıt pilinin çeşitleri	21

2.3.2. Yakıt pilinin avantajları ve dezavantajları	21
2.3.3. Yakıt pillerinin kullanım alanları	22
2.4. Rüzgar-Hidrojen Hibrit Enerji Sistemleri.....	22
3. ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	25
3.1. Yük Tespiti	25
3.2. Rüzgar Türbini.....	26
3.2.1. Rüzgar hızının tespiti	26
3.2.2. Kapasite faktörünün belirlenmesi	28
3.2.3. Farklı rüzgar hızları için türbinden üretilecek enerji miktarı.....	29
3.2.4. Rüzgar enerjisi maliyeti	30
3.3. Elektrolizör ve Hidrojenin Depolanması	34
3.4. Yakıt Pili.....	37
3.5. Model Programın Analizi	38
3.6. Model Programdaki Senaryoların İncelenmesi	46
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	49
KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	59
EK A	60
EK B	61
EK C	62
EK D.....	63
EK E1	64
EK E2	65
EK E3	66
EK E4	67
EK E5	68
EK F1.....	69
EK F2.....	70
EK G1	71
EK G2.....	73
EK G3	75
EK G4.....	77

EK G5.....	79
EK H.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
AYP	: Alkalin yakıt pili
AF	: Amortisman faktörü
BM_D	: Depolama birim maliyeti
BM_E	: Elektrolizör birim maliyeti
BM_{ortalama}	: Yıllık ortalama birim maliyet bedeli
BM_P	: Yakıt pili birim maliyeti
BM_{RS}	: Rüzgar santrali birim maliyeti
BM_{RS1}	: 1. Rüzgar türbini birim maliyeti
BM_{RS2}	: 2. Rüzgar türbini birim maliyeti
BM_{RS3}	: 3. Rüzgar türbini birim maliyeti
BM_{RS4}	: 4. Rüzgar türbini birim maliyeti
BM_{RS5}	: 5. Rüzgar türbini birim maliyeti
BM_{1,2,...12}	: İlgili aya ait birim maliyet bedeli
BTYİ_{toplam}	: Yıllık bir türbinin yaptığı toplam iş
BTYİ_{1,2,...12}	: İlgili ayda bir türbinin yaptığı iş
DC	: Doğru akım
DGE_{toplam}	: Yıllık toplam depolamaya gönderilen enerji
DGE_{1,2,...12}	: İlgili aya ait depolamaya gönderilen enerji
DMYP	: Doğrudan Metanol Kullanılan yakıt pili
DSE_{toplam}	: Yıllık toplam depolama sonrası enerji
DSE_{1,2,...12}	: İlgili aya ait depolama sonrası enerji
E_{H2}	: 1 kg hidrojen üretmek için gereken enerji
E_p	: Türbinin bir yılda ürettiği enerji
E_{RT}	: Rüzgar türbininden üretilen yıllık enerji miktarı
EA_{toplam}	: Yıllık toplam enerji açığı (fazlası)
EA_{1,2,...12}	: İlgili aya ait enerji açığı (fazlası)
EGE_{toplam}	: Yıllık toplam elektrolizöre gönderilen enerji

EGE_{1,2,...,12}	: İlgili aya ait elektrolizöre gönderilen enerji
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EKYP	: Erimiş karbonatlı yakıt pili
EPDK	: Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu
ESE_{toplam}	: Yıllık toplam elektrolizör sonrası enerji
ESE_{1,2,...,12}	: İlgili aya ait elektrolizör sonrası enerji
FAYP	: Fosforik asit yakıt pili
KOYP	: Katıoksit yakıt pili
LPG	: Liquified Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış petrol gazı)
M_{diğer}	: Santrale ait diğer maliyetler
M_D	: Depolama yatırım maliyeti
M_{DY}	: Depolama yıllık maliyeti
M_{D-ib}	: Depolama işletme bakım maliyeti
M_E	: Elektrolizör yatırım maliyeti
M_{EY}	: Elektrolizör yıllık maliyeti
M_{E-ib}	: Elektrolizör işletme bakım maliyeti
M_P	: Yakıt pili yatırım maliyeti
M_{PY}	: Yakıt pili yıllık maliyeti
M_{P-ib}	: Yakıt pili işletme bakım maliyeti
M_{RS}	: Rüzgar santrali toplam yatırım maliyeti
M_{RT}	: Rüzgar türbini maliyeti
M_{RT-ib}	: Rüzgar türbini yıllık işletme bakım maliyeti
M_{SY}	: Santralin yıllık toplam masrafları
MM_{toplam}	: Yıllık toplam mutlak maliyet bedeli
MM_{1,2,...,12}	: İlgili aya ait mutlak maliyet bedeli
NO_x	: Azot oksit
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü)
P_{ELEK}	: Elektrolizör gücü
PEM	: Polimer elektrolit membran
PEMYP	: Katı polimer yakıt pili
REPA	: Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası
RES	: Rüzgar enerji santrali

TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TS	: Türbin Sayısı
TYİ_{toplam}	: Yıllık türbinlerin yaptığı toplam iş
TYİ_{1,2,...12}	: İlgili ayda türbinlerin yaptığı iş
UEDAŞ	: Uludağ Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
ÜID_{H2}	: Hidrojenin üst ısıl değeri
YPGE_{toplam}	: Yıllık toplam yakıt piline gönderilen enerji
YPGE_{1,2,...12}	: İlgili aya ait yakıt piline gönderilen enerji
YPSE_{toplam}	: Yıllık toplam yakıt pili için gerekli enerji
YPSE_{1,2,...12}	: İlgili aya ait yakıt pili için gerekli enerji
Yük_{toplam}	: Yıllık toplam tüketilen enerji
Yük_{1,2,...12}	: İlgili aya ait tüketilen enerji

SEMBOL LİSTESİ

n	: Tesisin ömrü
\mathfrak{S}	: Rüzgar hızı
\mathfrak{S}_m	: Ortalama rüzgar hızı
\mathfrak{S}_d	: Kanat ucundaki çevresel hız
λ	: Kanat uç hız oranı
ρ	: Rüzgar (hava) yoğunluğu
η_{elek}	: Elektrolizör verimi
η_{depo}	: Depolama verimi
η_{yp}	: Yakıt pili verimi
A	: Rotor süpürme alanını
c	: Şekil parametresi
C_f	: Kapasite faktörü
C_p	: Güç katsayısı
i	: Kredi faiz oranı
k	: Ölçek parametresi
m	: Kütle akış oranı
N_{RT}	: Türbin nominal gücü
n	: Devir sayısı
P_n	: Türbinin nominal gücü
P_w	: Rüzgar gücü
P_m	: Türbin gücü
R	: Kanat yarıçapı
k	: Von Karman sabiti
u^*	: Rüzgar hızı yükseklik faktörü
h	: Yükseklik
z_0	: Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu
D	: Rotor çapı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Kanat uç hız oranına göre türbin çeşitleri	13
Çizelge 2.2. Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu değerleri.....	16
Çizelge 2.3. Hidrojen gazının özellikleri	18
Çizelge 3.1. Enercon türbinlerine ait veriler ve kapasite faktörleri	28
Çizelge 3.2. Farklı rüzgar hızları için Enercon E-82 türbini güç değerleri.....	30
Çizelge 3.3. Rüzgar santrali maliyet değerleri	32
Çizelge 3.4. Rüzgar santrali enerji birim maliyetleri ve yatırım geri ödeme süreleri	33
Çizelge 3.5. Türbinlere ait kapasite faktörlerinin karşılaştırılması.....	34
Çizelge 3.6. Elektrolizör-depolama verileri ve hesaplama sonuçları.....	36
Çizelge 3.7. Yakıt pili verileri ve hesaplama sonuçları	37
Çizelge 3.9. Rüzgar türbini program verileri	39
Çizelge 3.10. Elektrolizör program verileri	40
Çizelge 3.11. Hidrojen depolama program verileri.....	40
Çizelge 3.12. Yakıt pili program verileri	41
Çizelge 3.13. Enercon E-82 türbin için hesaplanan değerler	42
Çizelge 3.14. YÜK, BTYİ ve TYİ için değerler	43
Çizelge 3.15. ESE, DSE ve YPSE için değerler	44
Çizelge 3.16. MM_n , MM_{toplam} , BM_n ve $BM_{ortalama}$ için değerler.....	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Boru tipi (b) ve kafes tipi (b) ölçüm direkleri.....	10
Şekil 2.2. Kepçe (a), ultrasonik (b) ve propeller (c) anemometreler.....	11
Şekil 2.3. Rüzgar yön sensörü.....	11
Şekil 2.4. Savanious (a) ve Darreius (b) dikey eksenli rüzgar türbinleri.....	14
Şekil 2.5. 50 m. yükseklikteki ortalama yıllık rüzgar hızları dağılımı.....	17
Şekil 2.6. 50 m. yükseklikteki ortalama kapasite faktörü dağılımı.....	17
Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sistemi.....	22
Şekil 2.8. Şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen sistemi.....	23
Şekil 3.1. Armutlu ilçesi 2011 yılı aylık enerji tüketim değerleri.....	26
Şekil 3.2. Yalova ili Armutlu ilçesi aylık ortalama rüzgar hızları.....	27
Şekil 3.3. E-82 türbini için aylık ortalama rüzgar hızları.....	28
Şekil 3.4. Enercon E-82 türbin güç verileri.....	29
Şekil 3.5. Rüzgar hidrojen hibrit enerji sistemi.....	38
Şekil 3.6. Hibrit sistem veri giriş sayfası görünümü.....	41
Şekil 3.7. Sistemin aylık mutlak maliyetleri.....	46
Şekil 3.8. Sistemin aylık birim maliyetleri.....	46
Şekil 3.9. Enercon E-82 türbin modeli için yıllık enerji akış diyagramı.....	47
Şekil 4.1. Yük profili ve türbinlerin üreteceği enerji miktarları.....	51
Şekil 4.2. Faiz oranlarına göre enerji birim maliyet değerleri.....	51
Şekil A.1. Armutlu ilçesi 2011 yılı enerji tüketim miktarları.....	60
Şekil B.1. Armutlu İlçesi Rüzgar Hız Dağılımı - 50 m.....	61
Şekil B.2. Armutlu İlçesi Kapasite Faktörü Dağılımı - 50 m.....	61
Şekil C.1. Bereket Enerji ölçüm sonuçları (60 m.).....	62
Şekil D.1. Türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızları.....	63
Şekil E.1. Enercon E-33 Türbin Bilgileri.....	64
Şekil E.2. Enercon E-53 Türbin Bilgileri.....	65
Şekil E.3. Enercon E-82 Türbin Bilgileri.....	66
Şekil E.4. Enercon E-101 Türbin Bilgileri.....	67
Şekil E.5. Enercon E-126 Türbin Bilgileri.....	68
Şekil F.1. Enercon türbinlerine ait parametreler ve hesaplanan güç değerleri.....	69
Şekil F.2. Rüzgar hızlarına göre türbinlerin üreteceği güç miktarları.....	70
Şekil G1.1. Türbin-1 (E-33) için program görüntüsü-1.....	71
Şekil G1.2. Türbin-1 (E-33) için program görüntüsü-2.....	72
Şekil G2.1. Türbin-2 (E-53) için program görüntüsü-1.....	73
Şekil G2.2. Türbin-2 (E-53) için program görüntüsü-2.....	74
Şekil G3.1. Türbin-3 (E-82) için program görüntüsü-1.....	75

Şekil G3.2. Türbin-3 (E-82) için program görüntüsü-2	76
Şekil G4.1. Türbin-4 (E-101) için program görüntüsü-1	77
Şekil G4.2. Türbin-4 (E-101) için program görüntüsü-2	78
Şekil G5.1. Türbin-5 (E-126) için program görüntüsü-1	79
Şekil G5.2. Türbin-5 (E-126) için program görüntüsü-2	80
Şekil H.1. Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası kurları	81

YALOVA İLİ ARMUTLU İLÇESİNDE ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR- HİDROJEN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN TEKNİK VE EKONOMİK MODELLENMESİ

ÖZET

Dünyada giderek artan enerji talebi ve fosil enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması, insanlığı temiz enerjiler üzerinde araştırmalar yapmaya zorlamaktadır. Enerji problemine çözüm olarak; yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş, rüzgar, hidrojen, yakıt pili, jeotermal v.b. üzerine çalışmalar yoğunlaşarak devam etmektedir. Hidrojen enerjisi de depolanabilirliği ve çeşitli kullanım alanları ile son yıllarda gelecek vadeden bir enerji taşıyıcısı olarak alternatif enerji kaynakları arasında yer almış durumdadır.

Bu tez çalışması kapsamında elektrik enerjisinin, doğaya olumsuz etkileri olan klasik üretim yöntemlerinin dışında yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve hidrojen enerjisi ile üretilmesinin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır. Yalova ili Armutlu ilçesinde rüzgar santrali kurulum çalışmaları devam eden firmadan 2011 yılına ait rüzgar hızları ve ilgili enerji dağıtım şirketinden elektrik enerjisi tüketim değerleri referans alınarak ilçenin enerji ihtiyacının rüzgar ve hidrojen enerjisi ile karşılanabilmesi amacıyla şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen hibrit sistemi modellenmiştir.

İlçenin ihtiyacı enerjinin karşılanabilmesi için beş farklı rüzgar türbininden biri seçilerek bir rüzgar santrali kurulması düşünülmüş ve santralden üretilen enerjinin ilçenin enerji ihtiyacından fazla olduğu durumlarda fazla olan enerjiden elektrolizör vasıtasıyla hidrojen üretimi yapılarak üretilen hidrojenin tanklarda depolanması planlanmıştır. Daha sonra santralden üretilen enerjinin ilçenin enerji ihtiyacını karşılamadığı durumlarda depolanan hidrojen yakıt piline gönderilerek enerji üretimi sağlanmış ve ilçenin enerji ihtiyacı karşılanmıştır. Rüzgar ve yakıt pilinden elde edilen enerjinin ihtiyaç için yetersiz olması durumunda şebekeden enerji alınması ve

sistemden üretilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda şebekeye enerji verilmesi planlanmıştır.

Ayrıca MS Excel programı kullanılarak yapılan modellemede; sistemin bileşenlerinden rüzgar türbini, elektrolizör, hidrojen tankı, yakıt pili maliyetleri ve yatırımın kredi kullanılarak yapılması durumunda farklı faiz oranları programa girilerek farklı durumlar için maliyet analizi yapılmış ve enerji birim maliyetleri incelenmiştir. Örneğin; 2000 kW gücünde Enercon E-82 türbini, 500 kW gücünde elektrolizör, 1240 kg depolama kapasitesine sahip 4 adet hidrojen tankı, 175 kW gücünde PEM yakıt pili ve kredi faiz oranı %5 seçilerek yapılan modellemede enerji birim maliyeti 0,056 €/kWh olarak hesaplanmıştır.

Anahtar sözcükler: Rüzgar enerjisi, hidrojen enerjisi, enerji ekonomisi, rüzgar-hidrojen hibrit sistem, akıllı şebeke.

**TECHNICAL AND ECONOMIC MODELLING OF GRID-CONNECTED
WIND–HYDROGEN HYBRID POWER SYSTEMS OF
YALOVA ARMUTLU DISTRICT**

SUMMARY

Increasing of energy demand and beginning of consuming of fossil based energy sources forces mankind's hand research on clean energy. Studying on renewable energy resources like sun, wind, hydrogen, fuel cell, geothermal etc. is going on for solving energy problem. By its storable characteristic and areas of usage, hydrogen energy, is promising energy carrier, took part in on renewable energy resources.

In this thesis, apart from classical methods which affect nature negatively, economical and technical analysis of generating of electricity from wind and hydrogen energy is investigated. Grid-connected wind-hydrogen hybrid system is modelled in order to supply energy requirement of a country by logging of wind velocity datas of year 2011 by a company that still continues to install wind energy parks in district Armutlu.

By choosing one of five different types of wing turbines, where energy which is produced from power plant is more than energy requirement of the country, storage of hydrogen in tank is planned which is produced by electrolyser from residual energy. In cases of produced energy from power plant is less than energy requirement of country, energy generating is achieved by using of stored hydrogen in the fuel cell.

In MS Excel programme modeling; costs of ingredient of system as wind turbine, electrolyser, hydrogen tank, fuel cell and in case where investment is done by using bank credit, by taking different bank credit rate into account, cost analysis is done and energy unit costs are analyzed. For example; energy unit costs are calculated as 0,056 €/kWh by choosing 2000 kW Enercon E-82 wind turbine, 500 kW electrolyser, 1240 kg 4 number hydrogen tank, 175 kW PEM fuel cell and %5 bank credit rate.

Keywords: *wind energy, hydrogen energy, energy economy, wind-hydrogen hybrid system, smart grid.*

1. GİRİŞ

En temel tanımıyla enerji, iş yapabilme yeteneği olarak adlandırılmaktadır. Enerjinin, ses, ışık, kimyasal, nükleer, elektrik, ışık, biyoenerji gibi birçok çeşidi vardır ve enerji, bu biçimler arasında dönüşüm yapabilir.

Enerji kaynakları esas olarak yenilenebilir ve yenilenemez (fosil) enerji kaynakları olarak iki gruba ayrılır. Fosil enerji kaynakları; kömür, petrol, doğalgaz gibi bugüne kadar enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan kaynaklar olup dünya üzerinde yaşamış organizmaların belirli basınç ve sıcaklıklarda yer altında binlerce yıl sonunda oluşturduğu yakıtlardır. Fosil enerji kaynakları günlük hayatta motorin, benzin, LPG, plastik gibi kullanım alanlarına sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise güneş, rüzgar, dalga, biyokütle, jeotermal, hidrolik ve hidrojenidir [1].

Giderek artan enerji ihtiyacına ilave olarak fosil enerji kaynaklarının hem sınırlı oluşu hem de bunların belirli coğrafik alanlarda toplanmış olması, enerji kaynaklarına sahip ülkelerin bunları stratejik politika aracı olarak kullanmalarına sebep olmaktadır. Aynı zamanda geleneksel enerji kaynaklarının olumsuz çevresel etkileri, ülkeleri alternatif enerji kaynakları aramaya itmiş ve bu arayışlar son yıllarda meyvelerini vermeye başlamıştır. Özellikle rüzgar enerjisi, dalga enerjisi, güneş enerjisi, hidrojen enerjisi, jeotermal enerji ve biyolojik malzemelerden elde edilen biyokütle gibi alanlarda önemli ilerlemeler elde edilmiş; elde edilen teknolojiler de birçok alanda fiili kullanıma girmiştir [2].

Gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi ülkemizin de nüfusu ve sanayisi gelişerek büyümektedir. Bunun sonucu olarak enerji ihtiyacı günden güne artmaktadır. Türkiye’de elektrik üretimi 2014 yılı sonu itibariyle 250,4 Milyar kWh olup bu ihtiyacın %48,1’i doğalgazdan, %29,2’si kömürden, %16,2’si hidroelektrikten, %3,3’ü rüzgardan, %2,3’ü termikten ve %0,9’u ise jeotermalden karşılanmaktadır [4]. Bu değerlerden görüleceği gibi Türkiye enerji ihtiyacının çok büyük bir kısmını fosil kaynaklı yakıtlardan karşılamaktadır.

Türkiye, REPA verilerine göre verimli bir enerji potansiyeline sahiptir ve bu potansiyelin tamamı kullanıldığında yıllık enerji üretiminin yarısına yakın kısmı rüzgar enerjisinden karşılanabilir. Ülkemizin, fosil enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması durumunda enerji problemleri ile karşılaşmaması için yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi konusundaki çalışmaları hızlandırması gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının faydalarının yanında kullanıldığı sistemlerin kesintili enerji üretimleri, arz-talep arasında dengesizliğe sebep olmaktadır. Bu nedenle bu kaynaklardan elde edilen enerjinin uygun yöntemlerle depolanması ve depolanan enerjinin, talebin fazla olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilmesi gerekmektedir. Günümüzde depolama teknikleri arasında değerlendirilen fazla enerjiden hidrojen üretilmesi ve bu üretilen hidrojenin yenilenebilir kaynağın yetersiz olduğu zamanlarda yeniden kullanılabilir şekilde saklanması yöntemi kullanılmaya başlanmıştır.

Ayrıca yenilenebilir enerji sistemleriyle özellikle rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleriyle temiz ve çevreye zarar vermeden üretilen hidrojen, gerek alevli yanma özelliği nedeniyle içten yanmalı motorlarda gerekse yakıt hücrelerinde direkt yakıt olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir [3].

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, elektrik enerjisinin doğaya olumsuz etkileri olan klasik üretim yöntemlerinin dışında yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve hidrojen enerjisi ile üretilmesini teknik ve ekonomik açıdan incelemektir. Yalova ili Armutlu ilçesinde rüzgar santrali bulunan firmadan rüzgar hızları ve ilgili enerji dağıtım şirketinden elektrik enerjisi tüketim değerleri alınarak ilçenin enerji ihtiyacının rüzgar ve hidrojen enerjisi ile karşılanabilmesi amacıyla şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen hibrit sistemi modellenmiştir. MS Excel ile hazırlanan programda, sistemin bileşenlerinden rüzgar türbini, elektrolizör, hidrojen tankı, yakıt pili maliyetleri ve farklı kredi faiz oranları programa girilerek farklı durumlar için maliyet analizi yapılmış ve enerji birim maliyetleri değerlendirilmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

Günümüzde rüzgar enerjisinden, hidrojen eldesi ve hidrojenden elektrik üretimi için yakıt pilinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bununla birlikte sözkonusu sistemlerin daha verimli ve etkin kullanımı için araştırma çalışmaları devam etmektedir.

Erdođdu [5], Türkiye'nin coğrafi konumunun rüzgar potansiyeli bakımından önemini belirterek rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin avantajlarından bahsetmiştir. Ayrıca yasal düzenlemeler neticesinde bakanlıklar ile EPDK arasındaki koordinasyonun sağlanmasından ve gerekli fonlara sahip özel sektörün motivasyonu ile yatırımların artacağından bahsetmiştir.

İlkılıç ve Türkbay [6], Türkiye'nin rüzgar potansiyelini 7 farklı coğrafi bölgemiz için değerlendirerek yıllık ortalama rüzgar hızının 2,58 m/s ve yıllık rüzgar yoğunluğunun 25,82 W/m olduğunu hesaplamışlar, Türkiye'deki rüzgar enerjisi gelişimlerinden ve projelerinden bahsederek 2010 yılının sonuna kadar Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu gücünün 1.503,35 MW'a ulaşacağını belirtmişler ancak bu rakam 1329,15 MW olarak gerçekleşmiştir.

Eskin ve diğ. [7], Gökçeada bölgesinde bulunan Uđurlu, Çınaraltı, Aydıncık ve ulusal havacılık istasyonu olmak üzere 4 farklı bölge için rüzgar potansiyelini değerlendirmişler ve Gökçeada'nın rüzgar enerji sistemi kurulması için yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Akdağ ve Dinler [8], Weibull dağılımını elde etmek için güç yoğunluğu metodunu geliştirmişler ve bu metodun doğruluğunu göstermek için yaygın olarak kullanılan maksimum olasılık, moment ve grafik metotları ile bir karşılaştırma yaparak Maden, Gökçeada, Çanakkale ve Bozcaada bölgeleri için bu yeni metodun daha uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Güler [9], rüzgar enerjisinin Türkiye'deki ve dünyadaki yerinden bahsederek Türkiye'nin Avrupa ülkeleri içerisinde 83.000 MW'lık teknik potansiyeli ile lider konumda bulunduğu fakat %0,22'lik en düşük rüzgar enerjisi kullanım oranına sahip olduğunu belirtmiştir.

Özerdem ve Türkeli [10], Avrupa Rüzgar Atlası'na göre Ege Denizi ve kıyılarında yüksek bir rüzgar enerji potansiyeli olduğu belirtilerek İzmir Teknoloji Enstitüsü kampüsünde rüzgar potansiyelini belirlemek için rüzgar karakteristiklerini incelemişler ve 30 m. yükseklik için ortalama rüzgar hızını 8,35 m/s olarak belirlemişlerdir.

Özerdem ve diğ. [11], İzmir'deki bir rüzgar çiftliği için beş farklı türbin kullanarak hem teknik hem de ekonomik bir çalışma yapmışlar ve kWh başına enerji birim maliyetini dolar cent olarak 4,80 ile 5,71 aralığında hesaplamışlardır.

Özgener [12], Celal Bayar Üniversitesi Muradiye kampüsü için 2006 yılı kasım ve 2007 yılı aralık ayı arasındaki rüzgar verilerini toplayarak bir rüzgar potansiyeli değerlendirme çalışması yapmış ve elde edilen verilere göre 30 m.'deki rüzgar hızının 3,21 m/s ve Enercon E-48 türbin için kapasite faktörünün % 14,1 olması nedeniyle bu bölgeye bir rüzgar türbini kurulumunun ekonomik olmayacağını belirtmiştir.

Mutlu ve diğ. [13], Alaçatı bölgesinde 600 kW'lık 12 adet rüzgar türbini bulunan bir rüzgar çiftliği için güç kalite analizi yapmışlardır. Bu çiftliğin küçük bir modelini laboratuvar ortamında hazırlayarak rüzgar çiftliğinin güç kalitesini incelemişlerdir.

Önat ve Ersöz [14], Türkiye'de yasal düzenlemeler neticesinde rüzgar enerji yatırımlarının arttığını bahsederek Samandağ, Amasra ve Güney olmak üzere 3 farklı bölge için rüzgar potansiyelini incelemişler ve bu bölgelerde rüzgar özelliklerini belirlemek amacıyla, MATLAB-Simulink yazılımı altında kurulan beş katmanlı Sugeno tipi ANFIS modeli kullanmışlardır. Bu analize göre seçilen bu bölgelerin rüzgar enerjisi açısından çok uygun bölgeler olduğu görülmüştür.

Gökçek ve diğ. [15], Marmara bölgesinde bulunan Kırklareli ili için bir rüzgar enerji potansiyel değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışmalarında yıllık Weibull fonksiyonuna dayalı güç yoğunluğunun ortalama $138,85 \text{ W/m}^2$ olduğu hesaplanarak Kırklareli'nin yeterli rüzgar potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir.

Uçar ve Balo [16], Türkiye'nin kıyı bölgelerindeki bazı yerler için rüzgar gücü potansiyelini hesaplamışlar ve her bölge için ortalama rüzgar hızı ve yoğunluğunu bularak 600 kW, 1500 kW, 2000 kW, 2500 kW güçlerindeki dört farklı rüzgar türbini için kapasite faktörlerini hesaplamışlardır.

Fyrippis ve diğ.[17], Yunanistan'ın Naxos adası Kronos köyü için bir rüzgar enerji potansiyeli değerlendirmesi yapmışlar ve bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızını 7,4 m/s ve ortalama güç yoğunluğunu ise 420 W/m² olarak hesaplamışlardır.

Jowder [18], Bahreyn için 2003 ve 2005 yılları arasında 10 m. yükseklikte ölçülmüş saatlik rüzgar hızı değerlerini kullanarak bir rüzgar analizi yapmış ve 30 m - 60 m yükseklikler için rüzgar hızlarını belirleyerek farklı rüzgar türbinleri için kapasite faktörlerini değerlendirmiştir.

Ohunakin ve diğ. [19], Nijerya'da bazı bölgeler için 300 kW ve 1000 kW iki ticari rüzgar türbini verilerini kullanarak elektrik enerjisi üretimini teknik olarak değerlendirmişler ve şimdiki değer metodunu kullanarak maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri bölgeler için kapasite faktörleri % 4,6 ile % 43 arasında değişmiş, ortalama enerji birim maliyetini ise en düşük 0,0222 \$/kWh, en yüksek ise 0,2074 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Lu ve diğ. [20], Hong Kong adalarında rüzgar enerjisi potansiyelini araştırmışlar, rüzgar hızı verileri ile olasılık dağılım fonksiyonları elde etmişlerdir. 10 kW'lık bir rüzgar türbininin simülasyonunu gerçekleştirerek farklı kule yükseklikleri için kapasite faktörü ve elektrik enerjisi üretimi hesapları yapmışlardır.

Keyhani ve diğ. [21], İran-Tahran'da rüzgar enerjisi potansiyelini belirlemek için bir çalışma yaparak Weibull dağılımı vasıtasıyla rüzgar hız dağılımı karakteristiğini belirlemişlerdir. 1995-2005 yılları arasındaki verileri kapsayan analizde Weibull şekil parametresi-k 1,91 ile 2,26 arasında, Weibull ölçek parametresi-c 4,38 ile 5,1 m/s arasında değişmektedir. Mevsimsel değerlendirmede ise en düşük rüzgar potansiyelinin Ağustos, en yüksek potansiyelin ise Nisan ayında olduğunu belirlemişlerdir.

Gökçek [22], çalışmasında kule yüksekliği 12 m. olan 6 kW gücünde bir rüzgar türbini ile 2 kW gücünde PEM elektrolizörden oluşan bir sistem için elektrik enerjisi ve hidrojen üretim maliyetlerini hesaplamıştır. Üretilen hidrojenin maliyetinin 0,3485 ile 4,4849 US\$/kg arasında değiştiğini gözlemlemiştir.

Greiner ve diğ. [23], bir Norveç adasında yakıt hücresi tahrikli feribotta kullanılmak üzere hidrojen üretmek için rüzgar-hidrojen enerji sisteminin değerlendirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, rüzgar türbini, elektrolizör, kompresör,

depolama tankı ve eviriciden oluşan bir sistem tasarlanarak şebekeye bağlı sistem ve izole edilmiş sistem olmak üzere iki farklı durumu incelemişlerdir.

Shakya ve diğ. [24], Avustralya-Cooma adasında hidrojen depolamayı içeren şebekeden bağımsız rüzgar-güneş hibrit enerji sisteminin analizini yapmışlardır. Sistemdeki fazla enerji kullanılarak elektroliz ünitesinde hidrojen üretilmiş ve maliyet analizi yapılmıştır.

Khan ve Iqbal [25], şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen hibrit sistemin modellenmesini ve simülasyonunu gerçekleştirerek sistemdeki alt sistemlerin dinamik modellerini oluşturmuşlardır. Çalışmada rüzgar hızına bağlı olarak sistemdeki ani yük değişimleri incelenmiş, MATLAB-Simulink kullanılarak dinamik sistem modellenmesi yapılmıştır.

Hamane ve diğ. [26], Cezayir-Ghardaia'da rüzgar enerjisinden hidrojen üretiminin fizibilite çalışmasını yapmışlar, 10 kW gücünde bir rüzgar türbini ve 5 kW gücünde bir elektrolizör ünitesi kullanarak hidrojen üretimini gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar türbini kule yüksekliği ve rüzgar hızı değişimine bağlı olarak aylık ve yıllık hidrojen üretim miktarını incelemişlerdir.

