

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜTÜNLEŞİK FORMDA DALGA, GÜNEŞ VE RÜZGAR
ENERJİLERİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN
OPTİMİZASYONU**

Hüseyin BALTA

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Zehra YUMURTACI

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BÜTÜNLEŞİK FORMDA DALGA, GÜNEŞ VE RÜZGAR
ENERJİLERİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİNİN
OPTİMİZASYONU**

Hüseyin BALTA tarafından hazırlanan tez çalışması 29.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zehra YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zehra YUMURTACI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nader JAVANI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Işıl BİLGİÇ, Üye
Okan Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Zehra YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Optimizasyonu” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hüseyin BALTA

İmza



Aileme

ve

biricik eşime ve kızlarıma sevgilerim ile

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında hiçbir yardımını esirgemeyen, her türlü problemimi titizlikle ele alan, her türlü açıklama, izahat ve yorumu cömertçe anlatan, hoşgörüsü ve rehberliği için değerli danışman hocam Prof. Dr. Zehra YUMURTACI'ya en içten şükranlarımı sunarım. Tezi tamamlamamda önemli katkıları olan, araştırmamı daha geniş bir alana yaymaya teşvik eden, değerli yorum ve tavsiyeleri için tez izleme komite üyeleri olan Doç. Dr. Nader JAVANI ve Doç. Dr. Senem ŞENTÜRK LÜLE hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Doktora dönemimdeki değerli yorumları ve her konuda destekleri için Doç. Dr. Nurullah KAYACI hocama ve Dr. Orhan ÖZCAN arkadaşşıma da teşekkür ederim.

Türkiye'nin dalga ve rüzgar verilerine ulaşmamı sağlayan T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle yoğun geçen Doktora tez sürecimde gösterdikleri hoşgörü ve destekleri için Emlak Konut GYO A.Ş. ailemize sonsuz şükranlarımı sunarım.

Doktora sürecinde bir yandan ebeveynlik yapmak bir yandan da tez bitirmek zorlu bir süreçti. Tezimin hazırlanması sırasında beni cesaretlendiren, her konuda cömert fedakârlık sergileyen, sabrı ve sevgisiyle beni her daim zinde tutan kıymetli Sevgili eşim Arzu'ya çok teşekkür ederim. Eşimin sabrı olmasaydı bu süreci bitirmek gerçekten zordu. Doktora dönemimde doğan ve süreci hızlandırmam için bana her daim cesaret veren biricik kızlarım Ahsen ve Hüma'ya da ayrı teşekkür ederim.

Tüm çalışmam boyunca bana manevi katkıda bulunan, her türlü fedakarlığı gösteren, cesaretlendiren, yardımlarını esirgemeyen çok kıymetli ailelerime göstermiş oldukları sabır ve hoşgörüden dolayı çok teşekkür ederim.

Hüseyin BALTA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Enerji ve Çevre	1
1.2 Dünya’da Yenilenebilir Enerjinin Durumu	7
1.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerjinin Durumu	11
1.4 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi	17
1.5 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi.....	17
1.5.1 Fotovoltaik Panelden Elektrik Üretimi	18
1.5.2 Parabolik Güneş Kolektöründen Elektrik Üretimi	19
1.6 Dalga Enerjisinden Elektrik Üretimi	21
1.7 Tezin Amacı ve Motivasyonu.....	24
1.8 Tez Hipotezi.....	25
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	26
2.1 Rüzgar ve Güneş ile Entegre Yapılan Çalışmalar.....	26
2.2 Rüzgar, Güneş ve Dalga Enerjisinden Bütünleşik Entegre Formda Yapılan Çalışmalar	27
3 BÜTÜNLEŞİK SİSTEM TASARIMI ve ANALİZLER	33
3.1 Sistem Tanıtımı.....	33
3.2 Entegre Sistemin Termodinamik Eşitlikleri ve Analizi	36
3.2.1 Rüzgar Türbini Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi	36
3.2.2 Fotovoltaik Sistemin (PV) Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi.....	37
3.2.3 Parabolik Güneş Kollektörü Sisteminin Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi.....	38
3.2.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Termodinamik Analizi	41
3.3 Senaryolar	42
3.3.1 Senaryo 1	44
3.3.2 Senaryo 2	47