Korpas ve Greiner [27], zayıf şebekelerde rüzgar enerjisi kullanarak hidrojen üretim olanaklarını araştırmışlardır. Hem izole hem de şebekeye bağlı sistemlerde hidrojen üretimi için farklı hidrojen depolama uygulamalarının fayda ve kısıtlamalarını inceleyerek, rüzgar-hidrojen üretim sisteminin performansını değerlendirmişlerdir.

Aguado ve diğ. [28], rüzgar-hidrojen enerjisi depolama ve dönüştürme sisteminin ekonomik analizini yapmışlardır. Enerji taşıyıcısı olarak hidrojeni seçerek depolama kapasitesinin düzenlenmesi, depolama ekipman maliyeti ve dönüşüm sistemlerindeki kayıplardan bahsetmişler ve mevcut rüzgar çiftlikleri ile karşılaştırılmalar yapmışlardır.

Bernal-Agustin ve Dufo-Lo'pez [29], rüzgar-hidrojen enerji sisteminde üretilen enerjinin tekno-ekonomik analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında enerji talebinin az olduğu durumlarda fazla enerjiden hidrojen üretimi yapılarak tanklarda depolanmış, talebin fazla olduğu durumlarda da depodaki hidrojen kullanılarak yakıt pilinden elektrik enerjisi üretimi yapılarak üretim eğrisi ve talep eğrisini ayarlayan bir metot geliştirmişlerdir.

Ulleberg ve diğ. [30], Norveç'in Utsira adasında bulunan 600 kW gücünde rüzgar türbini, 55 kW gücünde elektrolizör ve 10 kW gücünde yakıt hücresinden oluşan rüzgar-hidrojen enerji sisteminin çalışmasını modelleme araçları kullanarak incelemişlerdir.

Lee ve diğ. [31], ömür boyu değerlendirme ve ömür boyu maliyet yöntemlerini kullanarak bir rüzgar enerjisi-hidrojen üretim sisteminin ekonomik ve çevresel değerlendirmesini yapmışlardır.

Garcia ve Weisser [32], hidrojen depolamalı rüzgar türbini-dizel sistemini boyutlandırmış iki farklı model kullanarak karşılaştırmalar yapmışlardır.

Shapiro ve diğ. [33], PEM yakıt hücresi, elektroliz, yüksek basınçlı hidrojen tankı ve PV panelden oluşan prototip bir güç sistemi kurmuşlardır. Çalışmalarında güç sisteminin performansını, hidrojen elde edilebilme imkanlarını ve bir güneş paneli ile kombine edildiğinde deneysel olarak elektrolizin performansını araştırmışlardır.

Samaniego ve diğ. [34], rüzgar-hidrojen enerji sistemini TRNSYS 15 yazılımı ile modellemişler. Sabit güçte ve değişen güçte iki farklı elektrolizör kullanarak sistemin performansını incelemişlerdir. Yatırım geri ödeme sürelerinin 24 ve 30 yıl olması nedeniyle yatırımın ekonomik olmadığına karar vermişlerdir.

Nelson ve diğ. [35], rüzgar-güneş-hidrojen hibrit enerji sisteminin ekonomik analizini yapmak için MATLAB yazılımını kullanarak bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Hidrojen üretim yöntemleri ile pil depolama yöntemlerini karşılaştırarak elektroliz ile hidrojen üretimi ve yakıt pili kullanımının düşük verimliliğe sahip olduğunu ancak yakın zamanda yakıt pili ve elektroliz teknolojilerindeki gelişmelerle rekabet edebilir bir seviyeye geleceğini belirtmişlerdir.

Bu araştırmalara dayanarak bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üretimine örnek olması açısından, rüzgar-hidrojen hibrit enerji sisteminin teknik ve ekonomik modellemesi yapılmıştır.

2. HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN BİLEŞENLERİ

Rüzgar enerjisi sürekli bir enerji kaynağı olmayıp, aynı rüzgar türbininde değişken rüzgar hızları için farklı enerji miktarları üretilmektedir. Rüzgardan elde edilen enerjinin direkt olarak nihai tüketiciye gönderilmesi durumunda, rüzgarın olmadığı zamanlarda üretilen enerji olmayacağı için tüketicinin enerji ihtiyacı karşılanamayacaktır. Bu nedenle sisteme bir elektrolizör ünitesi dahil edilerek rüzgardan elde edilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda elektrolizör yardımıyla hidrojen üretimi yapıp, uygun ortamlarda depolanarak rüzgarın olmadığı zamanlarda hidrojenin yakıt pillerine gönderilmesi ile ihtiyaç duyulan enerji sağlanabilir.

Rüzgar ve hidrojen sistemleri genel olarak, rüzgar türbini, elektrolizör, hidrojen ve oksijen depolama tankları, yakıt hücresi, AC ve DC yükler, güç şartlandırma elemanları ve çeşitli sensörlerden oluşur.

Sistem, rüzgar türbininden elde edilen enerji doğrultucu gibi elemanlarla dönüştürülüp elektrolizör ünitesine gönderilerek suyun elektroliz edilip hidrojen ve oksijene ayrıştırılması ve elde edilen hidrojenin, hidrojen kompresörleri yardımıyla tank içerisinde depolanması ve daha sonra bu depolanan hidrojenin yakıt hücresinde kullanılması ile elektrik elde edilmesi şeklinde çalışır [1].

2.1. Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi çevrime uğramış güneş enerjisi olarak açıklanabilir. Rüzgar, güneşten gelen enerjinin karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş biçimde ısıtamamasından ve buna bağlı oluşan basınç farklarından meydana gelen hava akımlarıdır. Dünyanın bütün yüzeyi güneş ısısına eşit tepki göstermez. Denizler yüksek ısı depolama yeteneğiyle karadan daha yavaş ısınır ve daha yavaş soğur. Bu farklı ısınma ve soğuma hızları kara parçalarının nem ve sıcaklıklarıyla beslenmiş büyük hava kütleleri oluşturur. Gündüzleri kara üzerindeki sıcak hava yükselir ve yerini deniz üzerindeki soğuk hava alır. Böylece gündüzleri denizden karaya doğru deniz meltemleri adı verilen rüzgarlar, geceleri ise karadan denize doğru kara

meltemleri adı verilen rüzgarlar oluşur. Deniz meltemleri 3-8 m/s arası hızla eserken kara meltemleri 2-4 m/s arası hızla eserler. Rüzgarın tesirinde; rüzgarın hızı, yönü ve frekansı etkilidir. Yeryüzünün yüzey yapısına ve düzgün olmayan ısınmasına bağlı olarak bu özellikler zamansal farklılıklar gösterirler [36].

2.1.1. Rüzgar ölçümü

Rüzgâr elektrik santralının projelendirilmesi, santral sahasından üretililecek enerji miktarına göre yapılır. Santral sahasından üretililecek enerji miktarı da proje sahasından alınan rüzgâr ölçümlerine göre belirlenebilmektedir. Bu nedenle Rüzgâr Enerji Santrallerinin (RES) kurulmasının ilk aşaması rüzgâr ölçümüdür. Şekil 2.1'de rüzgar ölçüm direkleri gösterilmektedir. Rüzgâr ölçümleri, projenin veri değerlendirmesi, enerji üretiminin belirlenmesi, türbin seçiminin yapılması gibi projenin ileri aşamalarında en önemli unsurdur. Bu nedenle kaliteli ölçüm yapılmasına özen gösterilmeli ve en az 1 yıl süreyle rüzgâr değerleri kaydedilmelidir.

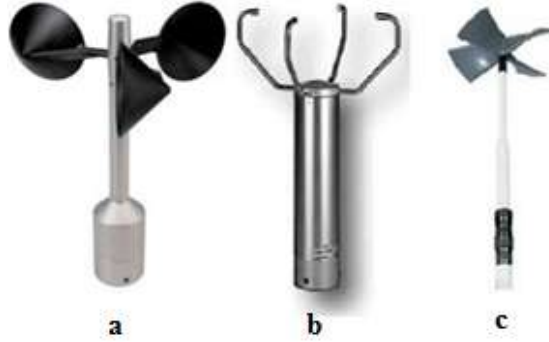
Santral sahasının karmaşıklığına göre santral sahasını en iyi temsil edecek 1 ya da daha fazla ölçüm noktası belirlenir ve direkler bu noktalara kurulur. Ölçüm direkleri santral sahasındaki hâkim rüzgar yönüne dik olacak şekilde yerleştirilir. Ölçüm direğinin yüksekliği en az rüzgar türbininin kule yüksekliğinin 2/3 katı kadar yapılır. Ölçüm direklerinin boru ve kafes tipleri vardır.



(a) (b)
Şekil 2.1. Boru tipi (a) ve kafes tipi (b) ölçüm direkleri.

Rüzgâr ölçüm sistemlerinde rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık, nem ve basınç değişkenlerinin de ölçülmesi gerekmektedir. Bu değişkenleri ölçmek için ölçüm direğine gerekli sensörler monte edilir [37].

Anemometreler rüzgar hızını elektriksel sinyale dönüştüren sensörlerdir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi kepçe, ultrasonik ve propeller tipi olmak üzere üç tip anemometre vardır.



Şekil 2.2. Kepçe (a), ultrasonik (b) ve propeller (c) anemometreler [38].

Kepçe anemometreler kepçe rotorunun bir dönüşü için geçen süreye göre rüzgar hızını belirler. Ultrasonik anemometreler her bir uçtan yayılan ses dalgasının diğer kol tarafından alınması sırasında geçen sürenin ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu anemometreler yeterince hassas olmamakla birlikte kalibre edilmeleri zordur ve çok güç harcamaktadırlar. Propeller anemometrenin çalışma prensibi de kepçe anemometrelerle aynıdır. Bu tip anemometreler rüzgâr yönüne paralel monte edildiğinde yatay rüzgâr hızını, dik monte edildiğinde de dikey rüzgâr hızını ölçerler. Rüzgâr hızı ölçümlerinde en yaygın olarak kullanılan anemometreler kepçe anemometrelerdir.

Ölçüm yapılan bölgedeki rüzgâr, belirli bir hâkim yönden esebileceği gibi, farklı yönlerden de esebilir. Rüzgâr yönlerinin değişen frekanslarını ve rüzgâr hızlarının dağılımını göstermek için yönün de ölçülmesi gerekmektedir. Rüzgar yön sensörü rüzgâr yön bilgisini elektriksel sinyale çeviren sensördür ve Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Rüzgar yön sensörü [38].

Sensörlerin, birbirlerinin ölçümlerini etkilememesi için iki sensörün en üst noktaları arasındaki mesafe en az 1,5 metre olacak şekilde ayarlanır. Rüzgâr ölçüm sistemlerinde termometre, nem ölçer ve basınç ölçer de bulunmaktadır.

Rüzgâr ölçüm sistemlerinde bütün ölçüm değerlerini kaydeden kayıt cihazı bulunmaktadır. Cihazlar 10 dakikalık aralıklarla verileri kaydeder. En az 6 aylık veriyi saklayabilmektedir [37].

2.1.2. Rüzgar potansiyelinin belirlenmesi

Bir bölgeye rüzgar enerji sistemi kurulmadan önce o bölgenin rüzgar dağılımı hakkında bilgi sahibi olunması gerekir. Bölgenin ortalama rüzgar değerleri, hangi hız, hangi yön ve hangi sıklıkta olacağı gibi bilgiler elde edildikten sonra bölgenin rüzgar potansiyelinin rüzgar enerjisi sistemi kurulmasına uygun olup olmayacağı hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bir bölgenin rüzgar potansiyelini belirlemek amacıyla genellikle iki farklı istatistiki hesaplama yapılmaktadır. Bunlar;

- Weibull Dağılımı
- Rayleigh Dağılımıdır.

Weibull dağılım fonksiyonu; ölçek parametresi (k), şekil parametresi (c) ve rüzgar hızı (ϑ) olmak üzere

$$f(\vartheta) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{\vartheta}{c}\right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{\vartheta}{c}\right)^k \right] \quad (2.1)$$

bağıntısıyla tanımlanır.

Rayleigh dağılımı ise Weibull dağılım fonksiyonunun daha basitleştirilmiş hali gibi düşünülebilir. Rayleigh dağılım fonksiyonu Weibull dağılım fonksiyonundaki şekil parametresinin 2 olarak alınması ile elde edilir ve en önemli özelliği sadece rüzgar hızının bilinmesi ile rüzgar dağılımının elde edilebilmesidir [39]. Rayleigh dağılım fonksiyonu, ϑ rüzgar hızı ve ϑ_m ortalama rüzgar hızı olmak üzere

$$f_R(\vartheta) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_m}\right)^2 \right] \quad (2.2)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

2.1.3. Rüzgar türbinleri

Rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini, elektrik enerjisine çevirmek için kullanılan aygıtlardır. Kanatlar, dişli kutusu, jeneratör, kule gibi ana elemanlardan oluşur ve dönme eksenlerine göre yatay eksenli, dikey eksenli ve eğik eksenli rüzgar türbinleri olmak üzere üçe ayrılır [1].

Yatay eksenli rüzgar türbinleri farklı sayıda kanatlara sahip olabilirler ve kanat sayısının azalmasıyla rotorun dönme hızı artar. Rotor devir sayısının, rüzgar hızına bölünmesi ile elde edilen orana, kanat uç hız oranı (λ) denir. Bu bulunan " λ " değeri türbin seçiminin önemli kriterini oluşturmaktadır. Bu seçim için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$\lambda = \frac{v_d}{v} = \frac{R \frac{2\pi n}{60}}{v} \quad (2.3)$$

λ uç hız oranı (Devirlilik sayısı), v_d kanat ucundaki çevresel hızı, v rüzgar hızını, n devir sayısını ve R yarıçapı ifade etmektedir. Uç hız oranlarına göre kullanılması gereken türbin çeşitleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

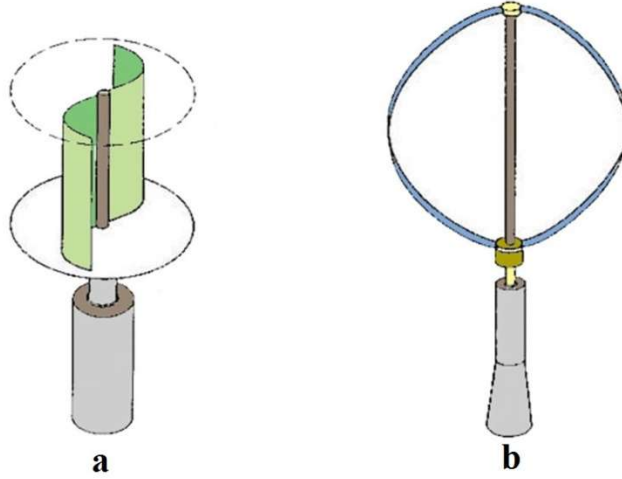
Çizelge 2.1. Kanat uç hız oranına göre türbin çeşitleri [40].

Kanat Uç Hız Oranı (λ)	Kullanılacak Türbin
0-2	Savonius rotoru
0,5-5	Çok kanatlı rotor
2-7	Darrieus rotor
2-8	Üç kanatlı rotor
5-10	İki kanatlı rotor
8-14	Tek kanatlı rotor

Günümüzde en yaygın kullanılan rüzgar türbinleri üç kanatlı türbinlerdir. Bu türbinlerin kanat uç hız oranları tek ve iki kanatlı türbinlere göre daha az olduğu için daha az gürültü oluşturmaktadırlar ve dengeli bir kanat yapısına sahip oldukları için atalet momentlerinden oluşan titreşimlerin etkisi daha azdır. Çok kanatlı rüzgar türbinleri rüzgar türbinlerinin ilk örnekleri olup kanat uç hız oranlarının düşük olması ve düşük hızlarda çalışmalarından dolayı tercih edilmemektedir.

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan dikey eksenli rüzgar türbinleri Şekil 2.4'te gösterildiği gibi düşey olarak yerleştirilmiş kanatlara sahiptir. Rüzgarı

her yönden alarak enerji üretebilirler, bu nedenle rüzgara karşı konumlanmak amacıyla yönlendirme mekanizmalarına gerek duymazlar. Fakat bu türbinler düşük rüzgar hızlarında çalışmaktadırlar. Kanatlarının büyüklüğü nedeniyle kule yüksekliğinin artırılmasıyla hem ağırlık hem de maliyet artmaktadır. Ağırlığın artmasıyla yüksek rüzgar hızlarında verimsiz çalışmaktadırlar. Savanious ve Darreius rüzgar türbinleri olarak iki tip dikey eksenli türbin vardır [41].



Şekil 2.4. Savanious (a) ve Darreius (b) dikey eksenli rüzgar türbinleri [42]

Eğik eksenli rüzgar türbinleri, dönme eksenleri düşeyle rüzgar yönünde belirli bir açı yapan rüzgar türbinleridir. Yaygın olarak kullanılmamaktadır [41].

2.1.4. Rüzgar gücü

Rüzgardan elde edilebilecek güç, rüzgarın kinetik enerjisinin bir fonksiyonudur ve m kütle akış oranı (kg/s), v rüzgar hızı (m/s) olmak üzere şu şekilde ifade edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (2.4)$$

Buradaki m, kütle akış oranı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$m = \rho \times A \times v \quad (2.5)$$

ρ (kg/m³) rüzgar (hava) yoğunluğunu ve A (m²) rotor süpürme alanını ifade eder. Bu değer, denklem 2.4'de yerine yazılırsa, rüzgardan elde edilen kinetik güç,

$$P_w = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (2.6)$$

şeklinde bulunur [1].

2.1.5. Türbin gücü

Rüzgarın kinetik enerjisinden elde edilen gücün tamamı mekanik güce dönüştürülemez. Betz teoremine göre rüzgarın kinetik gücünün maksimum %59,26'sı mekanik enerjiye dönüştürülebilir. Türbinin gücü (P_m), rüzgarın kinetik gücü (P_w) ile güç katsayısının (C_p) çarpımı şeklinde,

$$P_m = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (2.7)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Güç katsayısının alacağı maksimum değer 0,5926'dır. Pratikte ise bu değer daha düşük olmakla beraber Ek F'deki beş adet Enercon türbinlerine ait verilerden de görüleceği gibi 0,5'in altında kalmaktadır [43].

2.1.6. Kapasite faktörü

Kapasite faktörü (C_f), bir türbinin ne kadar verimli kullanıldığını gösteren bir parametredir. Üretilen enerji miktarının, santralin tam kapasitede çalışması ile üreteceği enerji miktarına oranıdır.

$$C_f = E_p / (P_n \times 8760) \quad (2.8)$$

E_p türbinin bir yılda ürettiği enerjiyi (kWh/y), P_n türbinin nominal gücünü (kW) ve 8760 türbinin bir yıl boyunca (365 gün x 24 saat) çalışma saatini ifade etmektedir [44].

Kapasite faktörü ikinci bir yöntem olarak; ortalama rüzgar hızı, türbin nominal gücü ve rotor çapı değerlerinin bilinmesiyle ortalama hızın 4-10 m/s olması durumunda,

$$C_f = (0,087 \times v) - \frac{P_n}{D^2} \quad (2.9)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Denklem 2.9'un kapasite faktörünün 0,2 ile 0,5 arasında olduğu değerler için kullanılması daha uygundur [44].

2.1.7. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi

Rüzgardan elde edilecek güç denklem 2.6'da belirtildiği üzere rüzgar hızının küpüyle orantılıdır. Yer yüzeyinden yukarı doğru yükseklik arttıkça yeryüzünden kaynaklanan sürtünme kuvvetleri azaldığından rüzgar hızı artmaktadır.

Belirli bir yükseklikteki rüzgar hızının bulunması için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$v(h) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (2.10)$$

Burada $g(h)$ belirli bir yükseklikteki rüzgar hızı, u^* rüzgar hızı yükseklik faktörü, k Von Karman sabiti ($k=0,4$), h rüzgar hızının bulunması istenilen yükseklik ve z_0 ise yeryüzündeki engellerden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü uzunluğudur [45]. Çizelge 2.2’de yüzey pürüzlülüğü uzunluğu değerleri gösterilmektedir [42].

Çizelge 2.2. Yüzey pürüzlülüğü uzunluğu değerleri

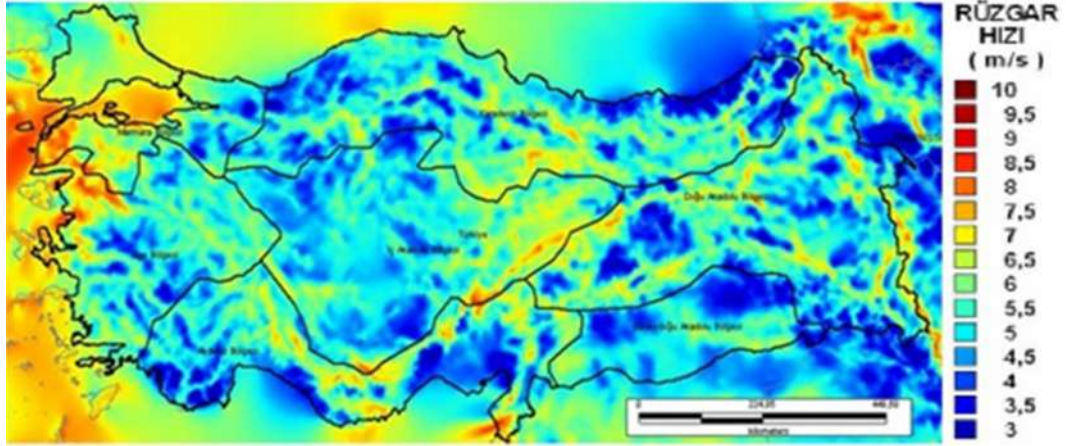
Pürüzlülük Sınıfı	Pürüzlülük Uzunluğu (m)	Enerji Göstergesi (%)	Yüzey şekli
0	0,0002	100	Su yüzeyleri
0,5	0,0024	73	Açık araziler (Beton, uçaklar için iniş alanı, otopan, biçilmiş çim vb.)
1	0,03	52	Uzak aralıklı yapılara sahip çitsiz ve engelsiz açık tarımsal araziler. (Çok hafif engebeli)
1,5	0,055	45	Birkaç binalı ve 1250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler.
2	0,1	39	Birkaç binalı ve 500 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler.
2,5	0,2	31	Pek çok bina, çalı ve bitkiye sahip, yada 250 m mesafeli 8 m yüksekliğinde çitlere sahip tarımsal araziler.
3	0,4	24	Köyler, küçük şehirler, çok yada yüksek çitli tarımsal araziler, ormanlar, çok yoğun ve pürüzlü bölgeler.
3,5	0,8	18	Yüksek yapılara sahip büyük şehirler
4	1,6	13	Yüksek binalara ve gökdelenlere sahip büyük şehirler

Örneğin; elimizde 10 m. yükseklikteki rüzgar hızı verileri mevcut ise denklem 2.10’da bu hız değeri yerine konularak rüzgar hızı yükseklik faktörü (u^*) bulunur. Daha sonra bu u^* değeri kullanılarak aynı denklem yardımıyla 60 m. yükseklikteki rüzgar hızı değeri bulunur.

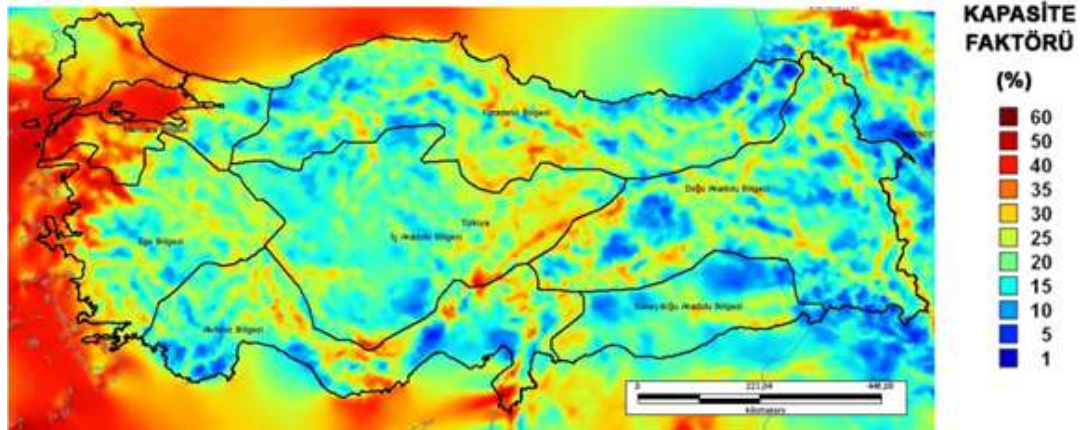
2.1.8. Rüzgar enerjisi potansiyeli atlası (REPA)

REPA, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği rüzgar enerjisi potansiyeli atlasıdır. Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde 200 m x 200 m çözünürlüğünde; 30,

50, 70 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik, aylık ve günlük rüzgar hız ortalamaları, 50 ve 100 m yüksekliklerdeki yıllık, mevsimlik ve aylık rüzgar güç yoğunlukları, referans bir rüzgar türbini için 50 m yükseklikteki yıllık kapasite faktörü, 50 m yükseklikteki yıllık rüzgar sınıfları, 2 ve 50 m yüksekliklerdeki aylık sıcaklık değerleri, deniz seviyesinde ve 50 m yüksekliklerdeki aylık basınç değerleri öğrenilebilmektedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da Türkiye geneli 50 m. yükseklikteki ortalama yıllık rüzgar hızları ve kapasite faktörü dağılımları gösterilmektedir [46].



Şekil 2.5. 50 m. yükseklikteki ortalama yıllık rüzgar hızları dağılımı



Şekil 2.6. 50 m. yükseklikteki ortalama kapasite faktörü dağılımı

REPA verilerine göre ekonomik RES yatırımları için yıllık ortalama rüzgar hızının 7 m/s veya üzerinde, kapasite faktörünün ise %35 veya üzerinde olması gerekmektedir.

2.2. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp; doğalgaz, kömür ve su gibi birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak üretilen sentetik bir yakıttır [47].

Birincil enerji kaynaklarının, fiziksel durum değişimi içeren biçimde dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, "enerji taşıyıcısı" denir. Son tüketiciye enerjinin "yakıt" ve/veya "elektrik" biçiminde sunulduğu göz önüne alındığında ikincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına karşın, teknoloji yalnızca elektriğe bağlı olarak değil, yakıtı da gerektiren biçimde gelişmiştir. Bunun nedeni, genel enerji tüketiminin yaklaşık % 60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesidir [48].

2.2.1. Hidrojenin özellikleri

Normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksiz olan hidrojen çok hafif bir gaz olup, yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır. Hidrojen gazının bazı özellikleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. Atmosfer basıncında -253°C'ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadardır. Sıvı haline dönüştürüldüğünde gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ünü kaplar. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim ağırlık başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir. Saf oksijenle yandığında sadece su ve ısı açığa çıkarken, hava ile yandığında ise azot oksitler açığa çıkmakta ve bu nedenle diğer yakıtlara göre kirliliği daha az olmaktadır. Bu nedenlerle hidrojen, geleceğin en önemli ikincil enerji kaynağı alternatiflerinden biri olarak görülmektedir [48].

Çizelge 2.3. Hidrojen gazının özellikleri [49].

ÖZELLİKLER	HİDROJEN
Formül	H ₂
Mol ağırlığı, (g/molg)	2,02
Sıvı Özgül kütle:(kg/litre)	0,07
Gaz Özgül kütle: (kg/litre)	0,84.10 ⁴
Kaynama Noktası (°C)	-252,35
Donma Noktası (°C)	-259

2.2.2. Hidrojen enerjisinin avantajları

Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere farklı enerji kaynakları kullanılarak üretilen bir enerji taşıyıcısıdır. Elektrik kullanılarak üretilir ve

nispeten yüksek verimle de elektriğe çevrilebilir. Hidrojenin güneş enerjisi ile doğrudan üretim süreçleri de geliştirilmiştir.

Hidrojen gaz şeklinde (büyük ölçekli depolamada), sıvı şeklinde (hava ve uzay ulaşımında) veya metal hidrit şeklinde (araçlar ve diğer küçük ölçekli depolamada) depolanabilir. Boru hatları veya tankerler ile büyük mesafelere taşınabilir.

Hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilirken, taşınırken, depolanırken ve son kullanımda herhangi bir kirletici üretmediği için çevreye zararlı etkisi daha azdır. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NOx oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir.

Ayrıca hidrojen enerjisinden yararlanılırken uygulamada birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Örneğin enerjinin üretildiği yakıt hücreleri ve hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır. Hidrojen petrole göre 4 kat fazla hacim kapladığından kapladığı hacmi küçültmek için sıvı halde depolanabilir ancak bunun içinde yüksek basınç ve soğutma işlemine gerek vardır [48].

2.2.3. Hidrojen üretim yöntemleri

Bugün dünya hidrojen üretiminin % 48'i doğal gazdan (% 90'dan fazlası metan), % 30'u rafineri ürünlerinden, % 18'i kömürden ve kalan % 4'ü de suyun elektroliziyle elde edilmektedir. Bunların dışında geliştirilmiş ve geliştirilmekte olan yeni hidrojen üretim prosesleri vardır.

Hidrojen üretim metotları; hammaddeye, elde edilmek istenen hidrojen miktarına ve üretilen hidrojenin saflık derecesine göre değişir. Yeni geliştirilmekte olan yöntemler de dikkate alındığında hidrojen üretim teknolojileri; kömürün gazlaştırılması, buhar reformingi, ototermal reforming, termal disosiyasyon ile fosil hammaddelerden, suyun elektrolizi, fotoelektroliz, suyun termal parçalanması, biyokütle gazlaşması ile yenilenebilir enerji kaynaklarından, rafineriler (buhar veya metanol reforming fabrikaları proses gazı gibi) ve kimyasal madde fabrikaları (amonyak veya metanol sentezi gibi) gibi işletmelerde hidrojen zengin atık gazlardaki hidrojeni kazanma olmak üzere üç grup altında toplanabilir [50].

2.2.3.1. Elektroliz yoluyla hidrojen üretimi

Suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrılması işlemine elektroliz denilmektedir. Elektroliz büyük ölçekli hidrojen üretiminde kullanılan önemli teknolojilerden biridir. Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde % 90 verim elde edilmiştir. Hidrojen üretimi için en basit yöntemdir. Bir elektroliz hücresi içinde, düzlem şeklinde iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvıdan oluşmaktadır. Doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektrota doğru akar. Bunun sonucunda hidrojen ve oksijen atomlarının bağlarının kopması sağlanır. Oluşan yüklü parçacıklardan hidrojen iyonu pozitif elektrik yüküne sahiptir ve negatif elektrotta toplanır, oksijen ise negatif yüke sahip olduğundan pozitif elektrotta toplanır.