3.3.3 Senaryo 3	50
3.4 Optimizasyon ve Maliyet Analizi	52
3.4.1 Yanıt Yüzey Yöntemi	52
3.4.2 Senaryolar	54
4 BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1 Termodinamik Analiz Sonuçları	58
4.1.1 Senaryo 1	58
4.1.2 Senaryo 2	64
4.1.3 Senaryo 3	70
4.2 Optimizasyon ve Maliyet Analizi Sonuçları	76
4.2.1 Senaryo 1	76
4.2.2 Senaryo 2	92
4.2.3 Senaryo 3	108
4.3. Sistemin Sosyoekonomik ve Politik Yönleri	124
5 SONUÇ	126
KAYNAKLAR	129
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	136

SİMGELİSTESİ

V_{oc}	Açık Devre Voltajı (V)
ω	Açısal Hız (rad)
$\dot{w}_{available}$	Dalga Güç Potansiyeli
H	Dalga Yüksekliği (m)
λ	Dalga Boyu (m)
$w_{available}$	Dalganın Enerji Potansiyeli
y	Deniz Seviyesinden Yükseklik
ex	Ekserji
η_{xwt}	Ekserji Verimi
en	Enerji
a	Genlik
Ex_{solar}	Güneş Işınımının Ekserjisi
V	Hız (m/s)
T_c	Hücre Sıcaklığı (K)
E_{KE}	Kinetik Enerji
I_{sc}	Kısa Devre Akımı (A)
$\dot{m}$	Kütle Akış Oranı (kg/s)
A_c	Maksimum Akım Gücü
I_m	Maksimum Akım Gücü (A)
V_m	Maksimum Voltaj Gücü (V)
T_a	Ortam Sıcaklığı (K)
ex	Özgöl Ekserji (kJ/kg)
s	Özgöl Entropi (kJ/kgK)
τ	Periyot (s)
E_{PE}	Potansiyel Enerji
ψ_{PV}	PV Ekserji Verimi
$Ex_{PV,electric}$	PV Elektrik Ekserjisi

$En_{PV,electric}$	PV Elektrik Üretimi
η_{PV}	PV Enerji Verimi
$Ex_{PV-d, electric}$	PV Günlük Elektrik Ekserjisi
$\eta_{PV,D}$	PV Günlük Elektrik Verimi
h_{ca}	PV Hücrelerinden Isı Kaybı
$En_{PV,termal}$	PV Isı Kaybı
$Ex_{PV,termal}$	PV Isı Kaybı Ekserjisi
Ex_{PV}	PV Sistem Ekserjisi
En_{PV}	PV Sistemin Enerjisi
$\dot{Ex}_{dest,wt}$	Rüzgar Türbini Ekserji Yıkım
$\dot{Ex}_{wt}$	Rüzgar Türbini Ekserjisi
P_{wt}	Rüzgar Türbini Gücü
E_{wave}	Toplam Dalga Enerjisi
$C_{p,wt}$	Türbin Güç Katsayısı
η	Verim
g	Yerçekimi Kuvveti
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
t	Zaman (s)