Elektrolizörler genel olarak alkali ve PEM-tabanlı olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Alkali elektrolizörlerde potasyum hidroksit çözeltisi elektrolit olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda alkali elektrolizörlere kıyasla daha kompakt, yüksek verim, bakım maliyetlerinin azlığı ve uzun ömürlü olması nedeniyle katı polimer membranlar daha fazla tercih edilmektedir. PEM-tabanlı elektrolizörde sistem sadece protonların geçmesine izin veren polimer membran, suyun elektrokimyasal reaksiyon ile parçalandığı ve oksijenin olduğu anot katalizör tabakası, hidrojenin olduğu katot katalizör tabakası ve elektriğin uygulandığı aynı zamanda sıvının ve gazların katalizör yüzeylerine iletilmesi ve uzaklaştırılması görevini üstlenen elektrot tabakalarından oluşmaktadır. Anot ve katot katalizörlerinin zehirlenmesinin önüne geçmek için PEM elektrolizörlerde deiyonize su kullanımı zorunludur [3].

2.2.4. Hidrojenin depolanması

Gerek sabit gerekse taşınabilir uygulamalar için hidrojenin etkin ve güvenilir olarak depolanabilmesi gereklidir. Taşınabilir uygulamalarda ilave olarak depolamada hafiflik önem kazanmaktadır.

Hidrojen gaz veya sıvı olarak saf halde tanklarda depolanabileceği gibi, fiziksel olarak nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrür şeklinde depolanabilmektedir. Hidrür şeklinde depolama; katı halde metallerde olabileceği gibi, sodyum bor bileşiğinde olduğu gibi sıvı halde de olabilmektedir.

Depolanabilirliği, hidrojenin belki de en önemli özelliğidir. Günümüzde büyük miktarlarda enerji depolamak için hala uygun bir yöntem bulunamamış olması, hidrojenin depolanması ile ilgili çalışmaların önemini daha da arttırmaktadır [48].

2.3. Yakıt Pilleri

Yakıt pilleri, yanma olmaksızın kullanılan yakıtın sahip olduğu kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir düzenektir. Yüksek verimlilik ile bütün standartların belirttiği emisyonların çok altında çalışmaktadırlar. Çalışmaları pil gibidir, fakat sürekli bir yakıtla beslenmeye ihtiyaçları vardır. Genellikle bu yakıt hidrojendir [51].

2.3.1. Yakıt pilinin çeşitleri

Yakıt pilleri; elektrolit sistemlerine göre,

- Alkalın yakıt pili (AYP)
- Katı polimer yakıt pili (PEMYP)
- Doğrudan metanol kullanılan yakıt pili (DMYP)
- Erimiş karbonatlı yakıt pilleri (EKYP)
- Fosforik asit yakıt pilleri (FAYP)
- Katıoksit yakıt pilleri (KOYP)

olmak üzere altı sınıfa ayrılır. Aynı yakıt pilleri, çalışma sıcaklıklarına göre düşük ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri olarak ikiye ayrılır. Bunlardan ilk üç tanesi düşük sıcaklık, diğerleri ise yüksek sıcaklık yakıt pilleridir [51].

2.3.2. Yakıt pilinin avantajları ve dezavantajları

Çevre dostu olması, hareketli parça olmaması, sessiz ve yüksek verimle çalışması, boyutlarının küçük ve modüler olması, yakıt olarak saf hidrojenin yanı sıra doğalgaz, metanol veya kömür gazları kullanılabilmesi, minimum seviyede kükürt oksit ve azot oksit emisyonları bulunması, katı atık probleminin olmaması ve atık ısılarının kullanılabilir olması gibi avantajlara sahiptir.

Yakıt pili kullanımının avantajlarının yanında; üretiminin pahalı olması, çok yeni bir teknoloji olduğu için Türkiye'de kullanımının yaygın olmaması, sıvı hidrojenin

depolanma probleminin olması, gelişimleri için yüksek teknolojiye ihtiyaç duyulması ve seri üretimlerinin henüz gerçekleştirilememesi gibi dezavantajları vardır [51,52].

2.3.3. Yakıt pillerinin kullanım alanları

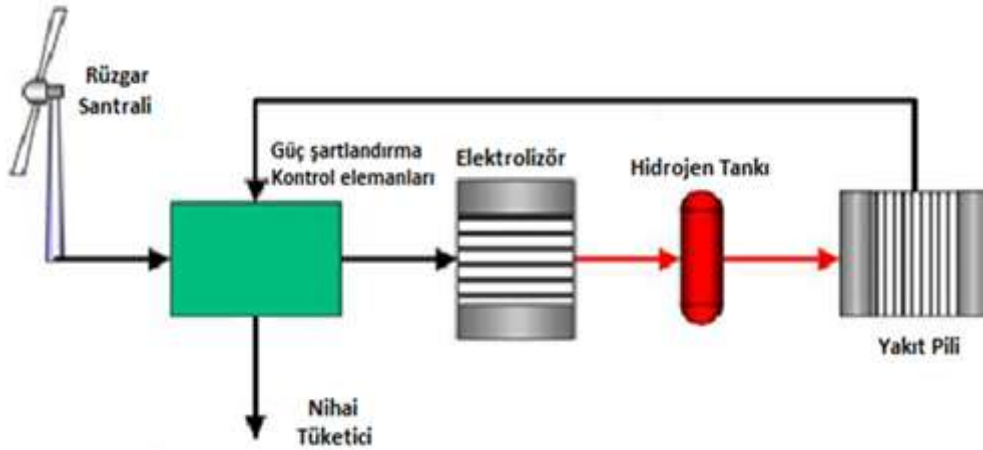
Küçük ev aletlerinden, elektrik santrallerine kadar kullanım alanları oluşmuştur. Yakıt pili uygulamaları sabit (konut tipi yakıt hücreleri ve santralleri) ve taşınabilir (ulaşım araçlarında kullanılan) sistemler olarak iki grupta toplanır.

Yakıt pillerinin kullanıldığı alanlar yerüstü uygulamaları (elektrik santrallerinde, konutlarda, ulaşım araçlarında, günlük yardımcı aletlerde, atık alanlarında, su arıtma tesislerinde), deniz uygulamaları (gemiler, feribotlarda, denizaltılarda) ve uzay ve gökyüzü uygulamaları (uçaklarda, uzay araçları ve uzay projelerinde) olarak tanımlanmaktadır [52].

2.4. Rüzgar-Hidrojen Hibrit Enerji Sistemleri

Rüzgar- hidrojen enerji sistemleri şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı sistemler olmak üzere ikiye ayrılır [53].

Şekil 2.7'de gösterilen şebekeden bağımsız bir rüzgar-hidrojen enerji sisteminde rüzgar türbini, güç şartlandırma elemanı, elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt pili elemanları bulunmaktadır.

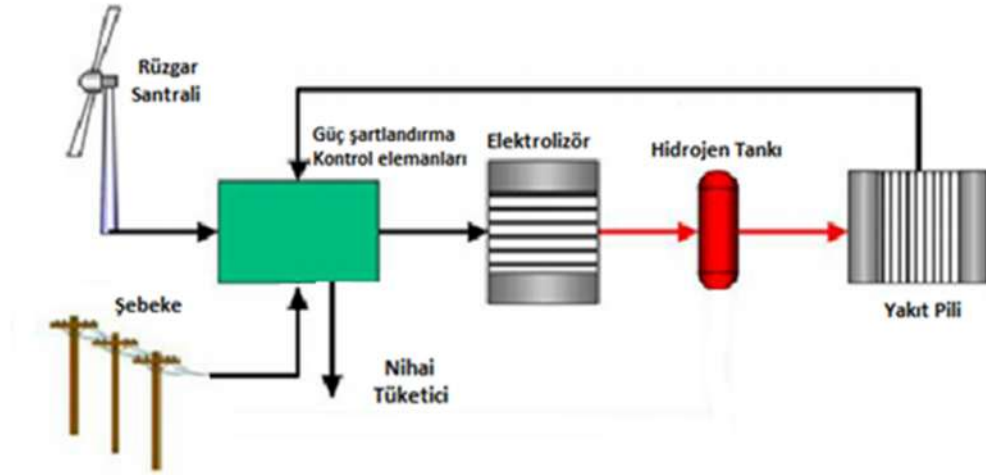


Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sistemi

Şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sisteminde enerji yönetimi şu şekilde gerçekleştirilir.

- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin ihtiyaç duyulan enerjiden büyük olması durumunda fazla enerji elektrolizöre gönderilir.
- Elektrolizörden elde edilen hidrojen, hidrojen depolama tankına gönderilerek depolanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin ihtiyaç duyulan enerjiden az olması durumunda yakıt pili vasıtasıyla depolanmış hidrojen kullanılarak enerji üretilir ve tüketicinin enerji ihtiyacı karşılanır.

Şekil 2.8'de gösterilen şebeke bağlantılı bir rüzgar-hidrojen enerji sisteminde ise şebekeden bağımsız rüzgar-hidrojen sisteminin elemanlarına ilave sisteme bir şebeke bağlantısı yapılmıştır ve sistem şebekeden enerji alış-verişinde bulunmaktadır.



Şekil 2.8. Şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen sistemi

Şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen sisteminde enerji yönetimi şu şekilde gerçekleştirilir.

- Rüzgar türbininden enerji elde edilmeyorsa ve depolama tankında hidrojen bulunmuyorsa gereken enerji şebekeden karşılanır.
- Rüzgar türbininden elde edilen enerjinin çok az ve depolama tankında yeterli hidrojen olmayışından dolayı yakıt pilinden elde edilen enerjinin de çok az olması durumunda gereken enerji şebekeden karşılanır.
- Sistemden üretilen enerji, ihtiyaç fazlası olması durumunda şebekeye verilebilir.

Bu tez çalışmasında güç elektroniği devre elemanları, transformatörler, AC-DC, DC-DC, DC-AC dönüştürücüler modellemeye dahil edilmemiş ve excel programı içinde değerlendirilmemiştir.

3. ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR-HİDROJEN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

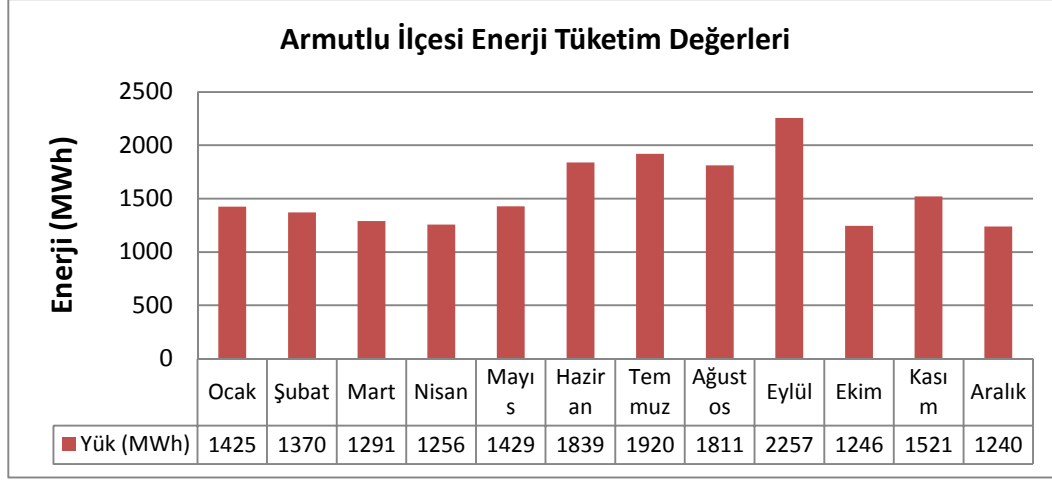
Modelleme, Armutlu ilçesinin enerji ihtiyacını karşılayabilmek için farklı türbin tipleri, elektrolizör ve hidrojeni bir enerji taşıyıcı olarak yakıt pilinde kullanan şebeke bağlantılı rüzgar-hidrojen hibrit enerji sistemi için yapılmıştır. Bu amaçla; önce bölgenin yük profili oluşturularak rüzgar türbini tipi seçilmiş ve sırasıyla sistemde bulunan bileşenlerden elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt pilinin seçimleri yapılmıştır.

Sonra sistemin bir diyagramı oluşturularak maliyet hesaplarının yapılabilmesi için MS Excel ile bir program hazırlanmış ve programa girilmesi gereken parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler programa girildiğinde sistemdeki tüm bileşenlerin maliyet hesapları yapılarak sistemin toplam maliyet değeri, birim enerji maliyet değeri hesaplanmış ve oluşturulan grafikler vasıtasıyla görsel olarak incelemeler yapılmıştır.

Ayrıca yapılan excel programı genel kullanım amaçlı tasarlanmış olup aylık ortalama rüzgar hızları ve yük profili bilinen farklı bir bölgenin verileri girildiği takdirde o bölge içinde maliyet analizi yapılabilmektedir.

3.1. Yük Tespiti

Armutlu ilçesinin yük tespiti için Ek A'daki ilgili elektrik dağıtım şirketinden alınan 2011 yılına ait aylık enerji tüketim verileri kullanılarak yük profili oluşturulmuştur. İlçenin yıllık toplam enerji tüketimi 18.605 MWh olup aylık tüketim değerleri Şekil 3.1'de grafik olarak gösterilmiştir. Armutlu ilçesinde son yıllarda yapılan kaplıca ve termal tesisler ile yaz aylarındaki nüfus artmaktadır. Bu nedenle haziran-eylül aylarında kullanılan enerji miktarı daha fazladır.



Şekil 3.1. Armutlu ilçesi 2011 yılı aylık enerji tüketim değerleri

Aylık ortalama 1550 MWh tüketime sahip ilçenin maksimum yük tüketimi Eylül ayında, minimum yük tüketimi ise Aralık ayında gerçekleşmiştir.

3.2. Rüzgar Türbini

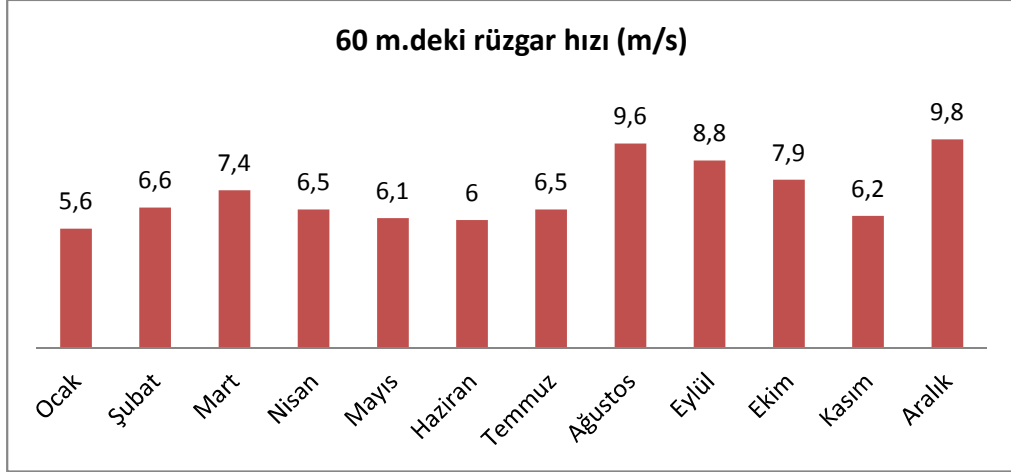
3.2.1. Rüzgar hızının tespiti

Bir bölgede rüzgar santrali kurulmadan önce Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından santral kurulacak bölgede rüzgar ölçüm sistemlerinin kurularak bir yıl süre ile rüzgar ölçümlerinin yapılması istenmektedir. Ölçme aletleri kullanılarak rüzgar hızı, rüzgar yönü, hava sıcaklığı, basınç ve nem gibi ölçümler 10’ar dakika aralıklarla Datalogger programı yardımı ile kaydedilerek bir yılın sonunda incelenir ve bölgenin rüzgar potansiyeli belirlenir.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından 2006 yılında yaptırılan Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) [54] verilerine göre santral kurulacak bir bölgede ekonomik bir RES yatırımının olabilmesi için bölgenin ortalama rüzgar hızının asgari 7 m/s, kapasite faktörünün ise %35 ve üzerinde olması gerekmektedir. Daha düşük ortalama rüzgar hızına sahip yerlerde yatırım, geri ödeme süresinin uzun olması sebebi ile ekonomik görülmemektedir. REPA verilerine göre “Armutlu İlçesi Rüzgar Hız Dağılımı” ve “Armutlu İlçesi Kapasite Faktörü Dağılımı” grafikleri Ek B’de verilmiştir. Bu verilere göre Armutlu ilçesi, rüzgar hızının 7 m/s ve kapasite faktörünün %35 civarında olması nedeniyle ekonomik bir RES yatırımı için uygun bir konumdadır.

Bu çalışmada rüzgar hızı tespiti ayrıca yapılmadığından Armutlu ilçesinde faaliyet

gösteren rüzgar santrali için firmanın kurulum öncesi yaptırdığı aylık ortalama rüzgar ölçüm sonuçlarından faydalanılmıştır. Ek C’de verilen ilgili firmanın 2011 yılı verilerine göre 60 metredeki rüzgar hızı ölçümleri için hazırlanan grafik Şekil 3.2’de verilmiştir.

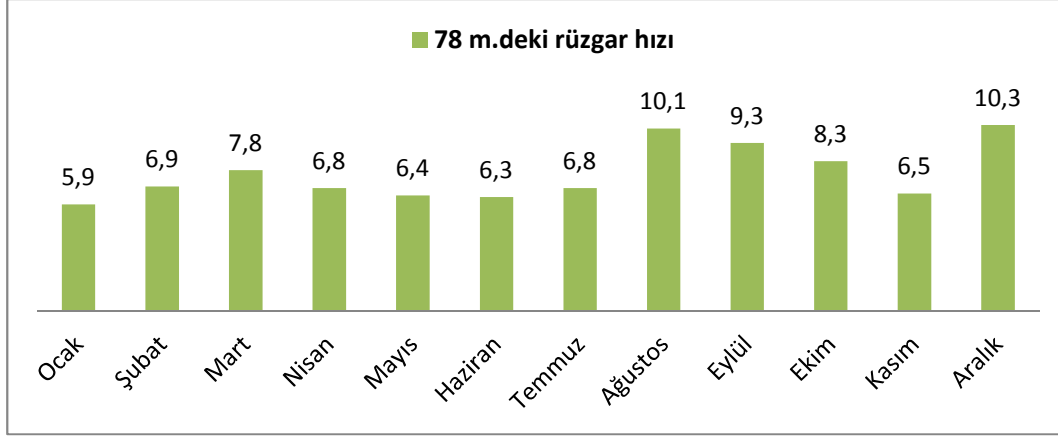


Şekil 3.2. Yalova ili Armutlu ilçesi aylık ortalama rüzgar hızları

REPA, üç farklı nümerik hava analiz modelinin ardışık çalıştırılması sonucu üretilmiş bir atlasır. REPA model sonuçları ile elde edilen rüzgar kaynak bilgileri, gerçek ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve hata payı ortalama %7 olarak bulunmuştur [55].

Şekil 3.2’deki verilere göre ilçenin yıllık ortalama hızı 7,3 m/s olarak hesaplanmıştır. REPA verilerine göre ilçenin yıllık ortalama rüzgar hızı 50 m. için 6,5-7 m/s civarındadır. Bu verilerle, ölçüm sonuçları kıyaslandığında sonuçların %7’lik hata payı aralığında kaldığı görülmektedir.

Enercon E-82 türbini için firma kataloğunda farklı kule yükseklikleri mevcut olup bu çalışmada 78 m. kule yüksekliğine sahip türbin seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 3.2’de verilen aylık ortalama rüzgar hızları Denklem 2.10 yardımıyla 78 m.’ye yükseltilerek türbin kule yüksekliğindeki aylık ortalama rüzgar hızları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 3.3’de verilmiştir. Diğer türbinlere ait rüzgar hızları benzer şekilde hesaplanmış ve sonuçlar Ek D’de verilmiştir.



Şekil 3.3. E-82 türbini için aylık ortalama rüzgar hızları

Ortalama rüzgar hızının maksimum olduğu ayın aralık ayı, minimum olduğu ayın ise ocak ayı olduğu görülmektedir.

3.2.2. Kapasite faktörünün belirlenmesi

Bir rüzgar enerjisi sisteminde kurulacak rüzgar türbinlerinin, bölgenin rüzgar potansiyeline göre hangi rüzgar hızında ne kadar enerji üretebileceği ve bu bölge için kapasite faktörlerinin ne olacağı en önemli parametrelerdir. Model programda kullanılan Enercon firmasına ait E-33, E-53, E-82, E-101, E-126 model numaralı beş farklı güçteki rüzgar türbini için kapasite faktörü, firmanın kataloglarından alınan rotor çapı, süpürme alanı, türbin kule yüksekliği bilgilerine ve Ek D’de verilen yıllık ortalama rüzgar hızlarına göre hesaplanmıştır [56]. Türbin modelleri üzerinde yer alan 33, 53, 82, 101 ve 126 rakamları kanat çapını ifade etmektedir. Çizelge 3.1’deki veriler Denklem 2.9’da yerine konularak türbinlere ait kapasite faktörleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Enercon türbinlerine ait veriler ve kapasite faktörleri

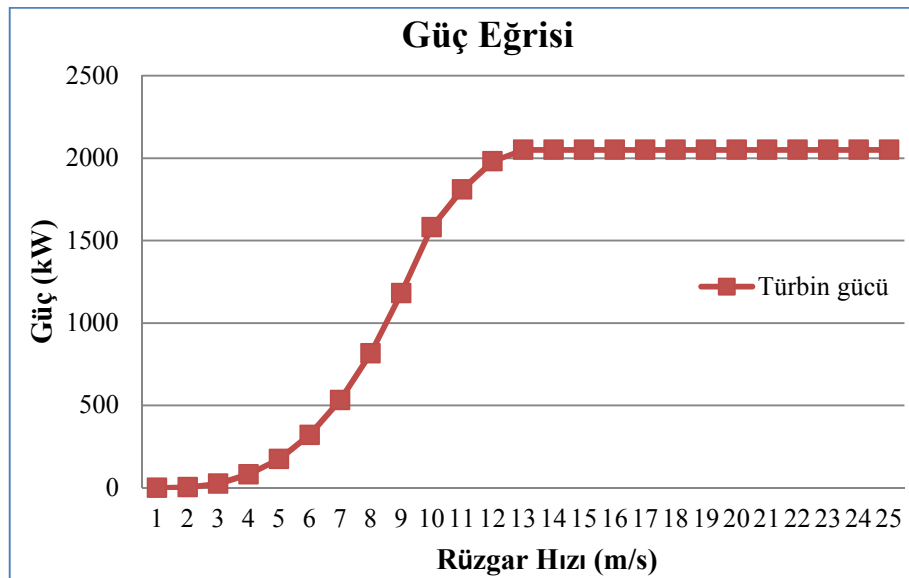
ENERCON	E-33	E-53	E-82	E-101	E-126
Anma gücü (kW)	330	800	2000	3000	7500
Rotor Çapı (m)	33,4	52,9	82	101	127
Süpürme Alanı (m ²)	876,16	2197,87	5281,02	8011,85	12667,69
Türbin Kule Yüksekliği (m)	50	60	78	99	135
Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	7,0	7,3	7,6	8,0	8,4
Kapasite Faktörü	0,31	0,35	0,36	0,40	0,27

Örneğin; E-82 türbini için v (7,6 m/s), P_n (2000 kW), D (82 m.) değerleri Denklem 2.9’da yerine konularak; $C_f=0,36$ olarak hesaplanmıştır.

3.2.3. Farklı rüzgar hızları için türbinden üretilecek enerji miktarı

Farklı rüzgar hızları için türbinin üreteceği enerji miktarı, rüzgar türbini güç eğrilerinden elde edilir ve bu sayede seçilen bir rüzgar türbininin bölge için uygun bir türbin olup olmadığı belirlenir. Türbini üreten firma, deneysel olarak belirli rüzgar hızlarında türbinin ürettiği enerji miktarlarını ölçerek bunları bir çizelge veya grafik şeklinde müşterilerine sunmaktadır. Bu sayede rüzgar türbininin her rüzgar hızı için üreteceği enerji miktarı hesabı yapılabilir. Model programda Enercon firmasına ait seçilen beş adet türbine ait bilgiler Ek E’de verilmektedir.

Şekil 3.4’de E-82 rüzgar türbininin 2 m/s rüzgar hızından itibaren enerji üretmeye başladığı, 13 m/s ve daha büyük hızlarda sabit olarak 2000 kW enerji üretmekte olduğu görülmektedir. Rüzgar türbini, rüzgar hızı 25 m/s üzerinde iken mekanik aksamlara zarar vermemesi sebebiyle çalışmayı durdurmaktadır. Bu rüzgar hızında, türbin kanatları daha da esneyerek, türbinin kendi gövdesine çarpması sonucu yıkılması söz konusudur. Rüzgar türbininin enerji üretmeye başladığı hıza başlama hızı, maksimum kapasitesine çıktığı rüzgar hızına nominal hız ve enerji üretmeyi durdurduğu hıza ise durma hızı denilmektedir [1].



Şekil 3.4. Enercon E-82 türbin güç verileri

Enercon firmasına ait beş farklı türbin için katalogdan alınan parametreler ve seçilen kule yüksekliğindeki hesaplanan rüzgar hızları model programa girilmiş ve programa ait görüntü Ek F’de verilmiştir. İhtiyaç duyulan rüzgar hızı değeri Ek F’de ki çizelgede var ise o rüzgar hızı değerine karşılık gelen güç değeri kullanılmakta, eğer

rüzgar hızı değeri çizelgede yok ise ilgili ayın rüzgar hızı değerine göre hesaplama yapılarak rüzgar türbininin üreteceği güç hesaplanmaktadır.

Örneğin; E-82 türbini için 7 m/s rüzgar hızında türbinin üreteceği güç miktarı çizelgede 532 kW olarak verilmiştir. Ancak yıllık ortalama hızı 7,6 m/s için güç değeri çizelgede olmadığından hesaplama yapılması gerekmektedir. Rüzgar hızı 7,6 m/s, süpürme alanı 5281 m², havanın yoğunluğu 1,225 kg/m³ ve güç katsayısı 0,48 alınarak Denklem 2.7’de yerine konularak türbinden elde edilen güç miktarı 682 kW olarak hesaplanmıştır. E-82 türbini için aylık ortalama rüzgar hızlarına göre üretecekleri güç miktarları benzer şekilde hesaplanarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2.’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Farklı rüzgar hızları için Enercon E-82 türbini güç değerleri

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ortalama
Rüzgar Hızı (m/s)	5,9	6,9	7,8	6,8	6,4	6,3	6,8	10,1	9,3	8,3	6,5	10,3	7,6
Güç Katsayısı (Cp)	0,43	0,46	0,48	0,46	0,46	0,46	0,46	0,49	0,5	0,49	0,46	0,49	0,48
Türbin Gücü (kW)	286	489	737	468	390	372	468	1633	1301	906	409	1732	682

Diğer türbinler içinde gerekli hesaplamalar yapılmış ve Ek F’deki çizelgeye dahil edilmiştir.

3.2.4. Rüzgar enerjisi maliyeti

Elektrik enerjisi üretim maliyetini hesaplayabilmek için santrale yapılan masrafların bilinmesi gereklidir. Bu masraflar; türbin masrafları (yaklaşık %75), projelendirme, rüzgar analizi, santral yeri ve inşaat masrafları (yaklaşık %25) v.b. olmak üzere diğer masraflardan oluşur [57]. Bu hesaplamalara aynı zamanda paranın zaman içindeki değeri de katılarak maliyet elde edilir. Rüzgar santrali toplam yatırım maliyeti M_{RS} , rüzgar türbin maliyeti M_{RT} ve santrale ait diğer maliyetler $M_{diğer}$ olmak üzere,

$$M_{RS} = M_{RT} + M_{diğer} \quad (3.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır.

Amortisman faktörü kullanılarak rüzgar santrali yatırım maliyetinin yıllık değeri hesaplanır. Amortisman, bir tesisin kuruluşunda yapılan toplam masrafların, kredi

alınmışsa kredi faizi de dahil olmak üzere belirli bir sürede geri ödenmesi amacıyla toplam yatırım değerinin önceden belirlenmiş bir kısmının, sermaye maliyeti olarak her yıl işletme gelirlerinden ayrılması ve vergi dışı bırakılması işlemine denir. Bunun belirlenmesinde birçok yöntem vardır. Bu çalışmada enerji maliyeti hesabında sabit yıllık amortisman metodu kullanılmıştır [58].

Amortisman faktörü AF , kredi faiz oranı i ve tesisin ömrü n olmak üzere,

$$AF = \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (3.2)$$

bağıntısıyla bulunur. Kredi faiz oranı %5 ve tesis ömrü 25 yıl olmak üzere rüzgar santrali için amortisman faktörü 0,0710 olarak hesaplanmıştır.

Santralin her yıl aynı enerjiyi ürettiğini kabul edersek rüzgar santrali maliyeti M_{RS} olmak üzere santralin yıllık toplam masrafları M_{SY} ,

$$M_{SY} = M_{RS} \times AF \quad (3.3)$$

Yıllık işletme süresi 8760, türbin nominal gücü N_{RT} , kapasite faktörü C_f olmak üzere rüzgar türbininden üretilen yıllık enerji miktarı E_{RT} ,

$$E_{RT} = 8760 \times N_{RT} \times C_f \quad (3.4)$$

Rüzgar türbini yıllık işletme bakım maliyetleri M_{RT-ib} olmak üzere rüzgar santrali birim enerji üretim maliyeti BM_{RS} ,

$$BM_{RS} = (M_{SY} + M_{RT-ib})/E_{RT} \quad (3.5)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Avrupa ülkelerindeki rüzgar santrali için birim yatırım maliyeti 900 €/kW - 1100 €/kW aralığındadır [57]. Ülkemizde ise kredi faizlerinin yüksek olması, yurtdışından yabancı uzman getirtilmesi, gümrük vergisi, nakliye ve montaj v.b. nedenlerden dolayı rüzgar türbinlerinin kW başına kurulu güç maliyeti 900€/kW-1350€/kW aralığındadır. Öte yandan türbin teknolojisindeki gelişmeler, rüzgar türbin maliyetlerini gün geçtikçe düşürmektedir [57,59]

Rüzgar türbini, işletme ve bakım maliyetleri literatürde yıllık olarak 1,2 c€/kWh [60] ve %2 [61] olarak alınmıştır.