KISALTMA LİSTESİ

ANOVA	Varyans Analizi
CEED	Ekonomik ve Emisyon Yük Dağılımını
ECMWF	Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi
EES	Mühendislik Denklem Çözücü
EPDK	T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IPPC	Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü topluluğu
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
Mtep	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OECD	Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü
OTEC	Okyanus Termal Enerji Dönüşümü
PMA	Hibrit Güç Yönetim Algoritması
PVGIS	Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi
RSM	Yanıt Yüzey Yöntemi
SAM	System Advisor Model
TMY	Tipik Meteorolojik Yıl
TOE	Ton Eşdeğer Petrol
UMT	Malezya Terengganu Üniversitesi
WEC	Dalga Enerji Dönüşümü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Küresel birincil enerji arzının mevcut dağılımı [2]	1
Şekil 1.2	Dünya genelinde kurulu güç kapasiteleri	2
Şekil 1.3	Yakıtların yanmasından kaynaklanan 1973 yılı CO ₂ emisyonları [8]	3
Şekil 1.4	Yakıtların yanmasından kaynaklanan 2022 yılı CO ₂ emisyonları [8]	3
Şekil 1.5	Okyanus enerjisinin faydaları [17]	5
Şekil 1.6	Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç dağılımı.....	8
Şekil 1.7	Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi seviyeleri	8
Şekil 1.8	Küresel okyanus enerjisi potansiyeli ve dağılımı (TWh) [28]	9
Şekil 1.9	Okyanustan elde edilen küresel kurulu kapasite (GW)	9
Şekil 1.10	Ülkemizdeki kaynaklara göre birincil enerji tüketimi.....	11
Şekil 1.11	(a) Türkiye'de elektrik üretiminin elde edildiği kaynaklar; (b) Türkiye'de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı	12
Şekil 1.12	Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç dağılımı	13
Şekil 1.13	Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye'deki elektrik üretimi seviyeleri (TWh)	13
Şekil 1.14	Türkiye haritası minimum dalga enerji seviyeleri [36]	15
Şekil 1.15	Türkiye haritası maksimum dalga enerji seviyeleri [36]	15
Şekil 1.16	Rüzgar türbini [40]	17
Şekil 1.17	Fotovoltaik (PV) Panel [41]	18
Şekil 1.18	Parabolik güneş kollektörü [48]	20
Şekil 1.19	Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri [17]	22
Şekil 1.20	Tapchan dalga enerjisi dönüşüm sistemi.....	24
Şekil 3.1	Türkiye'nin farklı bölgelerindeki şehirler (Türkiye Haritası) [79]	33
Şekil 3.2	Türkiye'nin farklı boylam ve enlemlerinde dalga periyodu, dalga yükseklikleri ve rüzgar hızı [81]	35
Şekil 3.3	Sistem modeli	35
Şekil 3.4	Bütünleşik sistem sürecinin optimizasyon çalışması için blok diyagram	54
Şekil 4.1	Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	59
Şekil 4.2	Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	60

Şekil 4.3 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	61
Şekil 4.4 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	63
Şekil 4.5 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	65
Şekil 4.6 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	66
Şekil 4.7 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	67
Şekil 4.8 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	69
Şekil 4.9 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	71
Şekil 4.10 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	72
Şekil 4.11 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	73
Şekil 4.12 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı	75
Şekil 4.13 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi...	81
Şekil 4.14 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	81
Şekil 4.15 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	82
Şekil 4.16 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	82
Şekil 4.17 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	83
Şekil 4.18 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi	83
Şekil 4.19 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi	84
Şekil 4.20 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	84
Şekil 4.21 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi.....	85
Şekil 4.22 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	85
Şekil 4.23 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	86
Şekil 4.24 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	86
Şekil 4.25 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi	87
Şekil 4.26 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi	87
Şekil 4.27 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi.....	88
Şekil 4.28 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi	88
Şekil 4.29 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	89
Şekil 4.30 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	89
Şekil 4.31 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi...	97

Şekil 4.32 Rüzgar ve parabolik güneş kollektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	97
Şekil 4.33 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	98
Şekil 4.34 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kollektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	98
Şekil 4.35 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi....	99
Şekil 4.36 Parabolik güneş kollektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	99
Şekil 4.37 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi	100
Şekil 4.38 Rüzgar ve parabolik güneş kollektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	100
Şekil 4.39 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi.....	101
Şekil 4.40 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kollektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	101
Şekil 4.41 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	102
Şekil 4.42 Parabolik güneş kollektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	102
Şekil 4.43 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi	103
Şekil 4.44 Rüzgar ve parabolik güneş kollektörü gücünün toplam maliyete etkisi	103
Şekil 4.45 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi.....	104
Şekil 4.46 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kollektörü gücünün toplam maliyete etkisi	104
Şekil 4.47 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	105
Şekil 4.48 Parabolik güneş kollektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	105
Şekil 4.49 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.	113
Şekil 4.50 Rüzgar ve parabolik güneş kollektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	113
Şekil 4.51 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	114
Şekil 4.52 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kollektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	114
Şekil 4.53 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi...	115
Şekil 4.54 Parabolik güneş kollektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi.....	115
Şekil 4.55 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi	116
Şekil 4.56 Rüzgar ve parabolik güneş kollektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	116
Şekil 4.57 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi.....	117

Şekil 4.58 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi	117
Şekil 4.59 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	118
Şekil 4.60 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi	118
Şekil 4.61 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi	119
Şekil 4.62 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi	119
Şekil 4.63 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi.....	120
Şekil 4.64 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi	120
Şekil 4.65 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	121
Şekil 4.66 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi	121

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç ve elektrik üretim değerleri	14
Tablo 1.2 Türkiye denizlerinin bölgesel ortalama dalga yoğunluk güçleri [36]...	16
Tablo 1.3 Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin karşılaştırılması [53].....	22
Tablo 3.1 Seçilen lokasyonlara göre belirlenen kıyı uzunlukları ve alanlar	43
Tablo 3.2. Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri	44
Tablo 3.3 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri	45
Tablo 3.4 Seçilen fotovoltaik modelin özellikleri ve PV*SOL çözümleri	45
Tablo 3.5 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri.....	46
Tablo 3.6 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri	47
Tablo 3.7 Seçilen rüzgar türbininin özellikleri	48
Tablo 3.8 Seçilen fotovoltaik modelin özellikleri ve PV*SOL çözümleri	48
Tablo 3.9 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri.....	50
Tablo 3.10 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri.	51
Tablo 3.11 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri.....	52
Tablo 3.12 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri.....	54
Tablo 3.13 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları.....	55
Tablo 3.14 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri.....	56
Tablo 3.15 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları.....	56
Tablo 3.16 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri.....	57
Tablo 3.17 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları.....	57
Tablo 4.1 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	58
Tablo 4.2 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	60
Tablo 4.3 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	61
Tablo 4.4 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	62
Tablo 4.5 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	64
Tablo 4.6 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	64
Tablo 4.7 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	66
Tablo 4.8 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	67

Tablo 4.9 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	68
Tablo 4.10 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	70
Tablo 4.11 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	70
Tablo 4.12 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	72
Tablo 4.13 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	73
Tablo 4.14 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	74
Tablo 4.15 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı	76
Tablo 4.16 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	77
Tablo 4.17 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	78
Tablo 4.18 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	79
Tablo 4.19 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları	90
Tablo 4.20 Faktörlerin optimum değerleri	91
Tablo 4.21 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	93
Tablo 4.22 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	94
Tablo 4.23 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	95
Tablo 4.24 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları	106
Tablo 4.25 Faktörlerin optimum değerleri	107
Tablo 4.26 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	109
Tablo 4.27 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	110
Tablo 4.28 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları	111
Tablo 4.29 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları	122
Tablo 4.30 Faktörlerin optimum değerleri	123

Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Optimizasyonu

Hüseyin BALTA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Zehra YUMURTACI

Türkiye'nin enerji ihtiyacının önemli bir kısmı halen fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmaktadır. Ülke kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji kaynakları Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak için alternatif bir kaynak olarak görünmektedir. Bu çalışma, Türkiye'de mevcut dalga, güneş ve rüzgar enerjilerini kullanarak yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik üretimi potansiyelini araştırmaktadır. Türkiye'nin farklı bölgelerinden yedi il (Antalya, Çanakkale, İstanbul, İzmir, Kastamonu, Kırklareli ve Muğla) dalga, güneş ve rüzgar enerjisi potansiyelleri açısından (dalga verileri, rüzgar hızları, güneşlenme süreleri ve küresel radyasyon değerleri) dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Belirlenen bölgelerdeki kıyı uzunlukları dikkate alınarak üç ayrı senaryo üzerine çalışmalar yapılmış olup dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinden yıllık toplam elektrik enerjisi üretimi, ev sayısı ve maliyet hesabı analiz edilmiştir. Sistemin optimizasyonu Yanıt Yüzey Yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmaların önemli bir sonucu olarak, seçilen bölgelerdeki elektrik gücü ve ev sayısı; dalga boyu, dalga yüksekliği ve rüzgar hızı gibi karakteristik özelliklerinin yanı sıra uygulanabilir kıyı uzunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen kıyı uzunlukları dikkate alındığında

dalga enerjisinden elde edilen gücün diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güçten daha yüksek olduğu görülmüştür.