Programda kullanılan en düşük türbinin (E-33) kW başına toplam yatırım maliyeti 1350 €/kW en yüksek türbinin (E-126) kW başına toplam yatırım maliyeti ise 900

€/kW, santral ömrü 25 yıl, kredi faiz oranı %5 ve işletme-bakım maliyetleri yıllık %2 alınarak santraller için kurulum dahil maliyet değerleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Rüzgar santrali maliyet değerleri

	Sembol	E-33	E-53	E-82	E-101	E-126
Türbin Gücü (kW)	N_{RT}	330	800	2000	3000	7500
Santral Birim maliyeti (€/kW)	BM_{RS}	1.350,00	1.299,79	1.224,48	1.161,72	900
Türbin Maliyeti (€)	M_{RT}	334.125,00	779.874,48	1.836.715,48	2.613.859,83	5.062.500,00
Diğer Maliyetler (€)	$M_{diğer}$	111.375,00	259.958,16	612.238,49	871.286,61	1.687.500,00
Toplam Maliyet (€)	M_{RS}	445.500,00	1.039.832,64	2.448.953,97	3.485.146,44	6.750.000,00
Kapasite faktörü	C_f	0,30	0,34	0,38	0,43	0,32
Ömür (Yıl)	n	25				
Yıllık işletme süresi (saat)		8760				
Yıllık üretilen enerji miktarı (kW)	E_{RT}	863.120,00	2.402.040,00	6.616.630,00	11.334.440,00	21.234.890,00
Faiz faktörü (%)	i	5				
İşletme maliyetleri (%/Yıl)	M_{RT-ib}	2				
Amortisman faktörü	AF	0,0710				
Santral Birim Maliyeti (€/kWh)	BM_{RS}	0,044	0,037	0,032	0,026	0,027
Toplam Kazanılan (€)		453.138,00	1.681.428,00	5.458.719,75	11.051.079,00	20.173.145,50

Çizelge 3.3’deki parametrelerden türbin gücü; kW cinsinden türbinde kullanılan jeneratörün nominal gücünü, santral birim maliyeti; nominal gücü küçük olan türbinlerde yüksek, nominal gücü büyük olan türbinlerde düşük olan kW başına euro cinsinden birim maliyeti, toplam maliyet; türbin gücü ile santral birim maliyetinin çarpımıdır, türbin maliyeti; toplam maliyetin yaklaşık %75’i alınarak elde edilen değerdir, diğer maliyetler; projelendirme, rüzgar analizi, santral yeri ve inşaat masrafları v.b. olmak üzere toplam maliyetin yaklaşık %25’i alınarak elde edilen değerdir, kapasite faktörü; santralde bir yılda üretilen enerji miktarının, santralin tam kapasitede çalışması ile üreteceği enerji miktarına oranıdır, ömür; yıl cinsinden santralin kullanım süresi, yıllık işletme süresi; bir yılın (365 gün) saat cinsinden değeri (8760), yıllık üretilen enerji miktarı; santralde bir yılda üretilen enerji miktarı, faiz faktörü; santral kurulumu için gerekli finansmanın bankadan temin edilmesi durumunda banka kredi oranı, işletme maliyetleri; santralin işletmede kalabilmesi

için türbin maliyetinin belirli bir oranına denk yapılan bakım ve onarımlara harcanan bedeli, amortisman faktörü; rüzgar santrali yatırım maliyetinin yıllık değerini hesaplamak için kullanılan parametre, türbin birim maliyeti; toplam maliyetin santral ömrü boyunca üretilen enerji miktarına oranı, işletme bakım birim maliyeti; türbin maliyeti ile işletme maliyetinin çarpımının yıllık üretilen enerji miktarına oranı; santral birim maliyeti ise türbin birim maliyeti ile işletme bakım birim maliyetinin toplamını ifade etmektedir.

E-82 türbini için Çizelge 3.3’de verilen değerler sırasıyla Denklem 3.1’den 3.5’e kadar yerine konularak santrale ait kWh başına birim maliyet bedeli $BM_{RS3}=0,032$ €/kWh olarak hesaplanmıştır. Diğer türbinlere ait birim maliyet bedelleri hesaplanarak aynı çizelgede verilmiştir.

Sadece rüzgar enerjisi kullanılarak ilçenin enerji ihtiyacını karşılamak istediğimizde kurulacak rüzgar santralinin kredi faiz oranlarına göre enerji birim maliyetleri ve yatırım geri ödeme süreleri hesaplanmış ve Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Rüzgar santrali enerji birim maliyetleri ve yatırım geri ödeme süreleri

	E-33	E-53	E-82	E-101	E-126
Faiz faktörü	0%				
Santral Birim Maliyeti (€/kWh)	0,028	0,024	0,020	0,017	0,017
Yatırımın Geri Ödeme Süresi (Yıl)	13,95	10,56	8,22	6,41	6,62
Faiz faktörü	5%				
Santral Birim Maliyeti (€/kWh)	0,044	0,037	0,032	0,026	0,027
Yatırımın Geri Ödeme Süresi (Yıl)	24,58	15,46	11,22	7,88	8,37
Faiz faktörü	9%				
Santral Birim Maliyeti (€/kWh)	0,060	0,051	0,043	0,036	0,037
Yatırımın Geri Ödeme Süresi (Yıl)	---	---	16,82	10,60	11,35

Türbinlere ait yıllık ortalama rüzgar hızlarına göre Denklem 2.9 yardımıyla hesaplanan kapasite faktörü değerleri Çizelge 3.1’de ve aylık ortalama rüzgar hızlarına göre Denklem 2.8 yardımıyla hesaplanan kapasite faktörü değerleri Çizelge 3.3’de verilmişti. Kapasite faktörüyle ilgili iki yöntemle hesaplanan değerler karşılaştırılarak aralarındaki hata payı hesaplanmış ve Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Türbinlere ait kapasite faktörlerinin karşılaştırılması

ENERCON	E-33	E-53	E-82	E-101	E-126
Kapasite Faktörü Yıllık Ortalama Hızlara göre	0,31	0,35	0,36	0,40	0,27
Kapasite Faktörü Aylık Ortalama Hızlara göre	0,30	0,34	0,38	0,43	0,32
Hata Payı (%)	3	3	6	7	18

Sonuçlara göre hata payı %3 ile 18 arasında değişmektedir. Hesaplamaların günlük hatta saatlik rüzgar hızı verilerine göre yapılması daha net verilerin elde edilmesini sağlayacaktır.

3.3. Elektrolizör ve Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin üst ısıl değeri ($\dot{U}ID_{H_2}$) 33,2 kWh/kg olduğundan 1 kg H_2 üretmek için gereken enerji (E_{H_2}), bu değerın elektroliz verimine oranıdır [62].

$$E_{H_2} = \dot{U}ID_{H_2} / \eta_{elek} \quad (3.6)$$

Elektrolizör verimi η_{elek} , depolama verimi η_{depo} olmak üzere seçilen tank kapasitesinin doldurulması için gereken elektrolizör enerji tüketimi,

$$Elektrolizör \ tüketimi = E_{H_2} \times \eta_{elek} \times \eta_{depo} \times Tank \ kapasitesi \quad (3.7)$$

elektrolizör ünitesinin gücü (P_{ELEK}),

$$P_{ELEK} = \frac{Elektrolizör \ tüketimi}{Aylık \ Çalışma \ saati} \quad (3.8)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Elektrolizör yatırım maliyeti M_E , amortisman faktörü AF , elektrolizör işletme bakım maliyeti M_{E-ib} , yıllık elektrolizör sonrası enerji ESE olmak üzere elektrolizör yıllık maliyeti M_{EY} ,

$$M_{EY} = M_E \times AF \quad (3.9)$$

elektrolizör birim enerji maliyeti BM_E ,

$$BM_E = (M_{EY} + M_{E-ib}) / ESE \quad (3.10)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Tank maliyetlerinin hem yüksek olması hem de değişkenlik arz etmesi sistem toplam maliyetini etkilemekte ve amortisman süresinin kesin olarak hesaplanmasını zorlaştırmaktadır.

Depolama yatırım maliyeti M_D , amortisman faktörü AF , depolama işletme bakım maliyeti M_{D-ib} , yıllık depolama sonrası enerji DSE olmak üzere depolama yıllık maliyeti M_{DY} ,

$$M_{DY} = M_D \times AF \quad (3.11)$$

ve depolama birim enerji maliyeti BM_D ,

$$BM_D = (M_{DY} + M_{D-ib})/DSE \quad (3.12)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Elektrolizör maliyetleri, literatürde 500 €/kW [63] ve 740 \$/kW [64] olup, elektroliz verimi %67 ile %82 [63], işletme bakım maliyetleri %2 [65] ile %5 [64] aralığında değişmektedir.

1 kg tank maliyeti; 425 €/kg [65] ile 720 \$/kg [66] aralığında değişmektedir. Depolama verimi %90 [63], tank ömrü 20 yıl ve işletme bakım maliyetleri ise toplam maliyetin %0,5'i kadardır [65].

E-82 türbini seçilerek modellenen sistemde elektrolizör verimi %72, depolama verimi %90, elektrolizör maliyeti 500 €/kW, elektrolizör işletme bakım maliyetleri %5, elektrolizör ömrü 10 yıl, 1240 kg depolama kapasitesine sahip 4 adet tank için tank maliyeti 600 €/kg, tank ömrü 20 yıl ve depolama işletme bakım maliyetleri %2, aylık çalışma saati 720 ve kredi faiz oranı %5 alınarak; denklem 3.2'de yerine konularak elektrolizör için $AF=0,1295$ ve depolama için $AF=0,0802$ bulunmuştur.

Ayrıca bu değerler sırasıyla Denklem 3.6 ile 3.11 arası denklemlerde yerlerine konularak, 1 kg H₂ üretmek için gereken enerji 46,12 kWh/kg, elektrolizör tüketimi 353,02 MWh, $P_{ELEK}=490,30$ kW, $BM_E=0,062$ €/kWh, $BM_D=0,457$ €/kWh bulunmuştur. Maliyet hesaplarında Ek H'deki 27.02.2015 tarihli TCMB kurları referans alınmıştır. Sistemin bileşenlerine ait seçilen veriler ve hesaplamalar sonucu bulunan değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Elektrolizör-depolama verileri ve hesaplama sonuçları

E-82 + 500 kW Elektrolizör + 4960 kg Hidrojen Tankı	
Hidrojenin üst ısı değeri (kWh/kg)	33,2
Elektrolizör verimi	0,72
Depolama verimi	0,9
1 kg H ₂ üretmek için gereken enerji (kWh/kg)	46,12
Hidrojen tankı kapasitesi (kg)	4.960,00
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	353,02
Faiz faktörü	5%
ELEKTROLİZÖR	
Seçilen Elektrolizör Gücü (kW)	500,00
Elektrolizör Gücü (kW)	490,30
Elektrolizör maliyeti (€)	250.000,00
Elektrolizöre gönderilen enerji (MWh/Ay)	353,02
Elektrolizör birim maliyeti (€/kW)	500,00
Ömür (Yıl)	10
Yıllık elektroliz sonrası enerji (kWh)	724.693,89
İşletme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Elektrolizör birim maliyeti (€/kW)	0,062
DEPOLAMA	
Depolama maliyeti (€)	2.976.000,00
Depolama sonrası enerji (kWh)	652.224,50
Fiyat (€/kg)	600,00
Ömür (Yıl)	20
Yıllık depolama sonrası enerji (kWh)	652,22
İşletme maliyetleri (%/Yıl)	2%
Amortisman faktörü	0,0802
Depolama birim maliyeti (€/kWh)	0,457

Hesaplamalar sonucu elektrolizör gücü 490,30 kW bulunmuş ancak 500 kW gücünde elektrolizör seçilmiştir.

3.4. Yakıt Pili

Yakıt pili yatırım maliyeti M_P , amortisman faktörü AF , yakıt pili işletme bakım maliyeti M_{P-ib} , yıllık yakıt pili sonrası enerji $YPSE$ olmak üzere yakıt pili yıllık maliyeti M_{PY} ,

$$M_{PY} = M_P \times AF \quad (3.13)$$

ve yakıt pili birim enerji maliyeti BM_P ,

$$BM_P = (M_{PY} + M_{P-ib})/YPSE \quad (3.14)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

PEM tipi yakıt pili maliyetleri 3000 €/kW [65] ve 4100 €/kW [67] aralığında değişmektedir. Yakıt pili verimi %47 [63] ömrü 10 yıl ve işletme bakım maliyetleri ise toplam maliyetin %2,5'i kadardır [65].

Bu çalışmada kullanılan PEM yakıt pili için maliyet 3000 €/kW, yakıt pili ömrü 10 yıl, yakıt pili verimi %55 ve işletme bakım maliyetleri %5 ve kredi faiz oranı %5 seçilerek $AF=0,1295$, $BM_P=0,263$ €/kWh bulunmuştur. Yakıt piline ait veriler ve hesaplamalar sonucu bulunan değerler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

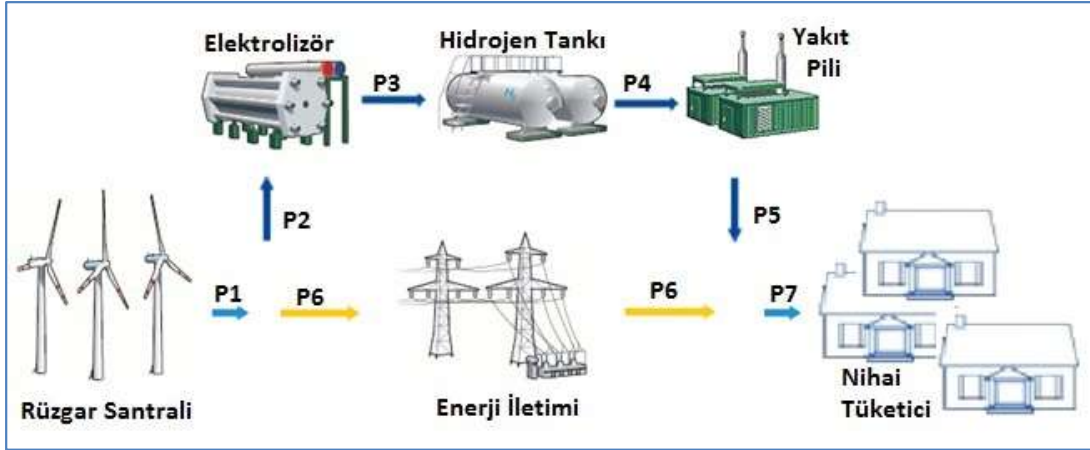
Çizelge 3.7. Yakıt pili verileri ve hesaplama sonuçları

YAKIT PİLİ	
Pil maliyeti (€)	525.000,00
Seçilen Yakıt Pili Gücü (kW)	175
Yakıt Pili Gücü (kW)	174,74
Yıllık yakıt pili sonrası enerji (kWh)	358.723,48
Yakıt pili birim maliyeti (€/kW)	3000
Ömür (Yıl)	10
İşletme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
İşletme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Yakıt pili birim maliyeti (€/kWh)	0,263

Elektrolizör verimleri laboratuvar ortamında %90-95'ler seviyesinde olup elektrolizör verimi %72, depolama verimi %90 ve yakıt pili verimi %55 alınarak kullanım ömürleri boyunca verimlerinde azalma olmadığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

3.5. Model Programın Analizi

Şekil 3.5’de, enerji kaynağı rüzgar türbinleri, enerji taşıyıcısı hidrojenin üretiminin yapıldığı elektrolizör, hidrojenin depolandığı tanklar, hidrojenin yakıldığı yakıt pilleri ve nihai tüketicilerden oluşan sistem görülmektedir.



Şekil 3.5. Rüzgar hidrojen hibrit enerji sistemi

Bu tez çalışmasında iki senaryo ele alınmaktadır.

Senaryo 1: Rüzgar türbinlerinden elde edilen enerji (P_1) Armutlu ilçesinin enerji ihtiyacından (P_7) fazla ise fazla olan enerji ($P_2=P_1-P_6$) elektrolizöre gönderilerek hidrojen üretimi sağlanır ve elde edilen hidrojen tanklarda depolanır. Deponun dolmasından sonra elektrolizöre enerji gönderilmez ve kalan fazla enerji şebekeye verilir.

Senaryo 2: Rüzgar türbinlerinden elde edilen enerji (P_1) Armutlu ilçesinin enerji ihtiyacını (P_7) karşılayamıyorsa ilave enerji ihtiyacı (P_5) depolanan hidrojenin yakıt piline gönderilerek enerji üretilmesi ($P_7 = P_5+P_6$) ile sağlanır. Eğer bu enerji yeterli olmazsa enerji açığı şebekeden karşılanır.

MS Excel programı aracılığı ile yapılan modelleme dört farklı kısımdan oluşmaktadır. Rüzgar santrali, elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt pili için farklı veriler girilerek programı kullanacak 3. şahıslar için sonuçların izlenmesi sağlanmaktadır.

Rüzgar türbini seçimini içeren birinci kısımda, kullanıcı arayüzünde daha önceden teknik verileri tanımlanmış beş farklı türbinden birinin seçimi, türbinin banka kredisi kullanılarak alınması durumunda faiz faktörü, her türbin için kW başına birim

maliyet alt ve üst limit değerleri, santral ömrü ve işletme maliyet değeri girilmektedir.

Çizelge 3.9. Rüzgar türbini program verileri

Rüzgar türbini	Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	7,6
	Faiz faktörü (%)	5
	Türbin tipi	3
	Türbin Kule Yüksekliği (m)	78
	Nominal Güç (MW)	2,00
	Türbin Sayısı (adet)	3
	Türbin Çıkış Gücü (MW)	0,6816
	Türbin Maliyeti Alt Limit (€/kW)	900
	Türbin Maliyeti Üst Limit (€/kW)	1350
	İşletme maliyetleri (%/Yıl)	2,0
	Santral Ömrü (Yıl)	25
	Birim Maliyet (€/kWh)	0,032

Programdaki dört kısım ile ilgili çizelgelerde koyu renkle gösterilen hücreler kullanıcı tarafından dışarıdan veri girilebildiğini, diğer hücreler ise hesaplamalar sonucu elde edilen verileri göstermektedir.

Elektrolizör ünitesini içeren ikinci kısımda; kullanıcı arayüzünde ünitenin banka kredisi kullanılarak alınması durumunda faiz faktörü, verimi, kW başına birim maliyet değeri, ömrü ve işletme maliyet değeri girilmektedir.

Çizelge 3.10. Elektrolizör program verileri

Elektrolizör	Faiz Faktörü (%)	5
	Seçilen Elektrolizör Gücü (kW)	500
	Yıllık İşletme Süresi (Saat)	2160
	Elektroliz Verimi (η_{elek}) / (%)	72
	Elektroliz Birim Maliyeti (€/kW)	500
	Elektroliz Ömrü (Yıl)	10
	İşletme Maliyetleri (%/Yıl)	5,0
	Birim Maliyet (€/kWh)	0,062

Elektroliz sonucu oluşan hidrojenin depolanmasını içeren üçüncü kısımda; kullanıcı arayüzüne tankın banka kredisi kullanılarak alınması durumunda faiz faktörü, kullanılacak deponun adeti ve depolama verimi, kg başına birim maliyet değeri, tankın ömrü ve işletme maliyet değeri girilmektedir.

Çizelge 3.11. Hidrojen depolama program verileri

Depolama	Faiz Faktörü (%)	5
	Depolama Kapasitesi (kg)	1240
	Depo Adeti	4
	Yıllık İşletme Süresi (Saat)	2160
	Depolama Verimi (η_{depo}) / (%)	90
	Tank Birim Maliyeti (euro/kg)	600
	Tank Ömrü (Yıl)	20
	İşletme Maliyetleri (%/Yıl)	2,0
	Birim Maliyet (€/kWh)	0,457

Yakıt pilini içeren dördüncü kısımda ise; kullanıcı arayüzünde yakıt pilinin banka kredisi kullanılarak alınması durumunda faiz faktörü, yakıt pili verimi, kW başına birim maliyet değeri, ömrü ve işletme maliyet değeri girilebilmektedir.

Çizelge 3.12. Yakıt pili program verileri

Yakıt Pili	Faiz Faktörü (%)	5
	Yıllık İşletme Süresi (Saat)	2160
	Yakıt Pili Verimi (η_{yp}) / (%)	55
	Yakıt Pili Birim Maliyeti (€/kW)	3000
	Yakıt Pili Ömrü (Yıl)	10
	İşletme Maliyetleri (%/Yıl)	5,0
	Birim Maliyet (€/kWh)	0,263

Verilerin girilmesinden sonra yıllık enerji toplamı (MWh), yıllık enerji akışı (MWh), depolama kapasitesi (kg), birim enerji maliyeti (€/kWh) ve mutlak maliyet (€) bilgilerinin incelenmesi excel grafikleri vasıtasıyla yapılmaktadır.

ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR VE HİDROJEN HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Nusret KARAKUŞ
Elektrik-Elektronik Mühendisi

Yrd.Doç.Dr. Kayhan İNCE
Danışman Öğretim Üyesi

TCMB Döviz Kurları

Tarih: 2/27/2015

1 USD: 2.5077 EPDK (kWh/\$): 0,073

1 EURO: 2.8148

Rüzgar Hızları

Ocak	5,6	Temmuz	6,5
Şubat	6,6	Ağustos	9,6
Mart	7,4	Eylül	8,8
Nisan	6,5	Ekim	7,9
Mayıs	6,1	Kasım	6,2
Haziran	6	Aralık	9,8

Rüzgar Türbini

Faiz Faktörü: 0.05

Türbin Tipi: 3

Maliyet Alt Limit (€/kW): 900

Maliyet Üst Limit (€/kW): 1350

İşletme Maliyetleri (%/Yıl): 0.02

Ömür (Yıl): 25

Depolama

Faiz Faktörü: 0.05

Depo Adeti: 4

Depo Verimi: 0.9

Maliyet (€/kW): 600

Ömür (Yıl): 20

İşletme Maliyetleri (%/Yıl): 0.02

Enerji Tüketim Değerleri

Ocak	1425	Temmuz	1920
Şubat	1370	Ağustos	1811
Mart	1291	Eylül	2257
Nisan	1256	Ekim	1246
Mayıs	1429	Kasım	1521
Haziran	1839	Aralık	1240

Elektroliz

Faiz Faktörü: 0.05

Elektroliz Verimi: 0.72

Maliyet (€/kW): 500

Ömür (Yıl): 10

İşletme Maliyetleri (%/Yıl): 0.05

Yakıt Pili

Faiz Faktörü: 0.05

Yakıt Pili Verimi: 0.55

Maliyet (€/kW): 3000

Ömür (Yıl): 10

İşletme Maliyetleri (%/Yıl): 0.05

Grafikler-1

Grafikler-2

KAYDET

Kapat

Şekil 3.6. Hibrit sistem veri giriş sayfası görünümü

Şekil 3.6, Excel programı içinde kullanıcıya dışarıdan veri girişini sağlayan makrolar kullanılarak hazırlanmış arayüzü göstermektedir. Ayrıca beş farklı türbinden her birinin ayrı ayrı seçilmesi durumunda oluşan Excel program görüntüleri Ek G’de verilmiştir.

Model programın analizinin yapılmasında kullanılan denklemlerdeki 1’den 12’ye kadar olan alt indis değerleri ocak’dan, aralık ayına kadar yılın aylarını ifade etmektedir. Örneğin; $YÜK_1$, ocak ayındaki enerji tüketim değeridir.

İlçenin aylık enerji tüketim değerleri ve aylık ortalama rüzgar hızları hazırlanan model programa girildikten sonra rüzgar türbin tipi seçilmiş ve E-82 türbini için Çizelge 3.13’deki değerler elde edilmiştir. Türbin çıkış gücünün aylık çalışma saati ile çarpılması sonucu tek bir türbinin yaptığı iş hesaplanabilmektedir. Toplam türbinlerin yaptığı iş ise sistemde yer alan türbin sayısına bağlıdır.

Çizelge 3.13. Enercon E-82 türbin için hesaplanan değerler

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam (yılılık)
Türbin Çıkış Gücü (MW)	0,286	0,489	0,737	0,468	0,390	0,372	0,468	1,633	1,301	0,906	0,409	1,732	0,682
Türbinin yaptığı iş (MWh)	205,67	351,93	530,49	336,85	280,84	267,88	336,85	1175,75	936,65	652,51	294,21	1246,99	6616,63
Türbinlerin yaptığı iş (MWh)	617,02	1055,80	1591,48	1010,56	842,51	803,63	1010,56	3527,26	2809,94	1957,53	882,62	3740,98	19849,90

$YÜK_{1,2,\dots,12}$; ilgili aylarda ilçede kullanılan enerji miktarı, $BTYİ_{1,2,\dots,12}$; ilgili aylarda bir türbinin yaptığı iş miktarı, $TYİ_{1,2,\dots,12}$; ilgili aylarda birden fazla türbin kullanılması durumunda türbinlerin yaptığı iş miktarı olmak üzere; bir yıl içerisinde ilçede kullanılan toplam enerji miktarı $YÜK_{toplam}$,

$$Yük_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (Yük_n) \quad (3.15)$$

bir yıl içerisinde bir türbinin yaptığı işler toplamı $BTYİ_{toplam}$,

$$BTYİ_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (BTYİ_n) \quad (3.16)$$

bir yıl içerisinde türbinlerin yaptığı işler toplamı $TYİ_{toplam}$,

$$TYİ_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (TYİ_n) \quad (3.17)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

Burada ayrıca yıllık enerji ihtiyacının karşılanması için gerekli türbin sayısının (TS) belirlenmesi gereklidir. Bu değer, yıllık toplam tüketilen enerji miktarının bir türbinin yaptığı iş miktarına oranıdır.

$$TS = YÜK_{\text{toplam}} / BTYİ_{\text{toplam}} \quad (3.18)$$

Örneğin; ilçenin enerji ihtiyacının karşılanması için E-82 türbini seçildiğinde bu türbinden en az 3 adet kullanmak gereklidir.

İlgili aylarda tüketilen enerji, bir türbinin yaptığı iş ve türbinlerin yaptığı işlere ait hesaplamalar Denklem 3.15, 3.16 ve 3.17 yardımıyla yapılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 3.14.'de verilmiştir.

Çizelge 3.14. YÜK, BTYİ ve TYİ için değerler

YÜK ₁	1425	BTYİ ₁	205,67	TYİ ₁	617,02
YÜK ₂	1370	BTYİ ₂	351,93	TYİ ₂	1.055,80
YÜK ₃	1291	BTYİ ₃	530,49	TYİ ₃	1.591,48
YÜK ₄	1256	BTYİ ₄	336,85	TYİ ₄	1.010,56
YÜK ₅	1429	BTYİ ₅	280,84	TYİ ₅	842,51
YÜK ₆	1839	BTYİ ₆	267,88	TYİ ₆	803,63
YÜK ₇	1920	BTYİ ₇	336,85	TYİ ₇	1.010,56
YÜK ₈	1811	BTYİ ₈	1175,75	TYİ ₈	3.527,26
YÜK ₉	2257	BTYİ ₉	936,65	TYİ ₉	2.809,94
YÜK ₁₀	1246	BTYİ ₁₀	652,51	TYİ ₁₀	1.957,53
YÜK ₁₁	1521	BTYİ ₁₁	294,21	TYİ ₁₁	882,62
YÜK ₁₂	1240	BTYİ ₁₂	1246,99	TYİ ₁₂	3.740,98
YÜK_{toplam}	18605	BTYİ_{toplam}	6.616,63	TYİ_{toplam}	19.849,90

Elektrolizöre gönderilen enerji EGE, elektrolizör sonrası enerji ESE, elektrolizör verimi η_{elek} , depolama verimi η_{depo} , ve yakıt pili verimi η_{yp} olmak üzere; ilgili aylarda elektrolizör sonrası enerji miktarları $ESE_{1,2,\dots,12}$,

$$ESE = EGE \times \eta_{\text{elek}} \quad (3.19)$$

depolama sonrası enerji miktarları $DSE_{1,2,\dots,12}$,

$$DSE = ESE \times \eta_{\text{depo}} \quad (3.20)$$

yakıt pili sonrası enerji miktarları $YPSE_{1,2,\dots,12}$,

$$YPSE = DSE \times \eta_{yp} \quad (3.21)$$

yıllık toplam elektrolizör sonrası enerji miktarı ESE_{toplam} ,

$$ESE_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (ESE_n) \quad (3.22)$$

yıllık toplam depolama sonrası enerji miktarı DSE_{toplam}

$$DSE_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (DSE_n) \quad (3.23)$$

yıllık toplam yakıt pili sonrası enerji miktarı $YPSE_{toplam}$,

$$YPSE_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (YPSE_n) \quad (3.24)$$

bağıntılarıyla hesaplanır.

İlgili aylarda enerji akışı için Denklem 3.19 ile 3.24 arası denklemler yardımıyla hesaplanan değerler Çizelge 3.15’de verilmiştir.

Çizelge 3.15. ESE, DSE ve YPSE için değerler

ESE_1	0,00	DSE_1	0,00	$YPSE_1$	125,82
ESE_2	0,00	DSE_2	0,00	$YPSE_2$	0,00
ESE_3	216,35	DSE_3	194,71	$YPSE_3$	0,00
ESE_4	0,00	DSE_4	0,00	$YPSE_4$	107,09
ESE_5	0,00	DSE_5	0,00	$YPSE_5$	0,00
ESE_6	0,00	DSE_6	0,00	$YPSE_6$	0,00
ESE_7	0,00	DSE_7	0,00	$YPSE_7$	0,00
ESE_8	254,17	DSE_8	228,76	$YPSE_8$	0,00
ESE_9	0,00	DSE_9	0,00	$YPSE_9$	125,82
ESE_{10}	0,00	DSE_{10}	0,00	$YPSE_{10}$	0,00
ESE_{11}	0,00	DSE_{11}	0,00	$YPSE_{11}$	0,00
ESE_{12}	254,17	DSE_{12}	228,76	$YPSE_{12}$	0,00
ESE_{toplam}	724,69	DSE_{toplam}	652,22	$YPSE_{toplam}$	358,72

İlgili aylara ait rüzgar santrali, elektrolizör, depolama ve yakıt pili maliyetlerinin toplamı $MM_{1,2,\dots,12}$,

$$MM_n = TYI_n \times BM_{RS} + ESE_n \times BM_E + DSE_n \times BM_D + YPSE_n \times BM_P \quad (3.25)$$

ilgili aylardaki mutlak maliyet bedelleri $BM_{1,2,\dots,12}$;

$$BM_n = MM_n / YÜK_n \quad (3.26)$$

ilgili aylardaki mutlak maliyet bedellerinin toplamı MM_{toplam} ,

$$MM_{toplam} = \sum_{n=1}^{12} (MM_n) \quad (3.27)$$

yıllık toplam mutlak maliyet bedelinin yıllık tüketilen enerjiye oranını ifade eden enerji birim maliyet ortalama değerleri $BM_{ortalama}$,

$$BM_{ortalama} = MM_{toplam} / YÜK_{toplam} \quad (3.28)$$

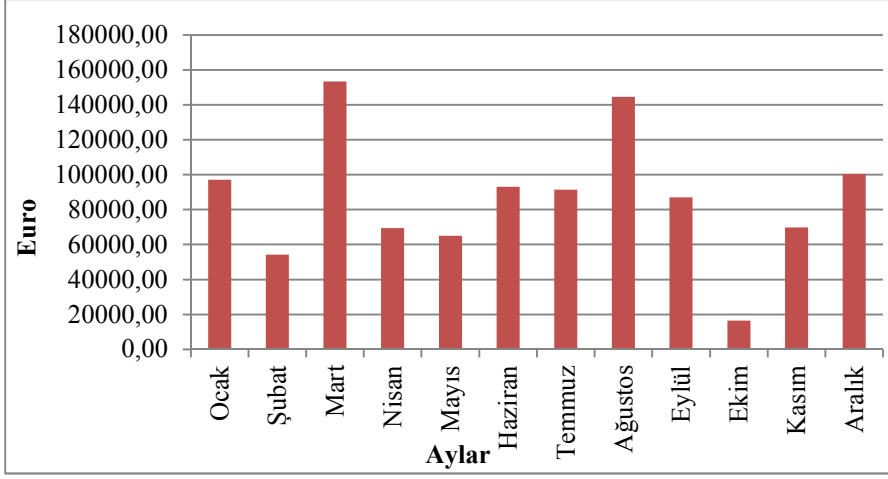
bağıntılarıyla hesaplanır.