1. ve 2. senaryoya göre yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen güç, kıyı uzunluğunun fazla olması sebebiyle diğer lokasyonlara göre Muğla/Datça ilinde en yüksek seviyededir. Muğla şehrini İzmir, Antalya, Çanakkale, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu izlemektedir. 3. senaryoya göre ise elde edilen güç, kıyı uzunluğunun her şehirde aynı seçilmesi sebebiyle diğer lokasyonlara göre Kırklareli/Demirköy ilinde en yüksek seviyededir. Kırklareli şehrini İstanbul, Antalya, İzmir, Muğla ve Çanakkale izlemektedir. Elektrik tüketiminin entegre sistemden karşılanabileceği ev sayıları dikkate alındığında, 1. senaryoya göre, Muğla/Datça'da 10.525.514 ev, Kastamonu/Doğanyurt'ta ise 358.576 ev öne çıkmaktadır. 2.senaryoya göre, Muğla/Datça'da 5.405.187 evin, Kastamonu/Doğanyurt'ta ise 358.576 evin elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir. 3. senaryoya göre ise, Kırklareli/Demirköy'de 782.298 evin, Çanakkale/Ayvacık'ta ise 481.870 evin elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak rüzgar, fotovoltaik, parabolik güneş kolektörü ve dalga enerjisi için optimum faktörler hesaplanmıştır. 1. senaryoya göre optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 20.600,053 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 5.643.850 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 6.550.944.954 (\$) olmasını hedeflemektedir. 2. senaryoya göre optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 10.794,208 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 2.957.317 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 3.297.384.866 (\$) olmasını hedeflemektedir. 3. senaryoya göre ise optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 2.491,455 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 682.591 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 813.940.876 (\$) olmasını hedeflemektedir. Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjileri dikkate alındığında, 1. ve 2. senaryoya göre Muğla/Datça bölgesinde, 3. Senaryoya göre ise Kırklareli/Demirköy bölgesinde entegre sistemin kurulmasının bölgenin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, dalga enerjisi, güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, enerji, elektrik üretimi, optimizasyon, yanıt yüzey yöntemi.

Optimization of Electric Energy Production from Wave, Solar and Wind Energies

Hüseyin BALTA

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Zehra YUMURTACI

Fossil energy resources have a big contribution in Türkiye's energy needs. Considering the country's resources, renewable energy sources are promising alternative source to meet Türkiye's energy needs. This study investigates the potential of renewable energy-based electricity generation in Türkiye by utilizing available wave, solar and wind energy resources. Seven provinces from different regions of Türkiye (Antalya, Çanakkale, İstanbul, İzmir, İzmir, Kastamonu, Kırklareli, Kırklareli and Muğla) are evaluated in terms of wave, solar and wind energy potentials (wave data, wind speeds, sunshine hours and global radiation values) in order to conduct an in-depth study on the subject. Taking into account the coastal lengths in the determined regions, three different scenarios are investigated and the total annual electrical energy production, number of houses, and cost calculation from wave, solar, and wind energies are analyzed. The optimization of the system is conducted by the Response Surface Method. As a result, the potential electric power in the selected regions and the optimum amount of houses with optimum cost are compared. The study reveals a direct relationship between the electrical power and the number of houses in the selected regions with the applicable coastal length, wavelength, wave height, and wind speed.