İlgili aylarda enerji birim maliyet bedeli ve mutlak maliyet bedeli için Denklem 3.25 ile 3.28 arası denklemler yardımıyla hesaplanan sonuçlar Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. MM_n , MM_{toplam} , BM_n ve $BM_{ortalama}$ için değerler

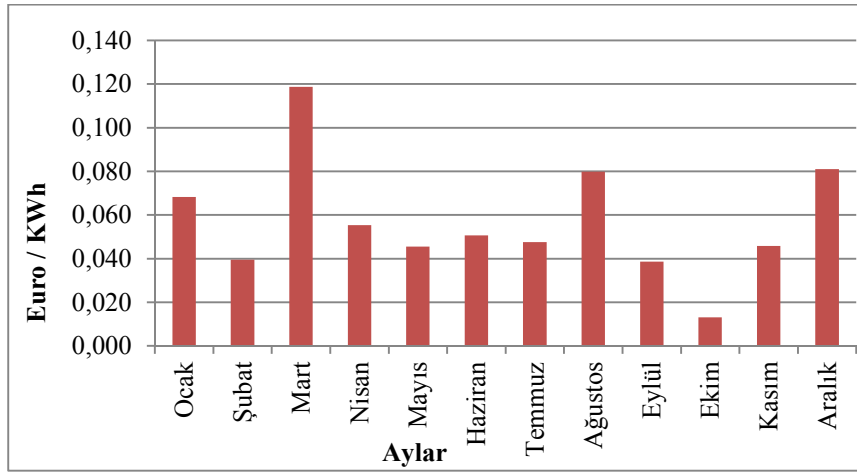
MM_1	97174,66	BM_1	0,068
MM_2	54208,53	BM_2	0,040
MM_3	153325,50	BM_3	0,119
MM_4	69495,89	BM_4	0,055
MM_5	65082,16	BM_5	0,046
MM_6	93015,16	BM_6	0,051
MM_7	91451,53	BM_7	0,048
MM_8	144561,32	BM_8	0,080
MM_9	87066,58	BM_9	0,039
MM_{10}	16391,61	BM_{10}	0,013
MM_{11}	69738,43	BM_{11}	0,046
MM_{12}	100393,66	BM_{12}	0,081
MM_{toplam}	1.041.905,03	$BM_{ortalama}$	0,056

Çizelge 3.16'da verilen rüzgar hidrojen hibrit enerji sisteminin aylık mutlak maliyet bedelinin grafik olarak gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Sistemin aylık mutlak maliyetleri

Çizelge 3.16’da verilen rüzgar hidrojen hibrit enerji sisteminin aylık birim maliyet bedelinin grafik olarak gösterimi Şekil 3.7’de verilmiştir. Diğer türbin tipleri için oluşturulan aylık mutlak ve aylık birim maliyet grafikleri Ek G’de gösterilmiştir.



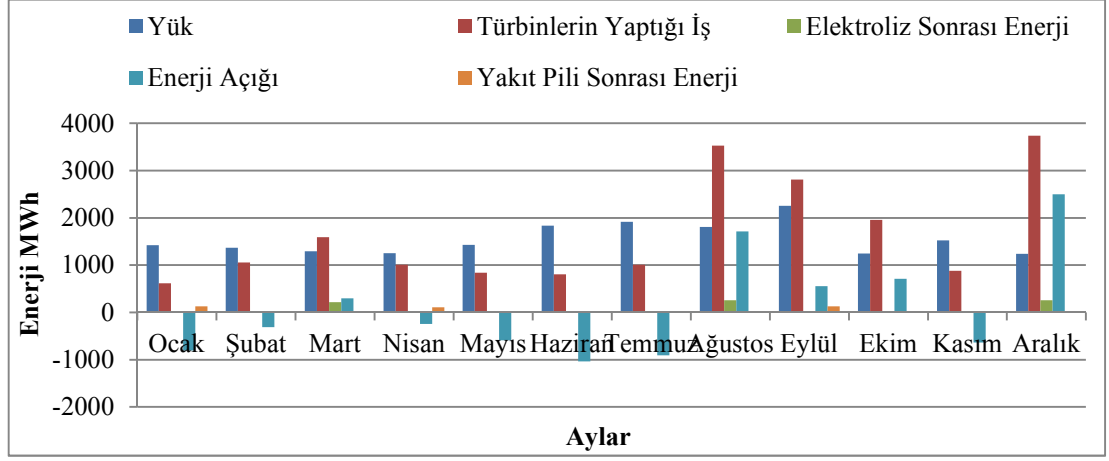
Şekil 3.8. Sistemin aylık birim maliyetleri

Şekil 3.7 ve 3.8’de maksimum enerji birim maliyeti ve mutlak maliyet mart ayında olmaktadır. Minimum enerji birim maliyeti ve mutlak maliyet ekim ayında olmaktadır.

3.6. Model Programdaki Senaryoların İncelenmesi

Armutlu ilçesinin yük profili Şekil 3.1.’de verilmişti. İlçenin enerji ihtiyacının karşılanması için farklı rüzgar türbinleri (330 kW, 800 kW, 2000 kW, 3000 kW, 7500 kW), 500 kW’lık elektrolizör, 1240 kg depolama kapasitesine sahip 4 adet hidrojen tankı ve ihtiyaca göre farklı güçlerdeki yakıt pilleri kullanılarak bir

modelleme yapılmıştır. Programda E-82 türbin seçildiğinde yapılan hesaplamalar neticesinde 3 adet türbin kullanılarak türbinlerin üretecekleri enerji miktarı (MWh) Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Enercon E-82 türbin modeli için yıllık enerji akış diyagramı

Türbinlerin yaptığı iş ve yük eğrileri incelendiğinde; mart, ağustos, eylül, ekim ve aralık aylarında türbinlerin yaptığı iş, ihtiyaç duyulan enerji (yük) miktarından fazla olduğundan enerji fazlası oluşmaktadır ve bu aylar senaryo 1’i ifade etmektedir. Diğer aylarda ise türbinlerin yaptığı iş, ihtiyaç duyulan enerji (yük) miktarından az olduğundan enerji açığı oluşmaktadır ve bu aylar senaryo 2’yi ifade etmektedir.

Senaryo 1’deki aylarda, rüzgar santralinden elde edilen enerji, ilçenin enerji ihtiyacından fazla olduğundan üretilen enerji doğrudan tüketiciye gönderilerek ihtiyaç karşılanır. İhtiyacın karşılanması sonrasında artan enerji elektrolizöre gönderilerek hidrojen üretimi gerçekleştirilir ve üretilen hidrojen tankta depolanır. Eğer tankımız tamamen dolduğunda yine enerji fazlamız varsa bu enerji şebekeye verilir.

Örneğin; ağustos ayında tüketilen enerji ($P_7 = YÜK_8 = 1811$ MWh), türbinlerin ürettiği enerjiden ($P_1 = TYİ_8 = 3527,26$ MWh) az olduğu için enerji fazlası ($EA_8 = TYİ_8 - YÜK_8 = 1716,26$ MWh) oluşmuştur.

Depolama tank kapasitesimiz 4960 kg olduğundan fazla olan enerjinin 353,02 MWh’lık kısmı elektroliz ünitesinde kullanılarak hidrojen üretimi sağlanmaktadır. Kalan 1363,24 MWh’lık kısmı şebekeye verilir. Elektroliz ünitesinin verimi $\eta_{elek} = \%72$ olduğundan elektrolizör sonrası elde edilen enerji, $P_8 = ESE_8 = EGE_8 \times \eta_{elek} =$

254,17 MWh'tir. Ağustos ayı içinde enerji fazlası mevcuttur ve yakıt pilinden üretilen enerjiye ihtiyaç yoktur.

Senaryo 2'deki aylarda ise türbinden üretilen enerji ilçenin enerji ihtiyacını karşılamadığından hidrojen tankındaki hidrojen kullanılarak yakıt pili vasıtasıyla enerji üretimi yapılır ve ilçenin enerji ihtiyacı karşılanır. Bu enerji ihtiyacın karşılanması için yeterli değilse enerji ihtiyacı şebekeden karşılanır.

Örneğin; ocak ayında tüketilen enerji ($P_6 = YÜK_1 = 1425$ MWh), türbinlerin ürettiği enerji ise ($P_1 = TYİ_1 = 617,02$ MWh) olup enerji açığı ($EA_1 = TYİ_1 - YÜK_1 = 807,98$ MWh) olmaktadır. Enerji açığını kapatmak için depolanan hidrojeni yakıt pilinde yakarak enerji elde edilmektedir. Depolama sonrası enerji miktarı olan $P_4 = 228,76$ MWh enerji yakıt piline gönderilebilmektedir. Yakıt pilinin verimi $\eta_{yp} = \%55$ ve yakıt pili sonrası enerji, $P_5 = YPSE = 228,76 \times \eta_{yp} = 125,82$ MWh'tir.

Ocak ayı için enerji açığımız olduğundan elektrolizöre gönderilecek enerji yoktur. Kalan 682,16 MWh'lik enerji açığının karşılanabilmesi için şebekeden enerji alınır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Enerji üretiminde fosil kaynaklı yakıtlar büyük oranda kullanılmaktadır. Bu yakıtların tükenmesi durumunda ülkemiz enerji ihtiyacını karşılamak için diğer ülkelerden enerji almak yerine kendi ihtiyacını karşılayabilecek bir konuma ulaşmalıdır. Türkiye rüzgar enerji potansiyelimiz 47.849 MW olarak ifade edilmektedir [46]. Kapasite faktörünün %35 alınması durumunda rüzgardan üretilen enerji miktarı 146.705 GWh olur. 2014 sonu itibariyle elektrik üretimi 250.400 GWh olup ancak %3,3'ü rüzgardan karşılanmaktadır. Rüzgar potansiyelimizin tamamı değerlendirilebilse idi 2014 enerji üretiminin yarıdan fazlası rüzgar enerjisinden karşılanacaktı.

Yenilenebilir enerji kaynakları çeşitli olmasına rağmen bu tezdeki modelleme ile rüzgar ve hidrojen enerjisinden bahsedilerek bu kaynakların kullanımına bir örnek sunulmuştur. REPA verilerine göre Yalova ilinin rüzgar enerji potansiyeli 533 MW [54] olup iyi bir rüzgar potansiyeline sahiptir ve Armutlu ilçesinde 54 MW gücünde bir santral kurulumuna başlanmıştır.

Bu çalışmada Yalova ili, Armutlu ilçesinin enerji ihtiyacının rüzgar enerjisi ve rüzgardan elde edilen hidrojenin kullanılarak karşılanması amaçlanmıştır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında rüzgar enerjisi ve yakıt pilinden elde edilen enerjinin yetersiz kalması durumları için sisteme şebeke bağlantısı yapılması planlanmıştır. Aynı zamanda bu bağlantı sisteminin enerji fazlasının şebekeye verilmesi içinde kullanılması değerlendirilmiştir. Bu nedenle ilk olarak ilçenin enerji tüketim değerleri ilgili enerji dağıtım şirketinden ve rüzgar hızı verileri ilgili firmadan temin edilerek, enerji ihtiyacını karşılayacak rüzgar türbini, bu enerjiden hidrojen üretimi için elektrolizör, üretilen hidrojenin depolanması için hidrojen tankı ve hidrojenin enerjiye çevrilmesi için gerekli olan yakıt pili güçleri belirlenmiştir. Sonra MS Excel programı kullanılarak model bir program hazırlanmış ve sistem bileşenlerinin maliyet hesaplarının yapılabilmesi için programa girilmesi gereken parametreler belirlenmiştir.

E-82 türbini, 500 kW elektrolizör, 4960 kg. hidrojen tankı ve 175 kW PEM yakıt pili kullanılarak modellenen sistem için tüm bileşenlerin maliyet hesapları %5 faizli durum için yapılarak hibrit sistemin enerji birim maliyeti 0,056 €/kWh ve rüzgar santralinden elde edilen enerjinin birim maliyeti 0,032 €/kWh bulunmuştur. Hibrit sistemden elde edilen enerjinin birim maliyeti rüzgar santralinden elde edilen enerjinin birim maliyetinden yüksek olduğundan yatırım ekonomik olmamaktadır. Ancak gelişen teknolojiyi takip ederek sistemdeki bileşenlerin ülkemizde üretilmeye başlanması ile beraber maliyetler daha da düşürülebilir.

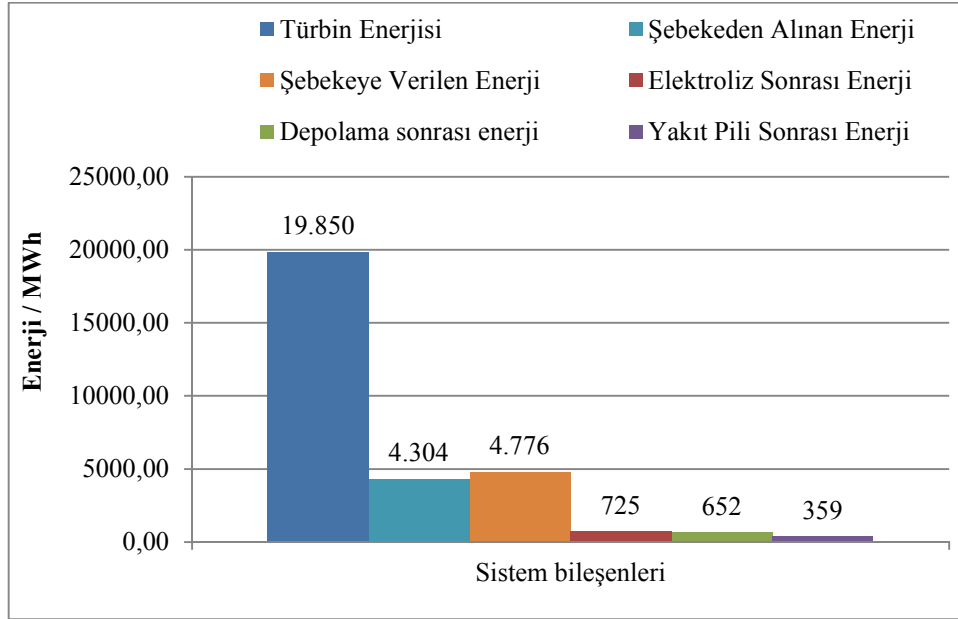
Rüzgar hızı sabit bir enerji üretimi sağlamaz, kesintili bir enerji üretimi sunmaktadır. Yani bir saat içerisinde üretilen enerji, ikinci saat sonunda aynı miktarda üretilemez, hatta anlık olarak değişebilir. Dolayısıyla rüzgar hızının değişimi ile üretilen enerji miktarı değişir. Bu nedenle rüzgar türbininden elde edilen enerji miktarının saatlik olarak hesaplanması durumunda daha verimli bir enerji yönetimi yapılabilmesi mümkün olacaktır.

MS Excel ile yapılan programın doğruluğunun test edilmesi açısından; ilçede santral kurulumu yapan firmanın yaptığı ölçümler neticesinde, kullandıkları 70 m. kule yüksekliğine ve 1,5 MW güce sahip 36 adet Sinovel SL1500/82 türbini için yıllık enerji üretiminin 193,4 GWh/yıl olduğu görülmüş ve bu türbine ait veriler programa girildiğinde Ek-F'de görüldüğü gibi yıllık enerji üretim değeri 205,5 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Modellemede hesaplanan teorik sonuçlar, %6 daha yüksek çıkmıştır. Teorik hesaplamaların aylık ortalama hızlar esas alınarak yapılması bu farkı meydana getirmiştir.

Şekil 4.1'de bir yıl boyunca 3 adet Enercon E-82 türbini için türbinlerin üreteceği enerji miktarı (19.850 MWh), şebekeden alınan enerji miktarı (4.304 MWh), şebekeye verilen enerji miktarı (4.776 MWh), elektroliz sonrası enerji miktarı (725 MWh), depolama sonrası enerji miktarı (652 MWh) ve yakıt pili sonrası enerji miktarı (359 MWh) olarak görülmektedir.

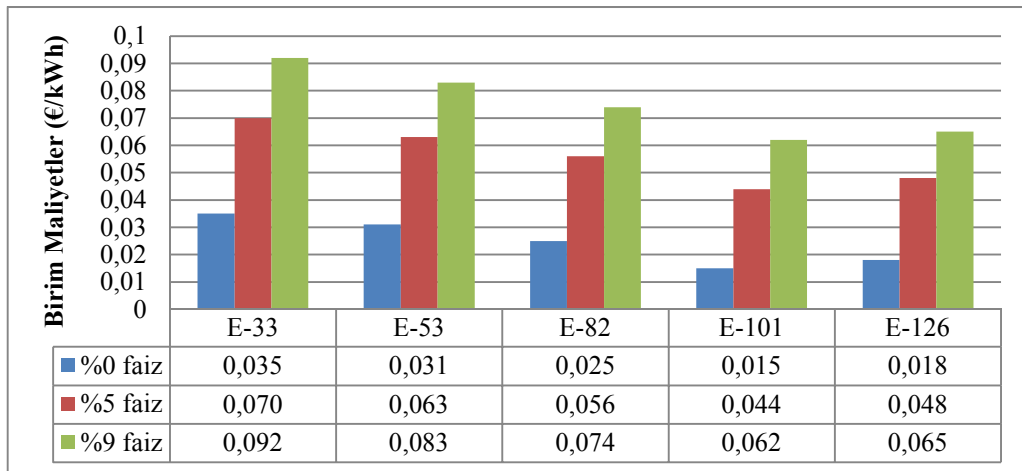
İlçenin enerji tüketimi 18.605 MWh olduğundan, ilçenin ihtiyacı olan enerjinin %2'si yakıt pilinden %98'si rüzgar türbininden karşılanmıştır. Yılsonunda yapılan hesaplamalar neticesinde şebekeye verilen ve şebekeden alınan enerji miktarları incelenmiştir. Sonuçta şebekeye enerji verilmişse; verilen miktar EPDK tarafından belirlenen 0.073 \$/kW değeri [68] ile hesaplanarak elde edilen gelir sistem yatırım

maliyetinden düşülmüş, şebekeden enerji alınmışsa maliyet aynı şekilde hesaplanarak sistem yatırım maliyetine ilave edilmiştir.



Şekil 4.1. Yük profili ve türbinlerin üreteceği enerji miktarları

Sistemin maliyeti incelendiğinde; sistemdeki elektrolizör, hidrojen tankı ve yakıt pili maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle birim maliyet değeri yüksek çıkmaktadır. Ayrıca faiz faktörü de sistem maliyetine büyük oranda yük getirmektedir. Örneğin; kredi kullanmadan yapılan yatırımda enerjinin birim maliyeti 0,025 €/kWh, kredi faizi %5 olarak yapılan yatırımda ise enerjinin birim maliyeti ise 0,056 €/kWh'dir. Faiz oranı hesaplamalarda %0, %5 ve %9 alınarak farklı türbin tipleri için hesaplanan birim maliyet değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Faiz oranlarına göre enerji birim maliyet değerleri

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi yatırımın kredi kullanarak yapılması durumunda faiz yükü sistemin maliyetini artırmakta ve yatırımın geri ödeme süresini uzatmaktadır. Bu nedenle faiz oranları düşürülerek veya faiz alınmadan teşviklerle yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi devlet tarafından desteklenebilir.

Üretilen elektriğin depolanması için hidrojen dışında etkin bir yöntem olmadığından hidrojen üretimi artırılarak tüplerde depolayarak veya boru hatları ile taşınarak hidrojen dolum istasyonlarında kullanılabilir.

Hidrojenin araçlarda kullanımına yönelik teşviklerle sadece hidrojen üretimine yönelik hidrojen üretim tesisi kurulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Çelik, M.**, 2011: Kayseri İli Pınarbaşı İlçesinde Enerji Üretim Amaçlı Rüzgar Hidrojen Hibrit Enerji Sisteminin İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110 s.
- [2] **Polat, C. ve Kılınc, N.**, 2007: Dünya'da ve Türkiye'de Yeni Bir Pazarın Doğuşu, Gelişimi ve Paylaşımı, "Hidrojen ve Hidrojen Teknolojisi Ürünleri Pazarı", Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi, ISSN: 1303-5134, Cilt: 4, Sayı: 2.
- [3] **Uçar, H.**, 2012: Rüzgar Enerjisi Destekli Hidrojen Üretim Sistemlerinin Tekno-Ekonomik Analizi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116 s.
- [4] Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü. (t.y.). Alındığı tarih: 01.04.2015, adres: http://www.emo.org.tr/ekler/ad00a3749a894b3_ek.pdf
- [5] **Erdoğan, E.**, 2009: On the wind energy in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 1361-1371.
- [6] **İlkiliç, C., Türkbay, İ.**, 2010: Determination and utilization of wind energy potential for Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14: 2202-2207.
- [7] **Eskin, N., Artar, H., Tolun, S.**, 2008: Wind energy potential of Gokceada Island in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12: 839-851.
- [8] **Akdağ, S.A., Dinler, A.**, 2009: A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, Energy conversion and management, 50: 1761-1766.
- [9] **Güler, Ö.**, 2009: Wind energy status in electrical energy production of Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 473-478.
- [10] **Ozerdem, B., Turkeli, M.**, 2003: An investigation of wind characteristics on the campus of Izmir Institute of Technology, Turkey, Renewable Energy, 28: 1013-1027.
- [11] **Ozerdem, B., Ozer, S., Tosun, M.**, 2006: Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94: 725-743.
- [12] **Ozgener, L.**, 2010: Investigation of wind energy potential of Muradiye in Manisa, Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14: 3232-3236.

- [13] **Mutlu, Ö.S., Akpınar, E., Balıkcı, A.**, 2009: Power quality analysis of wind farm connected to Alacati substation in Turkey, *Renewable Energy*, 34: 1312-1318.
- [14] **Onat, N., Ersoz, S.**, 2011: Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey, *Energy*, 36: 148-156.
- [15] **Gökçek, M., Bayülken, A., Bekdemir, Ş.**, 2007: Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. *Renewable Energy*, 32: 1739- 1752.
- [16] **Ucar, A., Balo, F.**, 2010: Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1901-1912.
- [17] **Fyrrippis, I., Axaopoulos, P.J., Panayiotou, G.**, 2010: Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece, *Applied Energy*, 87: 577-586.
- [18] **Jowder, F.A.L.**, 2009: Wind power analysis and site matching of wind turbine generators in Kingdom of Bahrain, *Applied Energy*, 86: 538-545.
- [19] **Ohunakin, S.O., Ojolo, S.J., Ogunsina, S.B., Dinrifo, R.R.**, 2012: "Analysis of cost estimation and wind energy evaluation using wind energy conversion systems (WECS) for electricity generation in six selected high altitude locations in Nigeria", *Energy Policy*, 48: 594-600.
- [20] **Lu, L., Yang, H., Burnet, J.**, 2002: Investigation on wind power potential on Hong Kong islands—an analysis of wind power and wind turbine characteristics, *Renewable Energy*, 27: 1-12.
- [21] **Keyhani, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Khanali, M., Abbaszadeh R.**, 2010: "An assessment of wind energy potential as a power generation source in the capital of Iran, Tehran", *Energy*, 35: 188-201.
- [22] **Gökçek, M.**, 2010: Hydrogen generation from small-scale wind-powered electrolysis system in different power matching modes" *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 10050-10059.
- [23] **Greiner, C.J., Korpås, M., Holen, A.T.**, 2007: A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1500-1507.
- [24] **Shakya, B.D., Aye, L., Musgrave, P.**, 2005: Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind-photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30: 9-20.
- [25] **Khan, M.J., Iqbal, M.T.**, 2009: Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system, *Applied Energy*, 86: 2429-2442.
- [26] **Hamane, L.A., Belhamel, M., Benyoucef, B., Hamane, M.**, 2009: Feasibility study of hydrogen production from wind power in the region of Ghardaia, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 4947-4952.

- [27] **Korpas, M., Greiner C.J.**, 2008: Opportunities for hydrogen production in connection with wind power in weak grids, *Renewable Energy*, 33: 1199-1208.
- [28] **Aguado, M., Ayerbe, E., Azca'rate, C., Blanco, R., Garde, R., Mallor, F. Rivas, D.M.**, 2009: Economical assessment of a wind-hydrogen energy system using WindHyGen software, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 2845-2854.
- [29] **Bernal-Agustin, J.L., Dufo-Lo'pez, R.**, 2008: Hourly energy management for grid-connected wind-hydrogen systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 6401-6413.
- [30] **Ulleberg, O., Nakken, T., Ete, A.**, 2010: The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 1841- 1852.
- [31] **Lee, J.Y., An, S., Cha, K., Hur, T.**, 2010: Life cycle environmental and economic analyses of a hydrogen station with wind energy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 2213-2225.
- [32] **Garcia, R.S., Weisserb, D.**, 2006: A wind-diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch, *Renewable Energy* 31, 2296-2320.
- [33] **Shapiro, D., Duffy, J., Kimble, M., Pien, M.**, 2005: Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system, *Solar Energy*, 79: 544-550.
- [34] **Samaniego, J., Alija, F., Sanz, S., Valmaseda, C., Frechoso, F.**, 2008: Economic and technical analysis of a hybrid wind fuel cell energy system, *Renewable Energy*, 33: 839-845.
- [35] **Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C.**, 2006: Unit sizing and cost analysis of standalone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems, *Renewable Energy*, 31: 1641-1656.
- [36] **Koç, M.Ü.**, 2012: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye'de Yaz ve Kış Klimasında Uygulama Alanlarının Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107 s.
- [37] **Ataseven, M.S., Ataseven, S.**, Rüzgar Ölçüm Sistemleri, (t.y.). Alındığı tarih: 01.04.2015, adres: http://www.emo.org.tr/ekler/457ed884716a0c9_ek.pdf
- [38] **Thies Clima**, (t.y.). Alındığı tarih: 17.02.2015, adres: <http://www.thiesclima.com/wind.html>

- [39] **Celik, A. N.**, 2003: A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey, *Renewable Energy*, 29: 593-604.
- [40] **Nurbay, N., Çınar, A.**, 2006: Genetik Algoritma İle Rüzgar Türbini Kanat Sayısı Seçimi, VI. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 25-27 Mayıs, Isparta, Sf.756-764.
- [41] **Nurbay, N., Çınar, A.**, (t.y.). Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması, Alındığı tarih: 01.04.2015, adres: http://www.emo.org.tr/ekler/4986d86a17424ee_ek.pdf
- [42] **Vardar, A.**, (t.y.). Rüzgar Enerjisi ve Teknolojisi Sunumu, Uludağ Üniversitesi, Alındığı tarih: 01.04.2015, adres: <http://www.alivardar.com/SEMINERLER/RuzgarEnerjisi.ppt>
- [43] Yenilenebilir Enerji Teknolojileri, 2012: Rüzgar Türbinlerinde Üretilen Alternatif Akımın Temelleri, Milli Eğitim Bakanlığı, 522EE0399.
- [44] **Tanrıöven, M.**, 2011: Yenilenebilir Enerji Sistemleri Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Alındığı tarih: 01.04.2015, adres: <http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/tanriov-Dersler-979-materials>
- [45] **Korukçu, M.Ö.**, 2011: Türkiye’de Dört Yerleşim Yeri İçin Rüzgar Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 16, Sayı 1.
- [46] **Çalışkan, M.**, (t.y.). Türkiye Rüzgar Enerji Potansiyeli, Alındığı tarih: 25.04.2015, adres: http://www.mgm.gov.tr/FILES/haberler/2010/rets-seminer/2_Mustafa_CALISKAN_RITM.pdf
- [47] **Maraş, D.**, 2005: Hidrojenin Elektroliz ve Gazifikasyon Yöntemiyle Üretiminin İncelenmesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilim Uzmanlığı Tezi, 119 s.
- [48] **Şenaktaş, B.**, 2005: Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 178 s.
- [49] **Çetinkaya, M., Karaosmanoğlu, F.**, Yakıt Pilleri, Tesisat Mühendisliği, Mayıs-Haziran 2003.
- [50] **Beşergil, B.**, (t.y.). Hidrojen Ders Notları, Celal Bayar Üniversitesi, Alındığı tarih: 16.02.2015, adres: <http://www.bayar.edu.tr/besergil/hidrojen.pdf>
- [51] **Çamcı, Ş.**, 2007: Konutlar İçin, Yakıt Hücreleri ve Güneş Pilleri Kullanan, Şebekeden Bağımsız Bir Güç Sisteminin Tasarımı ve Modellenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121 s.
- [52] **Yıldızbilir, F.**, 2006: Yakıt Pili ile Elektrik Enerjisi Üretimi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 57 s.

- [53] **Sherif, S.A., Barbir F., Veziroglu, T.N.**, 2005: Wind energy and the hydrogen economy review of the technology, *Solar Energy*,78: 647-660.
- [54] Yalova İli Rüzgar Kaynak Bilgileri, (t.y.). Alındığı tarih: 20.03.2015, adres: <http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/YALOVA-REPA.pdf>
- [55] **Malkoç, Y.**, (t.y.). Rüzgar Enerjisi Kaynaklarımız, Alındığı tarih: 25.03.2015, adres: http://www.emo.org.tr/ekler/5237d34f69ddac7_ek.pdf
- [56] Enercon, 2010: Enercon Wind Energy Converters, Product Overview, Alındığı tarih: 10.04.2015, adres: http://www.enercon.de/p/downloads/-EN_Productoverview_0710.pdf
- [57] Rüzgardan Elektrik Enerjisi Üreten Rüzgar Türbinlerinin Maliyeti, (t.y.). Alındığı tarih: 21.03.2015, adres: http://www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/ruzgar/ruzgar_turbin.html
- [58] **Toprak, K.**, 2006: Rüzgar Enerji Santralleri Yardımıyla Hidrojen Eldesinin Ekonomik Analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 82 s.
- [59] Kalkınma Dergisi, 2010: Türkiye Kalkınma Bankası Yayını, Ekim-Aralık Sayı: 58. Alındığı tarih: 26.03.2015, adres: http://www.kalkinma.com.tr/data/file/kalkinma_dergisi/58_dergi.pdf
- [60] Wind Energy The Facts, 2004: An Analysis of Wind Energy in the EU-25 Alındığı tarih: 27.02.2015, adres: http://www2.ewea.org/documents/Facts_Summary.pdf
- [61] **Dalton, G.J., Lockington, D.A., Baldock, T.E.**, 2008: Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel, *Renewable Energy* 33, 1475-1490.
- [62] **Girgin, H.**, Hidrojen Üretici Olarak Rüzgar, Anel Grup, Alındığı tarih: 20.02.2015, adres: http://www.emo.org.tr/ekler/633bd5be2a2a9c2_ek.pdf
- [63] **Kroniger, D., Madlener, R.**, 2013: Hydrogen Storage for Wind Parks: A real Options Evaluation for an Optimal Investment in More Flexibility.
- [64] **Levene, J. I., Kropski, B., Sverdrup, G.**, 2006: Wind energy production of hydrogen and electricity-opportunities for renewable hydrogen, NREL/CP-560-39534, POWER-GEN Renewable Energy and Fuels Technical Conference, Las Vegas, Nevada, April 10-12.
- [65] **Zoulias E.I., Lymberopoulos, N.**, 2007: Techno-economic analysis of integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems, *Renewable Energy* 32, 680-696.
- [66] **Amos, W. A.**, 1998: Costs of Storing and Transporting Hydrogen, NREL/TP-570-25106.

- [67] FuelCellStore, 2015: PEM Tipi Yakıt Pili Fiyatları, Alındığı tarih: 08.05.2015, adres: <http://www.fuelcellstore.com>
- [68] YEK, 2010: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, <http://www.eie.gov.tr>

EKLER

EK A : Armutlu ilçesinin aylık enerji tüketim bilgileri

EK B : Armutlu İlçesi Rüzgar Hız Dağılımı ve Kapasite Faktörü Dağılımı

EK C : Bereket Enerji ölçüm sonuçları

EK D : Türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızları

EK E1 : Enercon E-33 katalog bilgileri

EK E2 : Enercon E-53 katalog bilgileri

EK E3 : Enercon E-82 katalog bilgileri

EK E4 : Enercon E-101 katalog bilgileri

EK E5 : Enercon E-126 katalog bilgileri

EK F1 : Enercon Türbinlerine ait parametreler ve hesaplanan güç değerleri

EK F2 : Rüzgar hızlarına göre türbinlerin üreteceği güç miktarları

EK G1 : Türbin-1 (E-33) için program görüntüleri

EK G2 : Türbin-2 (E-53) için program görüntüleri

EK G3 : Türbin-3 (E-82) için program görüntüleri

EK G4 : Türbin-4 (E-101) için program görüntüleri

EK G5 : Türbin-5 (E-126) için program görüntüleri

EK H : Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası kurları

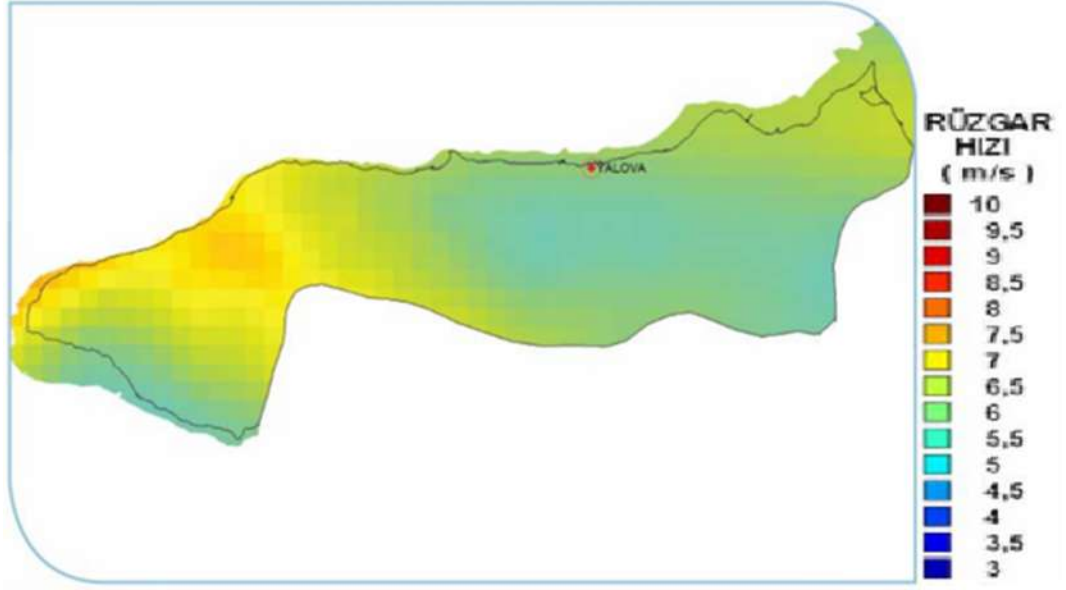
EK A Armutlu ilçesi enerji tüketim miktarları

YALOVA İLİ ARMUTLU İLÇESİ 2011 YILI AYLIK ENERJİ TÜKETİM MİKTARLARI (MWh)						
Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Yıllık Toplam
1425	1370	1291	1256	1429	1839	
Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	18605
1920	1811	2257	1246	1521	1240	

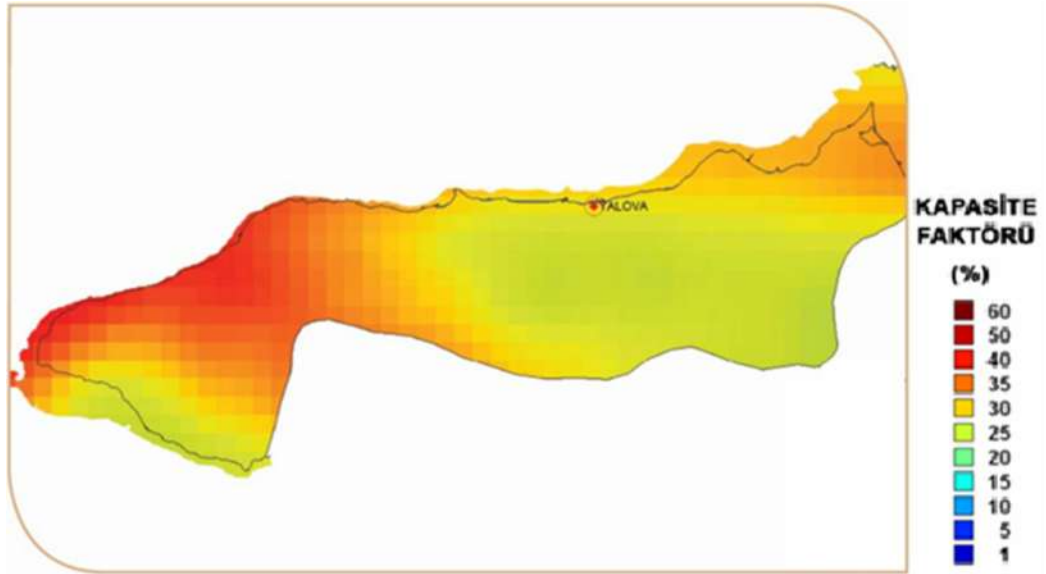
Volkan ÇELİK
UEDAŞ Yalova İşletme Müdürü

Şekil A.1. Armutlu ilçesi 2011 yılı enerji tüketim miktarları

EK B Armutlu İlçesi Rüzgar Hız Dağılımı ve Kapasite Faktörü Dağılımı



Şekil B.1. Armutlu İlçesi Rüzgar Hız Dağılımı - 50 m.



Şekil B.2. Armutlu İlçesi Kapasite Faktörü Dağılımı - 50 m.

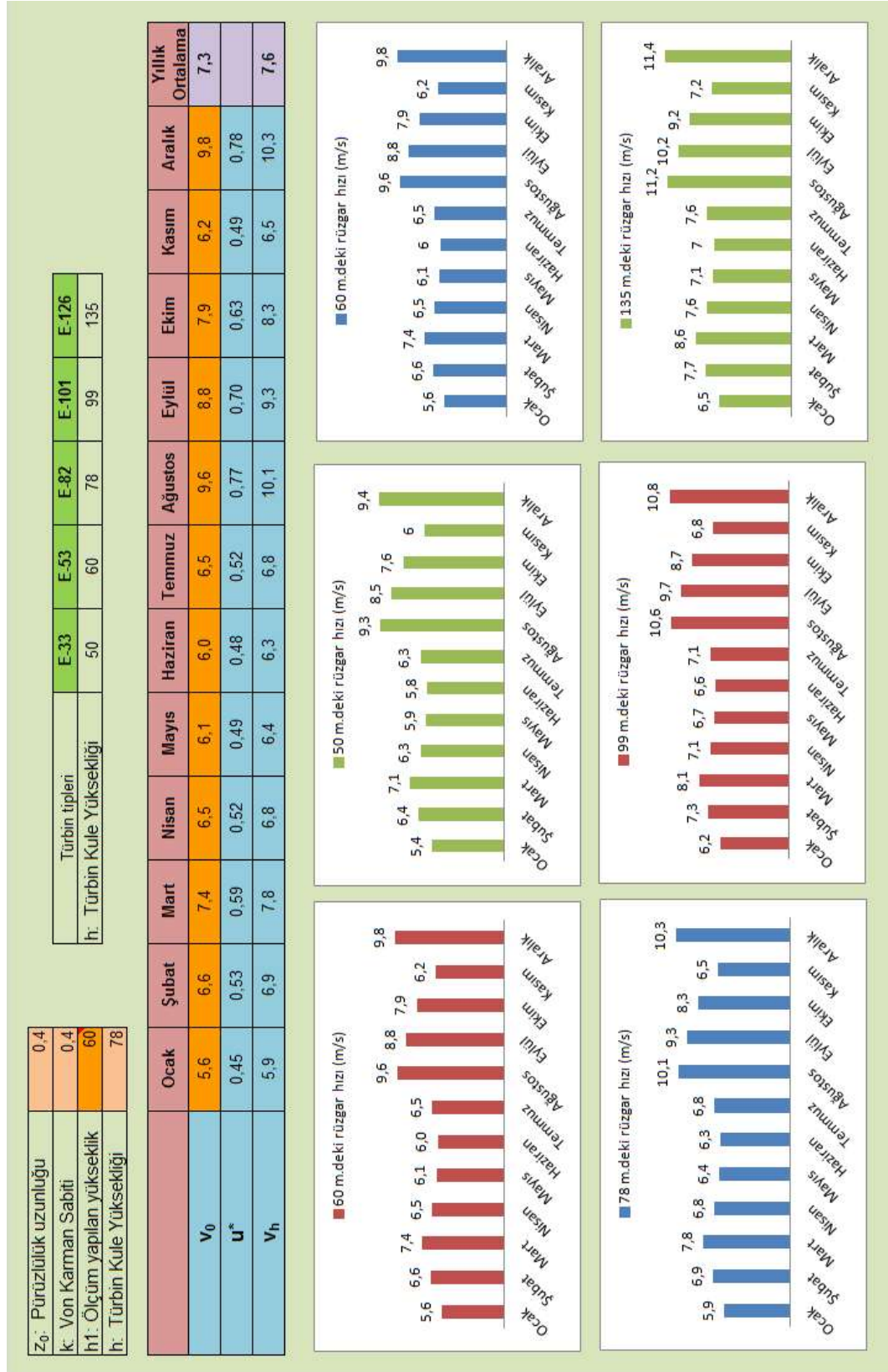
EK C Bereket Enerji ölçüm sonuçları

Table 3- Wind data statistics, Y2

SENSOR:	S1						S2						S3					
Height:	60 m						40 m						20 m					
Measured Period	Cover (%)	SPD (m/s)	Max Gust (%)	T15 (%)	CF2 (%)		Cover (%)	SPD (m/s)	Max Gust (%)	T15 (%)	CF2 (%)		Cover (%)	SPD (m/s)	Max Gust (%)	T15 (%)	CF2 (%)	
03.07.2010 15:00 03.07.2010 17:00	66.4	7.6	27.7	34.3	13.9	41.3	57.4	7.2	27.4	35.6	14.3	37.5	61.0	6.7	29.1	36.7	14.2	33.4
Jul-2010	91.96	6.5	17.9	21.2	10.9	32.9	91.96	6.2	17.7	21.1	13.5	28.8	91.96	5.4	16.4	20.5	17.2	22.4
Aug-2010	100.00	7.5	20.5	23.4	11.2	42.8	100.00	7.2	19.1	23.0	13.4	39.2	100.00	6.4	17.0	22.4	14.2	33.0
Sep-2010	100.00	7.9	24.8	27.7	14.0	43.8	100.00	7.5	24.0	28.5	14.9	39.9	100.00	6.8	21.9	26.0	14.9	34.8
Oct-2010	100.00	8.0	26.9	34.0	15.1	46.1	100.00	7.7	27.4	35.6	16.4	43.2	100.00	7.1	27.6	36.7	14.7	38.1
Nov-2010	99.99	9.1	26.7	34.3	12.0	47.4	99.99	9.1	26.8	34.4	11.4	46.5	99.99	9.2	27.0	35.7	10.6	46.1
Dec-2010	56.05	11.5	22.8	29.0	11.1	70.5	53.23	11.4	22.9	29.3	11.0	67.8	67.60	11.2	23.6	30.8	10.7	65.7
Jan-2011	87.69	5.6	22.2	28.6	17.6	27.0	86.72	5.3	22.1	28.3	19.1	23.8	84.61	5.1	22.7	31.6	18.5	22.6
Feb-2011	80.95	6.6	19.7	25.5	16.4	36.4	83.13	6.5	19.7	26.1	16.7	34.2	85.86	6.0	20.4	26.9	13.3	29.6
Mar-2011	23.70	7.4	21.3	30.4	11.7	41.7	18.19	8.0	21.4	27.9	11.1	45.3	1.03	8.2	10.0	12.9	-	50.4
Apr-2011	99.63	6.5	27.7	32.0	14.3	31.7	97.62	6.3	27.4	32.2	13.0	28.6	68.47	6.0	27.6	34.2	13.9	27.3
May-2011	100.00	6.1	19.3	21.4	13.9	29.2	100.00	5.9	17.5	21.5	14.2	26.4	100.00	5.3	16.7	21.2	13.9	21.8
Jun-2011	100.00	8.0	19.3	21.6	12.2	28.3	100.00	5.8	19.1	20.9	12.9	25.3	100.00	5.2	16.7	20.2	12.7	29.9
Jul-2011	98.36	6.5	19.6	23.2	11.7	33.7	98.36	6.2	18.4	22.5	13.8	30.0	98.36	5.5	16.9	22.1	13.4	24.4
Aug-2011	99.98	9.6	22.1	26.3	13.3	60.1	99.98	8.9	20.7	25.6	14.1	53.4	99.98	7.7	18.7	24.9	14.4	42.4
Sep-2011	100.00	8.8	21.1	23.7	13.2	53.0	97.25	8.1	20.2	23.4	14.6	47.1	100.00	7.1	18.1	23.0	14.2	35.7
Oct-2011	98.99	7.9	23.5	26.5	13.0	45.3	98.96	8.1	23.7	28.0	12.1	48.2	98.99	6.9	23.5	28.2	12.5	35.8
Nov-2011	82.82	6.2	20.8	27.6	20.2	32.2	35.56	5.0	18.9	27.5	23.0	20.9	85.23	5.3	17.1	26.0	19.9	22.7
Dec-2011	19.83	9.8	21.6	25.6	11.8	53.9	14.22	6.8	17.7	23.2	10.4	35.8	52.80	10.4	29.1	34.9	10.0	60.0
Jan-2012	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
Feb-2012	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
Mar-2012	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
Apr-2012	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
May-2012	14.20	4.7	15.8	21.8	11.0	18.9	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
Jun-2012	100.00	8.6	25.9	28.8	15.0	47.1	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-
Jul-2012	8.76	10.4	18.6	24.9	17.0	72.7	0.00	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-	-	-

Şekil C.1. Bereket Enerji ölçüm sonuçları (60 m.)

EK D Türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızları



Şekil D.1. Türbin kule yüksekliğindeki rüzgar hızları

EK E1 Enercon E-33 Türbin Bilgileri

Technical specifications E-33

Rated power: 330 kW
Rotor diameter: 33.4 m
Hub height: 37 m / 44 m / 49 m / 50 m
Wind zone (DIB): WZ III
Wind class (EC): IEC/IVN IA and IEC/IVN IIA

Drive train with generator:
 Hub: Rigid
 Main bearing: Tapered roller bearing pair
 Generator: ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed: ENERCON inverter
Brake systems: - 3 independent pitch control systems with emergency power supply
 - Rotor brake
 - Rotor lock
Yaw system: Active via yaw gear, load-dependent damping
Cut-out wind speed: 28-34 m/s (with ENERCON storm control*)
Remote monitoring: ENERCON SCADA

WEC concept: Gearless, variable speed
 Single blade adjustment

Rotor
Type: Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction: Clockwise
No. of blades: 3
Swept area: 876 m²
Blade material: GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed: Variable, 18-45 rpm
Pitch control: ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with a local emergency supply

- 1 Main carrier
- 2 Yaw drive
- 3 Annular generator
- 4 Blade adapter
- 5 Rotor hub
- 6 Rotor blade

Calculated power curve

Wind [m/s]	Power P [kW]	Power coefficient Cp [-]
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	5.0	0.35
4	13.7	0.40
5	30.0	0.45
6	55.0	0.47
7	92.0	0.50
8	138.0	0.50
9	196.0	0.50
10	250.0	0.47
11	292.8	0.41
12	320.0	0.35
13	335.0	0.28
14	335.0	0.23
15	335.0	0.18
16	335.0	0.15
17	335.0	0.13
18	335.0	0.11
19	335.0	0.09
20	335.0	0.08
21	335.0	0.07
22	335.0	0.06
23	335.0	0.05
24	335.0	0.05
25	335.0	0.04

ρ = 1.225 kg/m³

For more information on the ENERCON power curve, please see the last page.

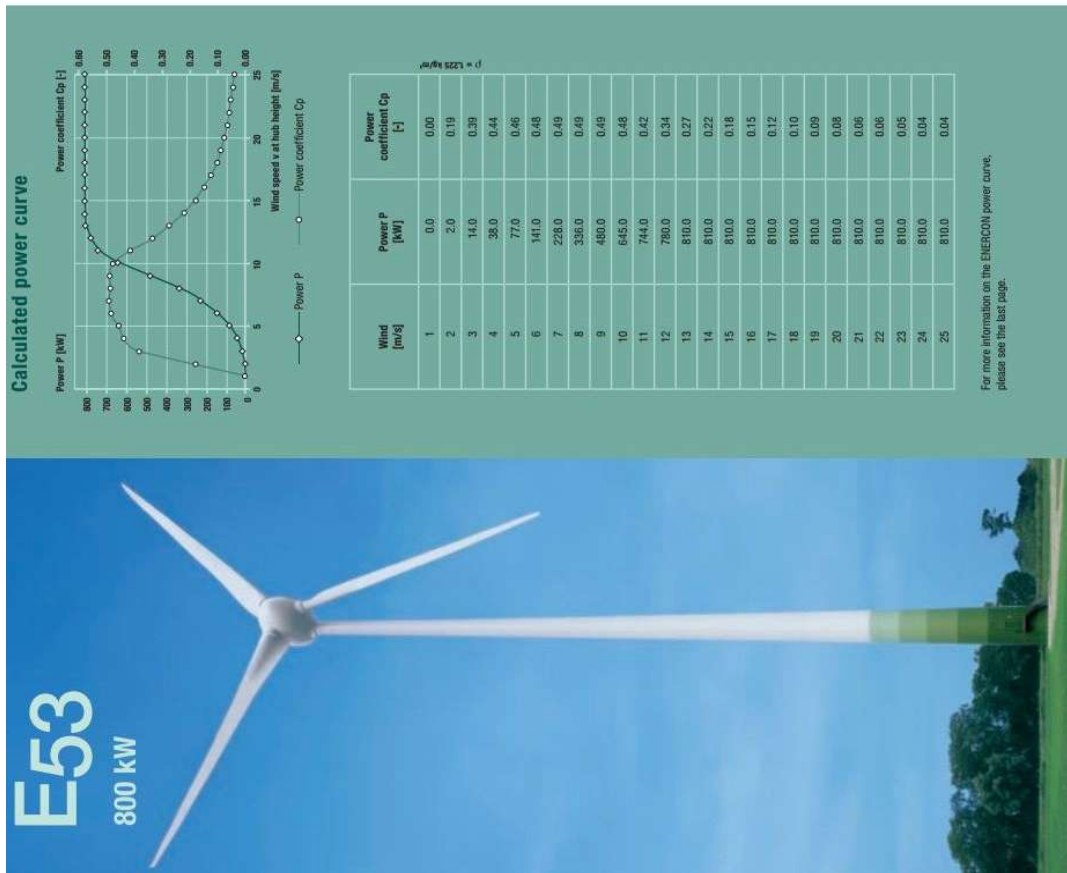
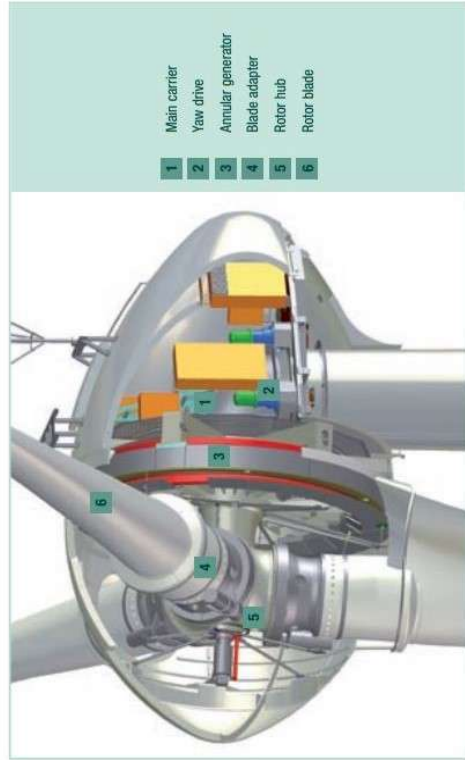
Şekil E.1. Enercon E-33 Türbin Bilgileri

EK E2 Enercon E-53 Türbin Bilgileri

Technical specifications E-53

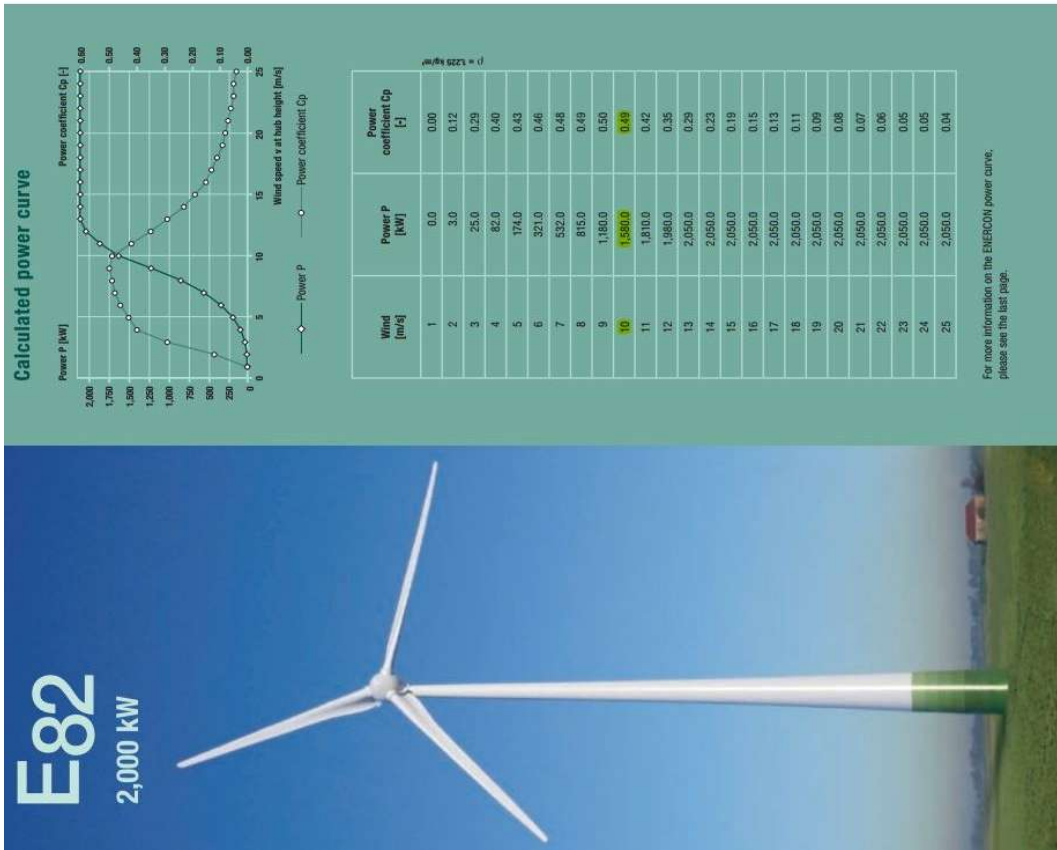
Rated power:	800 kW	Drive train with generator	Rigid
Rotor diameter:	52.9 m	Hub:	Tapered roller bearing pair
Hub height:	60 m / 73 m / 75 m	Main bearing:	ENERCON direct-drive annular generator
Wind zone (DfB):	WZ II exp	Generator:	ENERCON Inverter
Wind class (IEC):	IEC/EN Class S	Grid feed:	- 3 independent pitch control systems with emergency power supply
	($v_{w,0} = 7.5$ m/s, $v_{w,1} = 57$ m/s)	Brake systems:	- Rotor brake - Rotor lock
WEC concept:	Gearless, variable speed Single blade adjustment	Yaw system:	Active via yaw gear, load-dependent damping
Rotor	Upwind rotor with active pitch control	Cut-out wind speed:	28-34 m/s (with ENERCON storm control*)
Type:	Dockwise	Remote monitoring:	ENERCON SCADA
Rotational direction:	3		
No. of blades:	2, 198 m ²		
Swept area:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection		
Blade material:	Variable, 12-28.3 rpm		
Rotational speed:	ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply		
Pitch control:			

*For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.



Şekil E.2. Enercon E-53 Türbin Bilgileri

EK E3 Enercon E-82 Türbin Bilgileri



Şekil E.3. Enercon E-82 Türbin Bilgileri

EK E4 Enercon E-101 Türbin Bilgileri

Technical specifications E-101

Rated power:	3,000 kW
Rotor diameter:	101 m
Hub height:	99 m / 135 m
Wind zone (DBI):	WZ III
Wind class (EC):	IECON/IIA

WEC concept: Gearless, variable speed
Single blade adjustment

Rotor

Type: Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction: Clockwise
No. of blades: 3
Swept area: 8,012 m²
Blade material: GRP (epoxy resin);
Built-in lightning protection
Rotational speed: Variable, 4–14.5 rpm
Pitch control: ENERCON single blade pitch system; one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

Drive train with generator

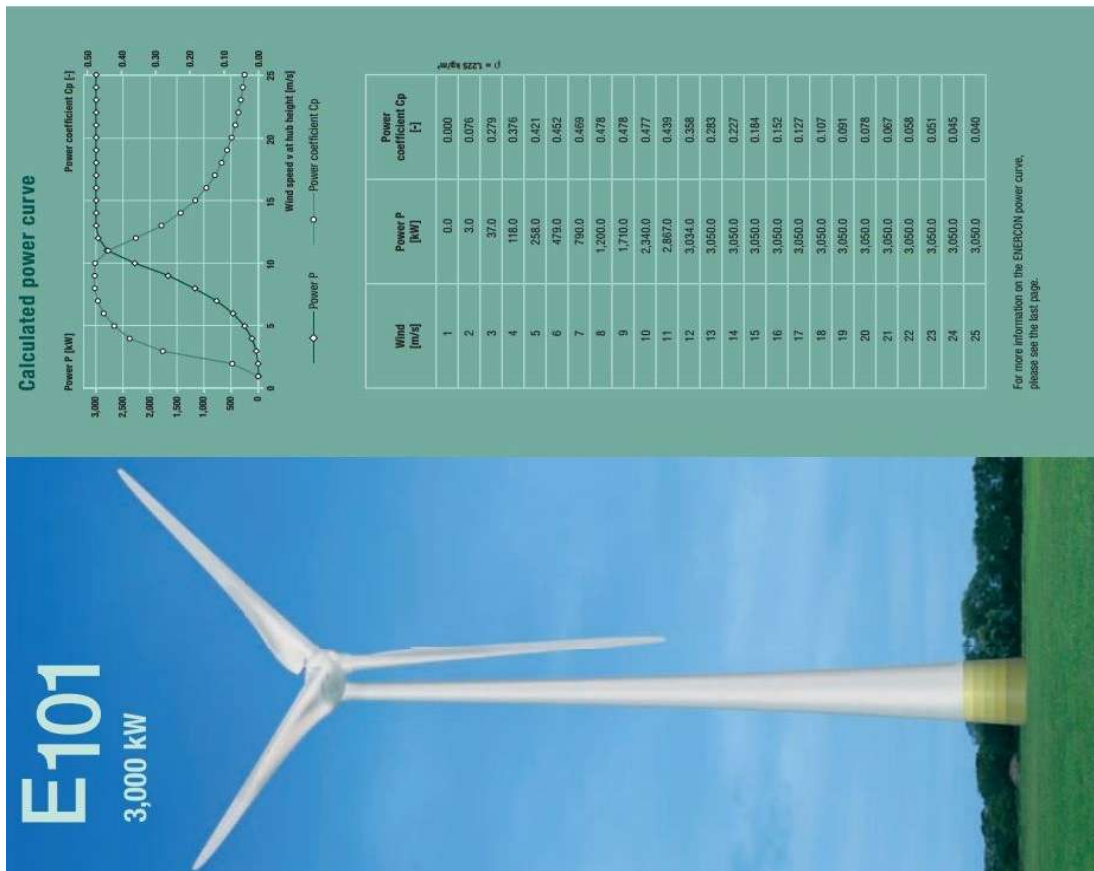
Hub: Rigid
Main bearing: Double-row tapered/cylindrical roller bearings
Generator: ENERCON direct-drive annular generator
Grid feed: ENERCON inverter
Brake systems: - 3 independent pitch control systems with emergency power supply
- Rotor brake
- Rotor lock, latching (15°)
- Active via yaw gear, load-dependent damping
28–34 m/s
(with ENERCON storm control)
ENERCON SCAIDA

Yaw system: ENERCON SCAIDA

Cut-out wind speed: 28–34 m/s
(with ENERCON storm control)

Remote monitoring: ENERCON SCAIDA

*For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.



Şekil E.4. Enercon E-101 Türbin Bilgileri

EK E5 Enercon E-126 Türbin Bilgileri

Technical specifications E-126

Rated power: 7.500 kW
 Rotor diameter: 127 m
 Hub height: 135 m
 Wind zone (DIR): WZ III
 Wind class (EC): IEC/NW/IA

Drive train with generator
 Hub: Rigid
 Main bearing: Single-row tapered roller bearing
 Generator: ENERCON direct-drive annular generator
 ENERCON inverter
 → 3 independent pitch control systems with emergency power supply
 → Rotor brake

Grid feed: ENERCON inverter
Brake systems: → 3 independent pitch control systems with emergency power supply
 → Rotor brake

Yaw system: Active via yaw gear, load-dependent damping
 28–34 m/s
 (with ENERCON storm control*)
 ENERCON SCADA

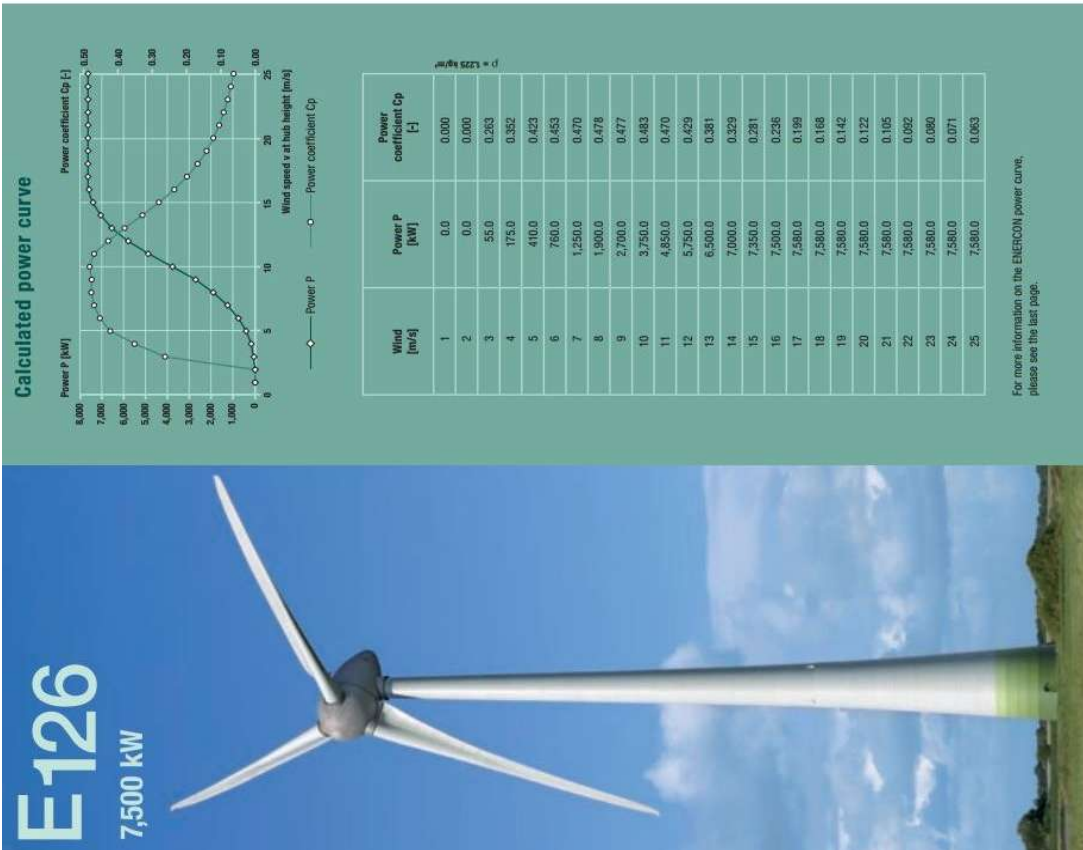
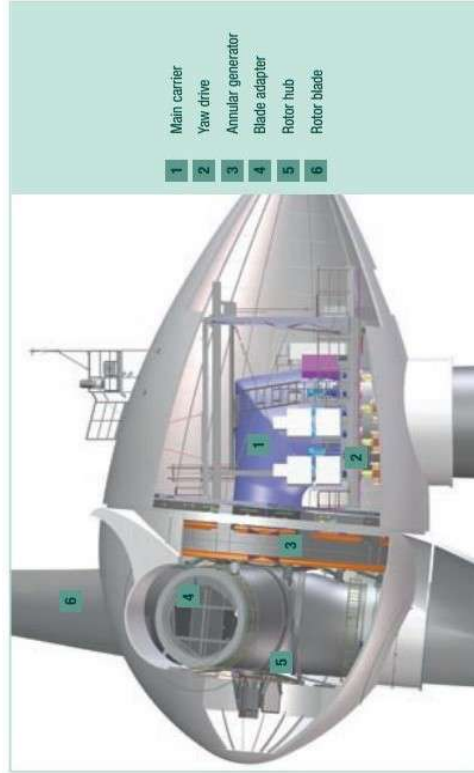
Remote monitoring: ENERCON SCADA

WEC concept: Gearless, variable speed
 Single blade adjustment

Rotor
 Type: Upwind rotor with active pitch control
 Rotational direction: Clockwise
 No. of blades: 3
 Swept area: 12.688 m²
 Blade material: GRP (epoxy resin)/GRP, GRP (epoxy resin)/steel
 Built-in lightning protection
 Variable: 5–11.7 rpm
 ENERCON single blade pitch system:
 one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

Rotational speed: Variable, 5–11.7 rpm
Pitch control: ENERCON single blade pitch system:
 one independent pitch system per rotor blade with allocated emergency supply

*For more information on the ENERCON storm control feature, please see the last page.



Şekil E.5. Enercon E-126 Türbin Bilgileri

EK F1 Enercon Türbinlerine ait parametreler

Enercon E-33		Enercon E-53		Enercon E-82		Enercon E-101		Enercon E-126		Sinovel SL1500/82	
Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri	Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri	Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri	Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri	Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri	Türbin Tipi	Rüzgar Hızına Göre Türbin Güçleri
Nominal Güç kW	800 kW	Nominal Güç kW	2000 kW	Nominal Güç kW	3000 kW	Nominal Güç kW	7500 kW	Nominal Güç kW	1500 kW	Rotor Çapı	D
Rotor Çapı	33,4	D	82	D	101	D	127	D	82,9	Kule	h
Kule Yüksekliği	50	h	78	h	99	h	135	h	70	Yüksekliği	h
Süpürme Alanı	876	A	5281	A	8012	A	12668	A	5398	Süpürme Alanı	A
Kapasite Faktörü-2	0,31	Kapasite Faktörü-2	0,36	Kapasite Faktörü-2	0,40	Kapasite Faktörü-2	0,27	Kapasite Faktörü-2	0,43	Rüzgar Hızı (m/s)	Rüzgar Hızı (m/s)
Güç Katsayısı (Cp)		Güç Katsayısı (Cp)		Güç Katsayısı (Cp)		Güç Katsayısı (Cp)		Güç Katsayısı (Cp)		Güç Katsayısı (Cp)	Güç Katsayısı (Cp)
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0,00	2	0,12	2	0,076	2	0	2	0,000	2	0
3	0,35	3	0,29	3	0,279	3	0,263	3	0,000	3	0
4	0,40	4	0,40	4	0,376	4	0,352	4	0,000	4	73,4
5	0,45	5	0,43	5	0,421	5	0,423	5	0,391	5	161,5
6	0,47	6	0,46	6	0,452	6	0,453	6	0,421	6	300,9
7	0,50	7	0,48	7	0,469	7	0,470	7	0,430	7	488,1
8	0,50	8	0,49	8	0,49	8	0,478	8	0,440	8	745,0
9	0,50	9	0,49	9	0,49	9	0,478	9	0,443	9	1067,9
10	0,47	10	0,48	10	0,49	10	0,477	10	0,421	10	1390,8
11	0,41	11	0,42	11	0,42	11	0,439	11	0,341	11	1500
12	0,35	12	0,34	12	0,35	12	0,358	12	0,263	12	1500
13	0,28	13	0,27	13	0,29	13	0,283	13	0,207	13	1500
14	0,23	14	0,22	14	0,23	14	0,227	14	0,165	14	1500
15	0,18	15	0,18	15	0,19	15	0,184	15	0,134	15	1500
16	0,15	16	0,15	16	0,15	16	0,152	16	0,111	16	1500
17	0,13	17	0,12	17	0,13	17	0,127	17	0,092	17	1500
18	0,11	18	0,10	18	0,11	18	0,107	18	0,078	18	1500
19	0,09	19	0,09	19	0,09	19	0,091	19	0,066	19	1500
20	0,08	20	0,08	20	0,08	20	0,078	20	0,057	20	1500
21	0,07	21	0,06	21	0,07	21	0,067	21	0,049	21	1500
22	0,06	22	0,06	22	0,06	22	0,058	22	0,043	22	1500
23	0,05	23	0,05	23	0,05	23	0,051	23	0,037	23	1500
24	0,05	24	0,04	24	0,05	24	0,045	24	0,033	24	1500
25	0,04	25	0,04	25	0,04	25	0,040	25	0,029	25	1500

Şekil F.1. Enercon türbinlerine ait parametreler ve hesaplanan güç değerleri

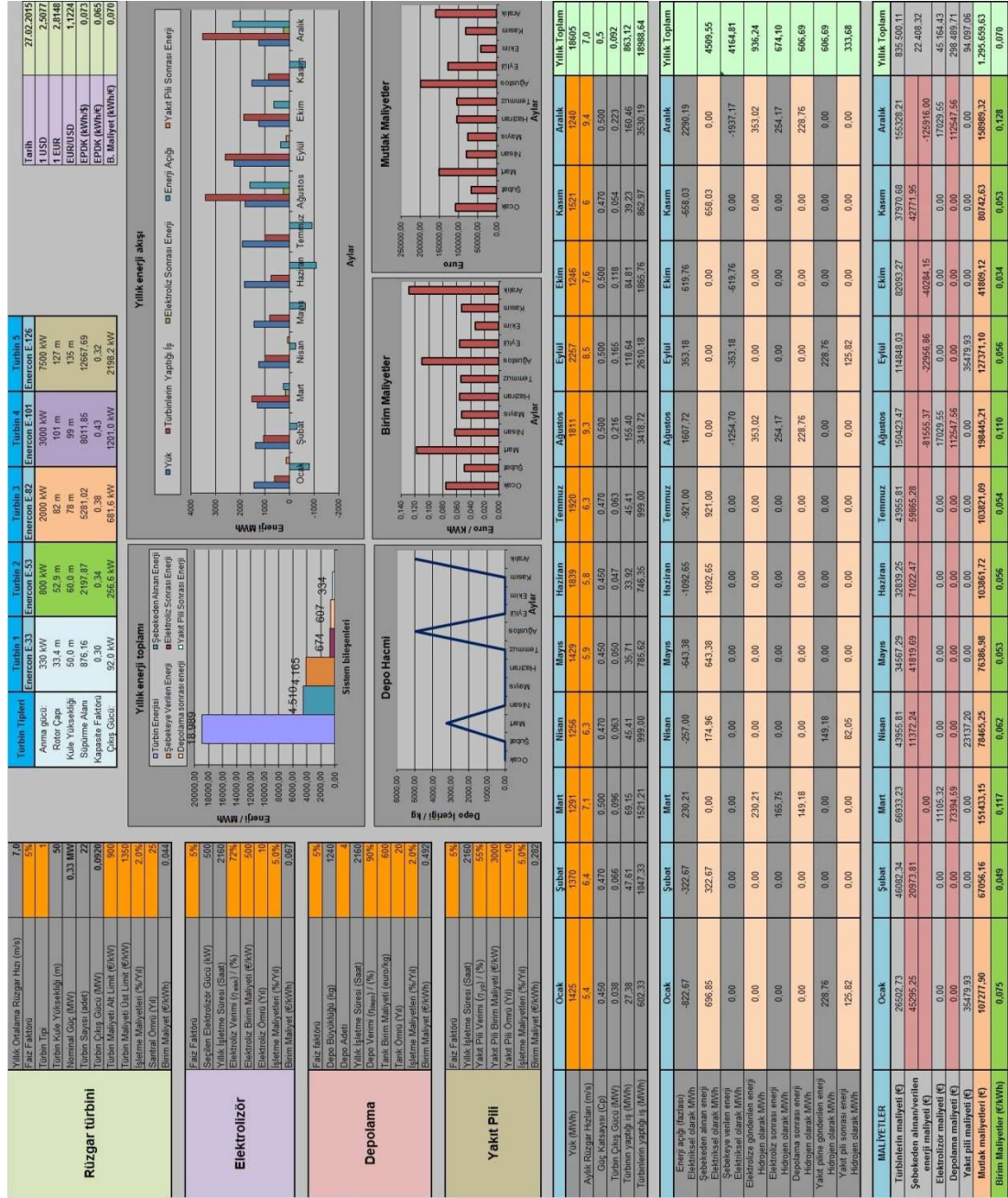
EK F2 Rüzgar hızlarına göre türbinlerin üreteceği güç miktarları

Aylar	Enercom E-33				Enercom E-53				Enercom E-82				Enercom E-101				Enercom E-126				Sinovel SL1500/82										
	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)	Türbin Tipi	Rüzgar Hızı (m/s)	Güç kW	Güç Katsayısı (Cp)			
Ocak	22	5,4	38,0	0,45	3	5,9	285,7	0,45	2	6,2	528,6	0,45	1	6,5	965,3	0,453	36	5,8	591,9	0,391	36	5,8	591,9	0,391	36	5,8	591,9	0,391			
Şubat		6,4	66,1	0,47		6,9	488,8	0,46		7,3	895,3	0,47		7,7	1664,8	0,47		8,6	2359,0	0,478		6,8	1027,1	0,421		6,8	1027,1	0,421	6,8	1027,1	0,421
Mart		7,1	96,0	0,5		7,4	267,3	0,49		8,1	1246,6	0,48		8,6	3600,8	0,48		9,6	5123,4	0,47		7,6	1464,6	0,430		7,6	1464,6	0,430	7,6	1464,6	0,430
Nisan		6,3	63,1	0,47		6,5	177,5	0,48		7,1	823,7	0,47		7,6	1600,8	0,47		8,6	3600,8	0,478		7,6	982,4	0,421		7,6	982,4	0,421	7,6	982,4	0,421
Mayıs		5,9	49,6	0,45		6,1	146,7	0,48		6,7	667,1	0,45		7,1	1305,2	0,47		8,6	3600,8	0,478		7,1	816,8	0,421		7,1	816,8	0,421	7,1	816,8	0,421
Haziran		5,8	47,1	0,45		6	139,6	0,48		6,6	637,7	0,45		6,6	637,7	0,45		7	1250,8	0,47		6,2	778,5	0,421		6,2	778,5	0,421	6,2	778,5	0,421
Temmuz		6,3	63,1	0,47		6,5	177,5	0,48		6,8	467,9	0,46		7,1	823,7	0,47		7,6	1600,8	0,47		6,7	816,8	0,421		6,7	816,8	0,421	6,7	816,8	0,421
Ağustos		9,3	215,8	0,5		9,6	583,6	0,49		10,1	1633,0	0,49		10,6	2787,9	0,48		11,2	5123,4	0,47		11,2	3351,1	0,443		11,2	3351,1	0,443	11,2	3351,1	0,443
Eylül		8,5	164,8	0,5		8,8	449,5	0,49		9,3	1300,9	0,5		9,7	2140,8	0,48		10,2	3977,0	0,483		10,2	2590,2	0,443		10,2	2590,2	0,443	10,2	2590,2	0,443
Ekim		7,6	117,8	0,5		7,9	325,2	0,49		8,3	906,3	0,49		8,7	1544,6	0,48		9,2	2881,9	0,477		9,2	1814,3	0,440		9,2	1814,3	0,440	9,2	1814,3	0,440
Kasım		6	54,5	0,47		6,2	154,0	0,48		6,5	408,6	0,46		6,8	697,4	0,45		7,2	1361,1	0,47		7,2	856,3	0,421		7,2	856,3	0,421	7,2	856,3	0,421
Aralık		9,4	222,9	0,5		9,8	620,8	0,49		10,3	1731,9	0,49		10,8	2948,7	0,48		11,4	5402,8	0,47		11,4	3365,5	0,421		11,4	3365,5	0,421	11,4	3365,5	0,421
Aralık	7,0	92,0	0,5	7,3	256,6	0,49	7,6	681,6	0,48	7,6	681,6	0,48	8,0	1201,0	0,48	8,4	2198,2	0,478	8,4	2198,2	0,478	8,4	2198,2	0,478							
Ocak	22	0,038	27,38		3	0,286	205,67		2	0,529	380,61		1	0,965	694,98		36	0,252	181,59		36	0,252	181,59		36	0,252	181,59				
Şubat		0,066	47,61			0,489	351,93			0,895	644,63			1,665	1198,69			1,665	1198,69			0,438	315,10			0,438	315,10		0,438	315,10	
Mart		0,096	69,15			0,737	530,49			1,247	897,54			2,359	1698,48			2,359	1698,48			0,624	449,31			0,624	449,31		0,624	449,31	
Nisan		0,063	45,41			0,468	336,85			0,824	595,09			1,001	1152,59			1,001	1152,59			0,419	301,40			0,419	301,40		0,419	301,40	
Mayıs		0,050	35,71			0,390	280,84			0,667	480,32			1,305	939,74			1,305	939,74			0,348	250,58			0,348	250,58		0,348	250,58	
Haziran		0,047	33,92			0,372	267,88			0,638	459,14			1,251	900,59			1,251	900,59			0,332	238,83			0,332	238,83		0,332	238,83	
Temmuz		0,063	45,41			0,468	336,85			0,824	595,09			1,001	1152,59			1,001	1152,59			0,419	301,40			0,419	301,40		0,419	301,40	
Ağustos		0,216	155,40			1,633	1175,75			2,788	2007,28			5,123	3688,82			5,123	3688,82			1,421	1023,17			1,421	1023,17		1,421	1023,17	
Eylül		0,165	118,64			1,301	936,65			2,141	1541,40			3,977	2865,41			3,977	2865,41			1,104	794,63			1,104	794,63		1,104	794,63	
Ekim		0,118	84,81			0,906	652,51			1,545	1112,13			2,882	2075,00			2,882	2075,00			0,773	556,80			0,773	556,80		0,773	556,80	
Kasım		0,054	39,23			0,409	294,21			0,697	502,15			1,361	980,01			1,361	980,01			0,365	262,70			0,365	262,70		0,365	262,70	
Aralık		0,223	160,46			1,732	1246,99			2,949	2123,05			5,403	3889,99			5,403	3889,99			1,434	1032,48			1,434	1032,48		1,434	1032,48	
Aralık	Türbinin yapacağı Is	863,12	Türbinin yapacağı Is	6,616,63	Türbinin yapacağı Is	11,334,44	Türbinin yapacağı Is	11,334,44	Türbinin yapacağı Is	21,234,89	Türbinin yapacağı Is	21,234,89	Türbinin yapacağı Is	21,234,89	Türbinin yapacağı Is	21,234,89	Türbinin yapacağı Is	5,707,80	Türbinin yapacağı Is	5,707,80	Türbinin yapacağı Is	5,707,80	Türbinin yapacağı Is	5,707,80	Türbinin yapacağı Is	5,707,80					
Aralık	Türbinlerin yapacağı Is	18,988,64	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	19,849,89	Türbinlerin yapacağı Is	205,480,80	Türbinlerin yapacağı Is	205,480,80	Türbinlerin yapacağı Is	205,480,80	Türbinlerin yapacağı Is	205,480,80	Türbinlerin yapacağı Is	205,480,80					

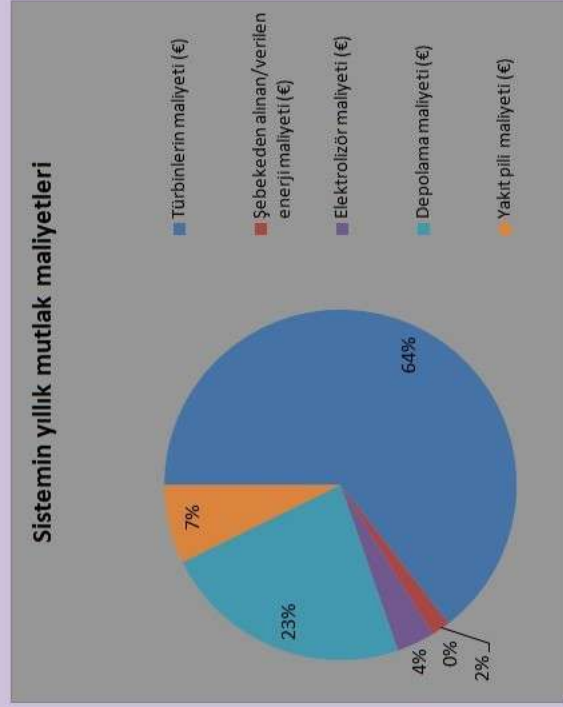
NOT: Yoğunluk (p) 1,225 alınmıştır.

Şekil F.2. Rüzgar hızlarına göre türbinlerin üreteceği güç miktarları

EK G1 Türbin-1 (E-33) için program görüntüleri



Şekil G1.1. Türbin-1 (E-33) için program görüntüsü-1



DEPOLAMA	Türbin-1
Depolama maliyeti (€)	2.976.000,00
Depolama sonrası enerji (kWh)	606.686,40
Fiyat (€/kg)	600,00
Ömür (Yıl)	20
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	2%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,0802
Depolama birim maliyeti (€/kWh)	0,492

YAKIT PİLİ	Türbin-1
Pil maliyeti (€)	525.000,00
Seçilen Yakıt Pili Gücü (kW)	175,00
Yakıt Pili Gücü (kW)	174,74
Yakıt piline gönderilen enerji (kWh)	125,82
Yakıt pili sonrası enerji (kWh)	333.677,52
Yakıt pili birim maliyeti (€/kW)	3000,00
Ömür (Yıl)	10,00
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Yakıt pili birim maliyet (€/kWh)	0,282

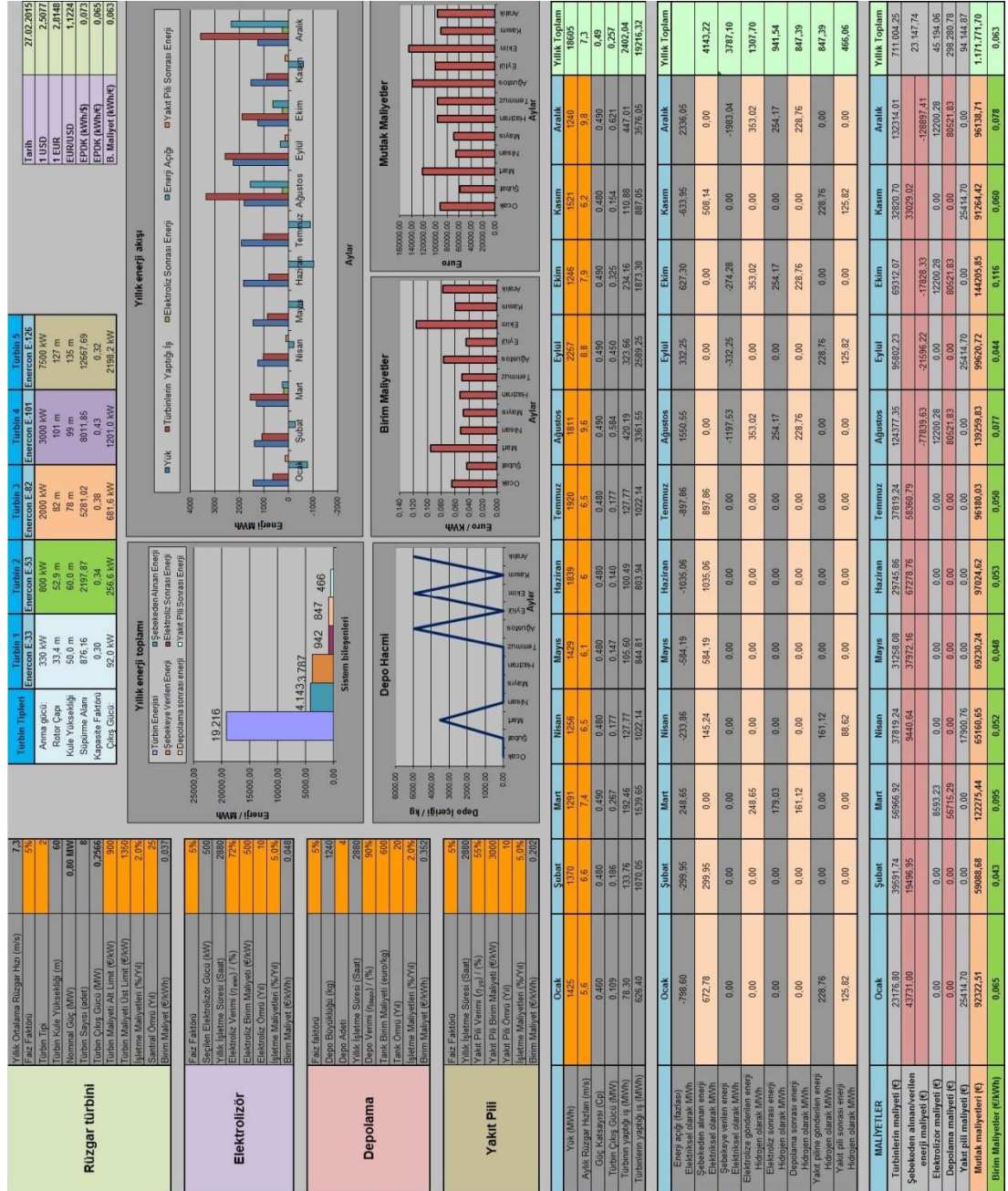
Hidrojenin üst ısı değeri (kWh/kg)	33,2
Elektroliz verimi	0,72
Depolama verimi	0,9
1 kg H ₂ üretmek için gereken enerji (kWh/kg)	46,12
Hidrojen tankı kapasitesi (kg)	4.960,00
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	333,02
1240 kg tank birim maliyeti (\$/kg)	680,00
1 kg Tank Maliyeti (€)	605,84

ELEKTROLİZÖR	Türbin-1
Seçilen Elektrolizör Gücü (kW)	500,00
Elektrolizör Gücü (kW)	490,30
Elektrolizör maliyeti (€)	250.000,00
Elektrolizöre gönderilen enerji (MWh/Ay)	333,02
Elektrolizör birim maliyeti (€/kW)	500,00
Ömür (Yıl)	10
Elektroliz sonrası enerji (kWh)	674.096,00
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Elektrolizör birim maliyeti (€/kWh)	0,067

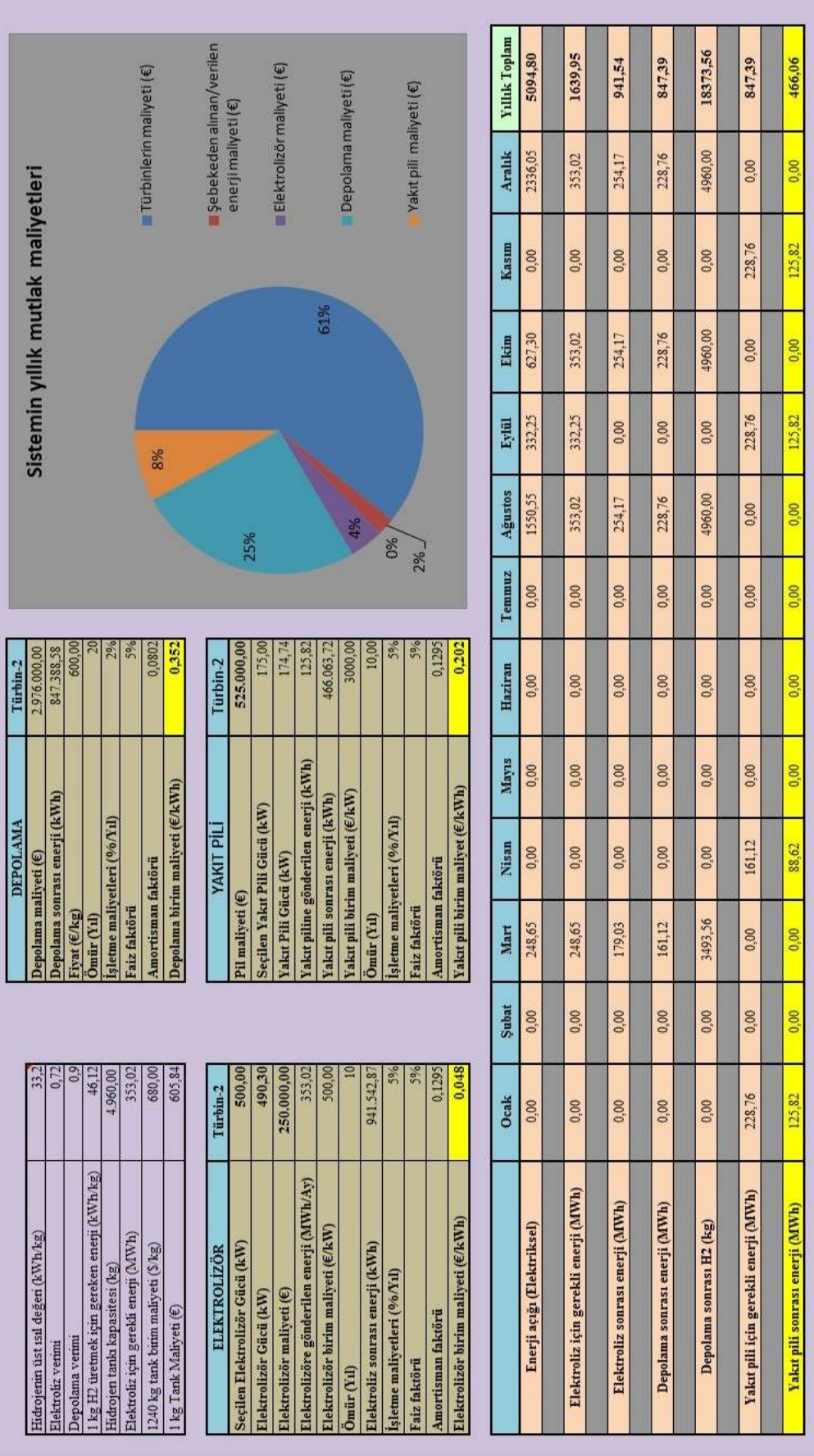
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Toplam
Enerji açığı (Elektriksel)	0,00	0,00	230,21	0,00	0,00	0,00	0,00	1607,72	353,18	619,76	0,00	2290,19	5101,05
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	0,00	0,00	230,21	0,00	0,00	0,00	0,00	353,02	353,02	353,02	0,00	353,02	1642,28
Elektroliz sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	165,75	0,00	0,00	0,00	0,00	254,17	0,00	0,00	0,00	254,17	674,10
Depolama sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	149,18	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	228,76	606,69
Depolama sonrası H ₂ (kg)	0,00	0,00	3234,52	0,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	13154,52
Yakıt pili için gerekli enerji (MWh)	228,76	0,00	0,00	149,18	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	606,69
Yakıt pili sonrası enerji (MWh)	125,82	0,00	0,00	82,05	0,00	0,00	0,00	0,00	125,82	0,00	0,00	0,00	333,68

Şekil G1.2. Türbin-1 (E-33) için program görüntüsü-2

EK G2 Türbin-2 (E-53) için program görüntüleri

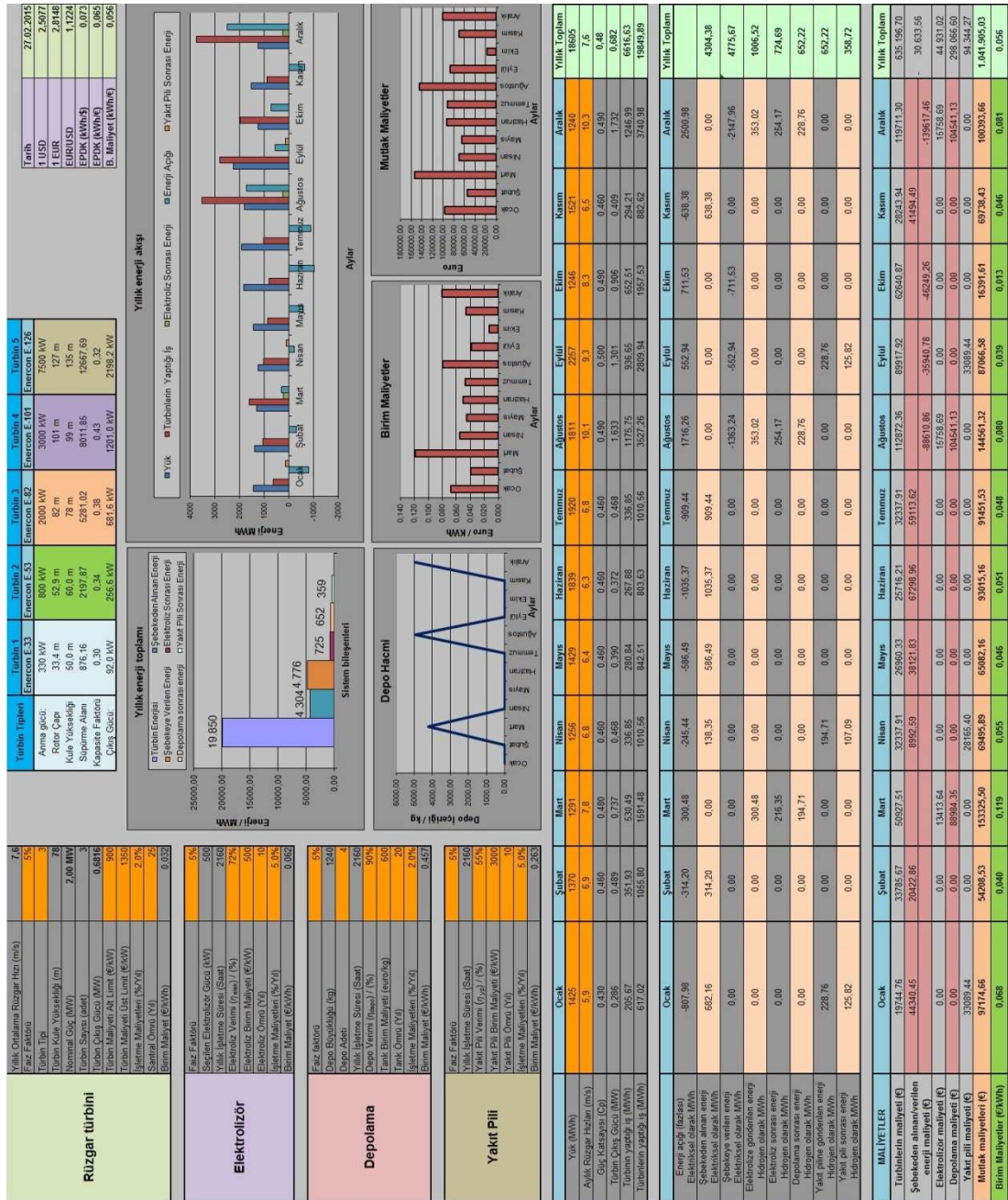


Şekil G2.1. Türbin-2 (E-53) için program görüntüsü-1

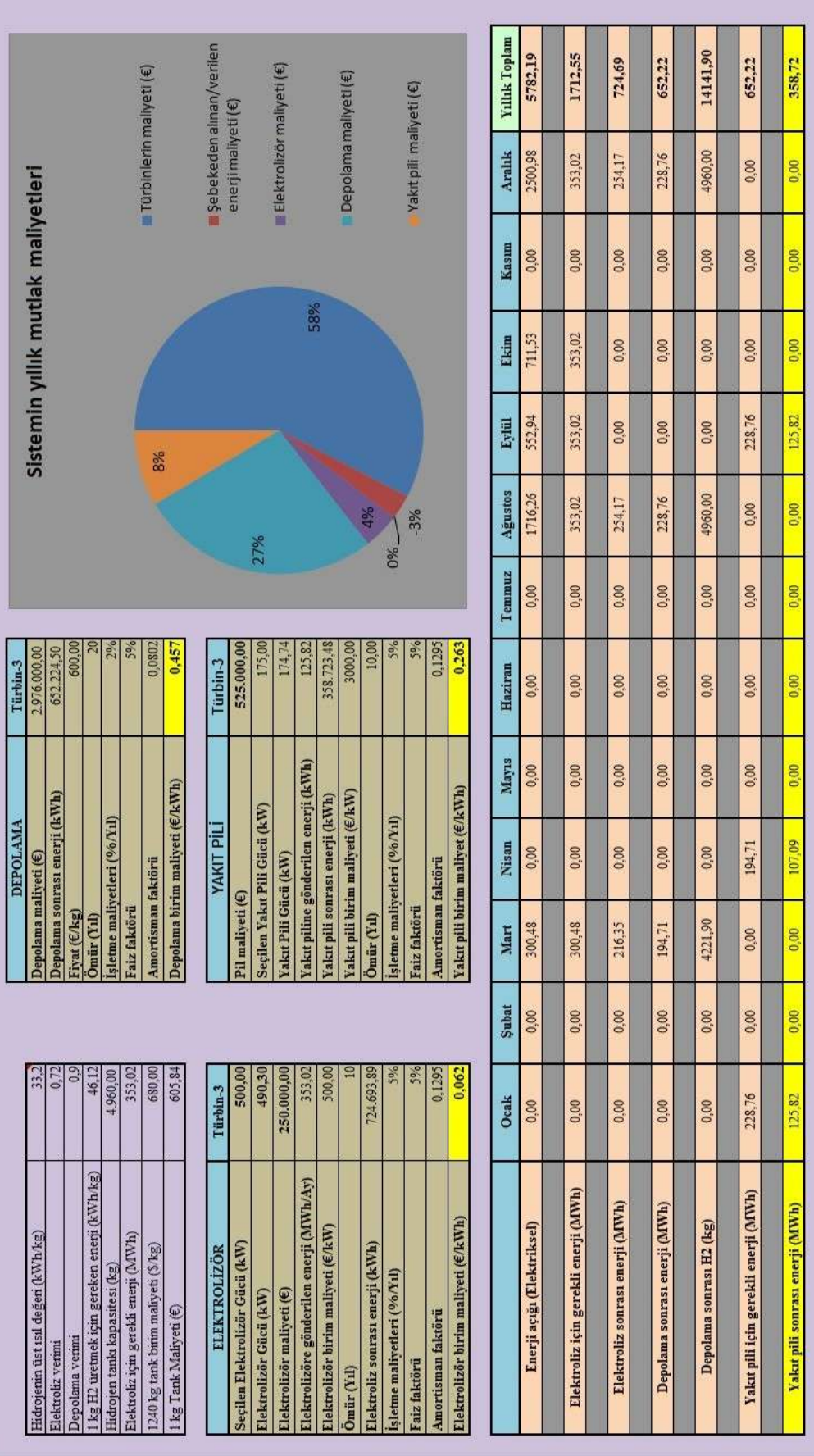


Şekil G2.2. Türbin-2 (E-53) için program görüntüsü-2

EK G3 Türbin-3 (E-82) için program görüntüleri

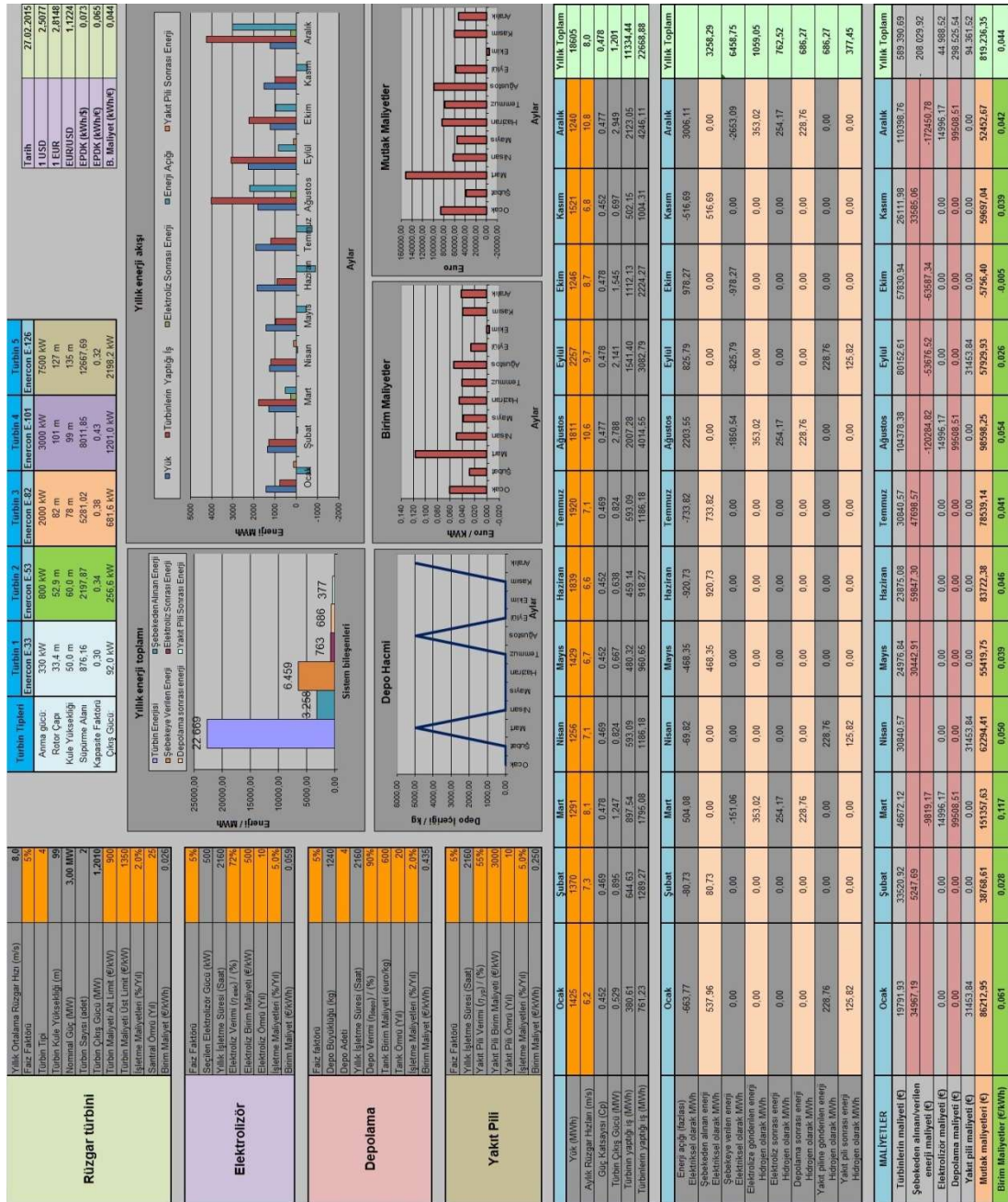


Şekil G3.1. Türbin-3 (E-82) için program görüntüsü-1

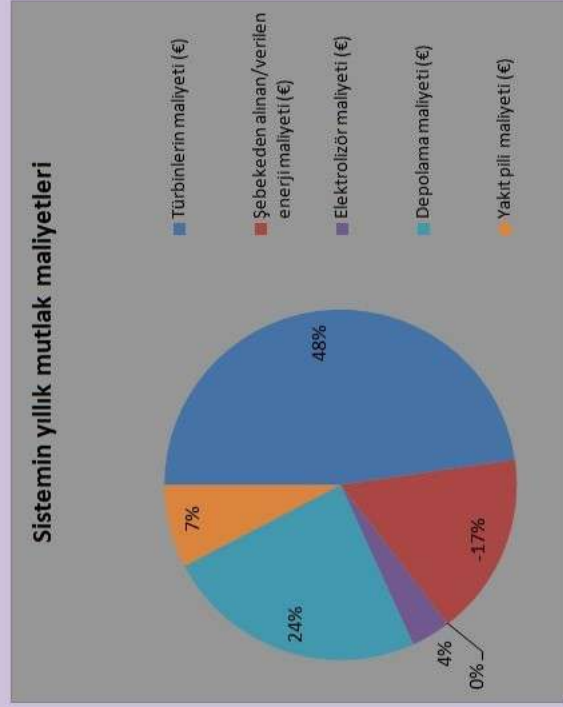


Şekil G3.2. Türbin-3 (E-82) için program görüntüsü-2

EK G4 Türbin-4 (E-101) için program görüntüleri



Şekil G4.1. Türbin-4 (E-101) için program görüntüsü-1



DEPOLAMA	Türbin-4
Depolama maliyeti (€)	2.976.000,00
Depolama sonrası enerji (kWh)	686.265,60
Fiyat (€/kg)	600,00
Ömür (Yıl)	20
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	2%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,0802
Depolama birim maliyeti (€/kWh)	0,435

YAKIT PİLİ	Türbin-4
Pil maliyeti (€)	525.000,00
Seçilen Yakıt Pili Gücü (kW)	175,00
Yakıt Pili Gücü (kW)	174,74
Yakıt piline gönderilen enerji (kWh)	125,82
Yakıt pili sonrası enerji (kWh)	377.446,08
Yakıt pili birim maliyeti (€/kW)	3000,00
Ömür (Yıl)	10,00
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Yakıt pili birim maliyet (€/kWh)	0,250

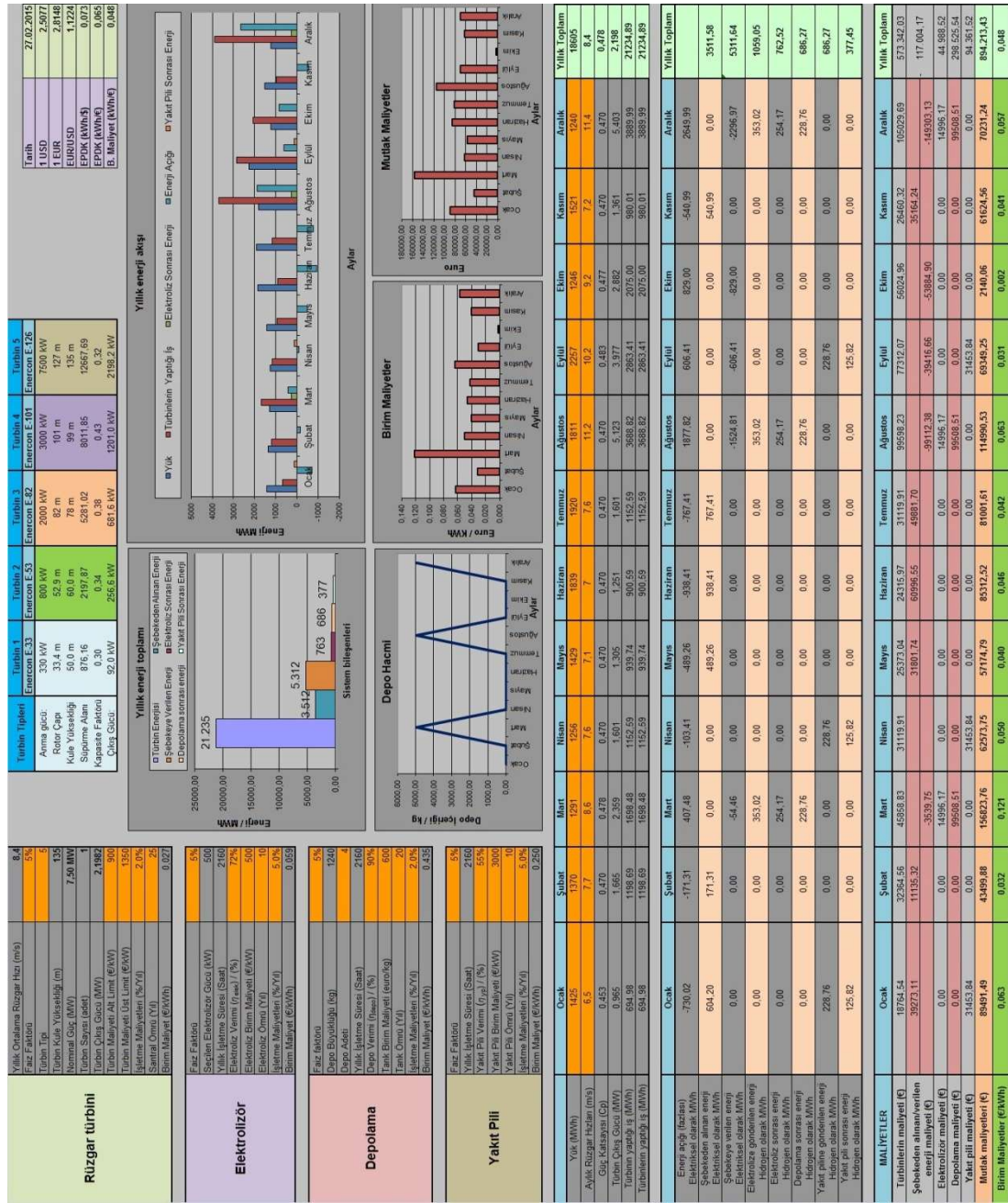
Hidrojenin üst ısı değeri (kWh/kg)	33,2
Elektroliz verimi	0,72
Depolama verimi	0,9
1 kg H ₂ üretmek için gereken enerji (kWh/kg)	46,12
Hidrojen tankı kapasitesi (kg)	4.960,00
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	353,02
1240 kg tank birim maliyeti (\$/kg)	680,00
1 kg Tank Maliyeti (€)	605,84

ELEKTROLİZÖR	Türbin-4
Seçilen Elektrolizör Gücü (kW)	500,00
Elektrolizör Gücü (kW)	490,30
Elektrolizör maliyeti (€)	250.000,00
Elektrolizöre gönderilen enerji (MWh/Ay)	353,02
Elektrolizör birim maliyeti (€/kW)	500,00
Ömür (Yıl)	10
Elektroliz sonrası enerji (kWh)	762.517,33
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Elektrolizör birim maliyeti (€/kWh)	0,059

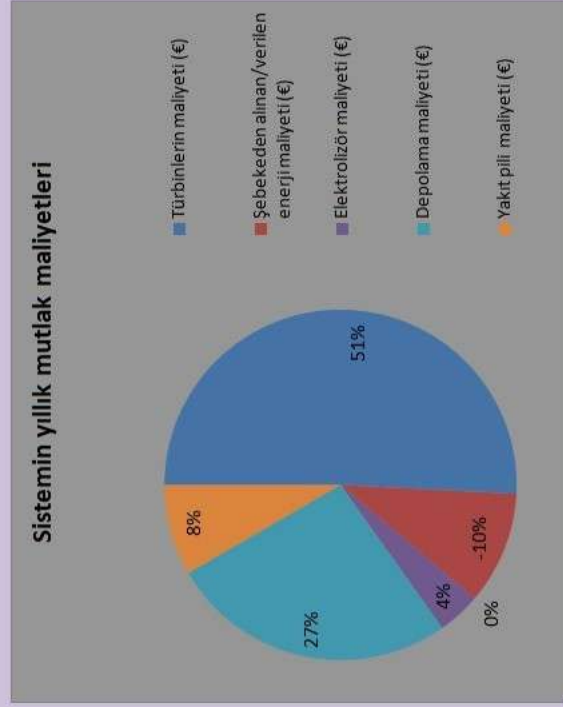
	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Toplam
Enerji açığı (Elektriksel)	0,00	0,00	504,08	0,00	0,00	0,00	0,00	2203,35	825,79	978,27	0,00	3006,11	7517,80
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	0,00	0,00	353,02	0,00	0,00	0,00	0,00	353,02	353,02	353,02	0,00	353,02	1765,09
Elektroliz sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	254,17	0,00	0,00	0,00	0,00	254,17	0,00	0,00	0,00	254,17	762,52
Depolama sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	228,76	686,27
Depolama sonrası H ₂ (kg)	0,00	0,00	4960,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	14880,00
Yakıt pili için gerekli enerji (MWh)	228,76	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	686,27
Yakıt pili sonrası enerji (MWh)	125,82	0,00	0,00	125,82	0,00	0,00	0,00	0,00	125,82	0,00	0,00	0,00	377,45

Şekil G4.2. Türbin-4 (E-101) için program görüntüsü-2

EK G5 Türbin-5 (E-126) için program görüntüleri



Şekil G5.1. Türbin-5 (E-126) için program görüntüsü-1



DEPOLAMA	Türbin-5
Depolama maliyeti (€)	2.976.000,00
Depolama sonrası enerji (kWh)	686.265,60
Fiyat (€/kg)	600,00
Ömür (Yıl)	20
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	2%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,0802
Depolama birim maliyeti (€/kWh)	0,435

YAKIT PİLİ	Türbin-5
Pil maliyeti (€)	525.000,00
Seçilen Yakıt Pili Gücü (kW)	175,00
Yakıt Pili Gücü (kW)	174,74
Yakıt piline gönderilen enerji (kWh)	125,82
Yakıt pili sonrası enerji (kWh)	377.446,08
Yakıt pili birim maliyeti (€/kW)	3000,00
Ömür (Yıl)	10,00
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Yakıt pili birim maliyet (€/kWh)	0,250

Hidrojenin üst ısı değeri (kWh/kg)	33,2
Elektroliz verimi	0,72
Depolama verimi	0,9
1 kg H ₂ üretmek için gereken enerji (kWh/kg)	46,12
Hidrojen tank kapasitesi (kg)	4.960,00
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	353,02
1240 kg tank birim maliyeti (\$/kg)	680,00
1 kg Tank Maliyeti (€)	605,84

ELEKTROLİZÖR	Türbin-5
Seçilen Elektrolizör Gücü (kW)	500,00
Elektrolizör Gücü (kW)	490,30
Elektrolizör maliyeti (€)	250.000,00
Elektrolizöre gönderilen enerji (MWh/Ay)	353,02
Elektrolizör birim maliyeti (€/kW)	500,00
Ömür (Yıl)	10
Elektroliz sonrası enerji (kWh)	762.517,33
İşleme maliyetleri (%/Yıl)	5%
Faiz faktörü	5%
Amortisman faktörü	0,1295
Elektrolizör birim maliyeti (€/kWh)	0,059

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık Toplam
Enerji açığı (Elektriksel)	0,00	0,00	407,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1877,82	606,41	829,00	0,00	2649,99	6370,70
Elektroliz için gerekli enerji (MWh)	0,00	0,00	353,02	0,00	0,00	0,00	0,00	353,02	353,02	353,02	0,00	353,02	1765,09
Elektroliz sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	254,17	0,00	0,00	0,00	0,00	254,17	0,00	0,00	0,00	254,17	762,52
Depolama sonrası enerji (MWh)	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	228,76	686,27
Depolama sonrası H ₂ (kg)	0,00	0,00	4960,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	0,00	0,00	0,00	4960,00	14880,00
Yakıt pili için gerekli enerji (MWh)	228,76	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	0,00	228,76	0,00	0,00	0,00	686,27
Yakıt pili sonrası enerji (MWh)	125,82	0,00	0,00	125,82	0,00	0,00	0,00	0,00	125,82	0,00	0,00	0,00	377,45

Şekil G5.2. Türbin-5 (E-126) için program görüntüsü-2

EK H Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası kurları

27.02.2015 Günü Saat 15:30'da Belirlenen Gösterge Niteliğindeki Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Kurları						
Indicative Exchange Rates Announced at 15:30 on 02/27/2015 by the Central Bank of Turkey						
Bülten No: 2015/41						
DÖVİZ  Kodu Currency Code	Birim Unit	Döviz Cinsi Currency	Döviz Alış FOREX  Buying	Döviz Satış FOREX  Selling	Efektif Alış Banknote Buying	Efektif Satış Banknote Selling
USD/TRY	1	ABD DOLARI	2.5077	2.5123	2.5059	2.5161
AUD/TRY	1	AVUSTRALYA DOLARI	1.9572	1.9700	1.9482	1.9818
DKK/TRY	1	DANİMARKA KRONU	0.37646	0.37831	0.37620	0.37918
EUR/TRY	1	EURO 	2.8148	2.8198	2.8128	2.8240
GBP/TRY	1	İNGİLİZ STERLİNİ	3.8596	3.8797	3.8569	3.8855
CHF/TRY	1	İSVİÇRE FRANGI	2.6365	2.6534	2.6325	2.6574
SEK/TRY	1	İSVEÇ KRONU	0.29904	0.30214	0.29883	0.30283
CAD/TRY	1	KANADA DOLARI	2.0072	2.0162	1.9998	2.0239
KWD/TRY	1	KUVEYT DİNARI	8.4214	8.5316	8.2951	8.6596
NOK/TRY	1	NORVEÇ KRONU	0.32739	0.32959	0.32716	0.33035
SAR/TRY	1	SUUDİ ARABİSTAN RİYALİ	0.66867	0.66988	0.66365	0.67490
JPY/TRY	100	JAPON YENİ	2.0963	2.1102	2.0885	2.1182
BGN/TRY	1	BULGAR LEVASI	1.4312	1.4499		
RON/TRY	1	RUMEN LEYİ	0.63088	0.63914		
RUB/TRY	1	RUS RUBLESİ	0.04075	0.04128		
IRR/TRY	100	İRAN RİYALİ	0.00900	0.00912		
CNY/TRY	1	ÇİN YUANI	0.39775	0.40295		
PKR/TRY	1	PAKİSTAN RUPİSİ	0.02449	0.02481		
Çapraz Kurlar / Cross Rates						
Döviz Kodu Currency Code	Birim Unit	Döviz Cinsi Currency	Çapraz Kur Cross Rate	Döviz Cinsi Currency		
USD/AUD	1	ABD DOLARI	1.2783	AVUSTRALYA DOLARI		
USD/DKK	1	ABD DOLARI	6.6510	DANİMARKA KRONU		
USD/CHF	1	ABD DOLARI	0.9490	İSVİÇRE FRANGI		
USD/SEK	1	ABD DOLARI	8.3503	İSVEÇ KRONU		
USD/JPY	1	ABD DOLARI	119.34	JAPON YENİ		
USD/CAD	1	ABD DOLARI	1.2477	KANADA DOLARI		
USD/NOK	1	ABD DOLARI	7.6411	NORVEÇ KRONU		
USD/SAR	1	ABD DOLARI	3.7503	SUUDİ ARABİSTAN RİYALİ		
EUR/USD	1	EURO 	1.1224	ABD DOLARI		
GBP/USD	1	İNGİLİZ STERLİNİ	1.5417	ABD DOLARI		
KWD/USD	1	KUVEYT DİNARI	3.3771	ABD DOLARI		
USD/BGN	1	ABD DOLARI	1.7424	BULGAR LEVASI		
USD/RON	1	ABD DOLARI	3.9527	RUMEN LEYİ		
USD/RUB	1	ABD DOLARI	61.20	RUS RUBLESİ		
USD/IRR	1	ABD DOLARI	27708	İRAN RİYALİ		
USD/CNY	1	ABD DOLARI	6.2696	ÇİN YUANI		
USD/PKR	1	ABD DOLARI	101.84	PAKİSTAN RUPİSİ		
Bilgi İçin / For Information						
SDR/USD	1		1.40729	ABD DOLARI		
SDR/TRY	1		3.5323	TÜRK LİRASI		

Şekil H.1. Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası kurları

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Nusret KARAKUŞ
Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya/10.10.1977
E-Posta: nusret.karakus@yaloa.edu.tr
Lisans: Karadeniz Teknik Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2012 - : Yalova Üniversitesi, Yapı İşleri Daire Başkanlığı, Şube Müdürü
2010 - 2012: Yalova Üniversitesi, Yapı İşleri Daire Başkanlığı, Elektrik Mühendisi
2008 - 2010: UEDAŞ Yalova İl Müdürlüğü, İl Müdür Yardımcısı
2005 - 2008: UEDAŞ Yalova İl Müdürlüğü, Proje ve Tesis Müdürü
2000 - 2005: UEDAŞ Yalova İl Müdürlüğü, Elektrik Mühendisi
1999 - 2000: Malatya MİMSAN A.Ş. – Şantiye Mühendisi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

İNCE, K., KARAKUŞ, N., Yalova İli Armutlu İlçesinde Rüzgar-Hidrojen Hibrit Enerji Sisteminin Modellenmesi, 3rd International Istanbul Smart Grid Congress and Fair, 29-30/04/2015