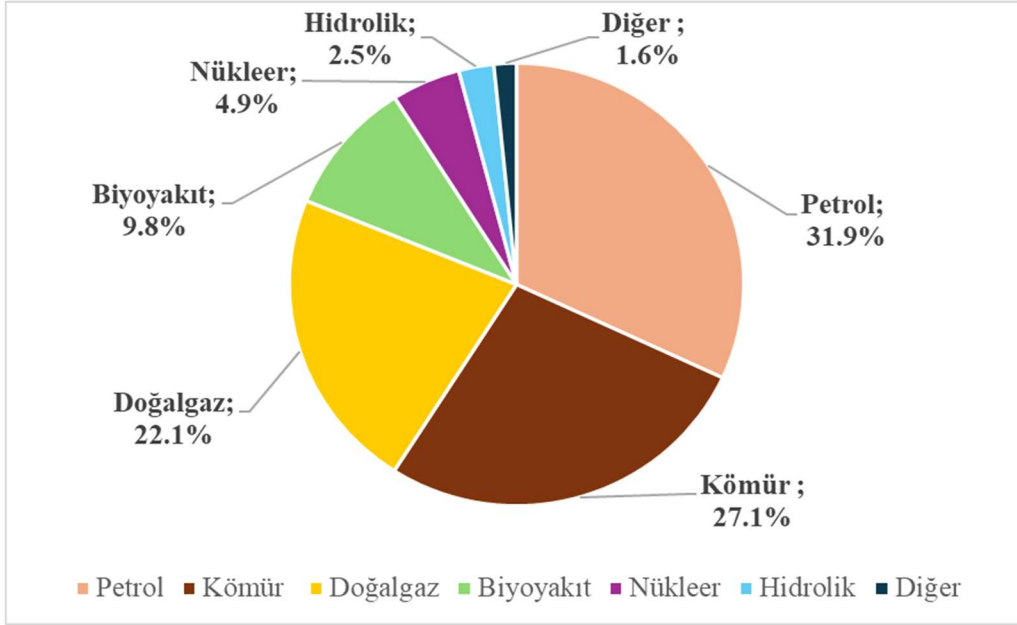
Considering the determined coastal lengths, it is observed that the power obtained from wave energy is higher than the power obtained from other renewable energy sources.

According to scenarios 1 and 2, the power generated from renewable energy systems is the highest in Muğla/Datça province compared to other locations due to its long coastline. Muğla is followed by İzmir, Antalya, Çanakkale, İstanbul, Kırklareli and Kastamonu. According to scenario 3, the power generated from renewable energy systems is highest in Kırklareli/Demirköy compared to other locations due to the same coastal length in each city. Kırklareli is followed by İstanbul, Antalya, İzmir, Muğla and Çanakkale. In the first scenario, 10,525,514 houses in Muğla/Datça and 358,576 houses in Kastamonu/Doğanyurt can have their electricity needs met by the integrated system. The second scenario can meet the electricity needs of 5,405,187 houses in Muğla/Datça and 358,576 houses in Kastamonu/Doğanyurt. The 3rd scenario indicates that it can meet the electricity needs of 782,298 houses in Kırklareli/Demirköy and 481,870 houses in Çanakkale/Ayvacak. Optimum factors for wind, photovoltaic, parabolic solar collector, and wave energy are calculated using the Response Surface Method. According to scenario 1, the optimum factors target a total electricity generation rate of 20,600.053 (GWh/year), a total number of houses of 5,643,850 (units/year), and a total cost of \$6,550,944,954 (\$). According to scenario 2, the optimum factors target a total electricity generation rate of 10,794.208 (GWh/year), a total number of households of 2,957,317 (units/year) and a total cost of 3,297,384,866 (\$). According to scenario 3, the optimum factors target a total electricity generation rate of 2,491.455 (GWh/year), a total number of houses of 682,591 (units/year), and a total cost of 813,940,876 (\$). Considering wave and wave-integrated wind and solar energies, it is calculated that the establishment of an integrated system in Muğla/Datça region according to Scenarios 1 and 2 and in Kırklareli/Demirköy region according to Scenario 3 has the potential to meet the entire electricity demand of the region.

Keywords: Renewable energy, wave energy, solar energy, wind energy, energy, electricity generation, optimization, response surface methodology.

1.1 Enerji ve Çevre

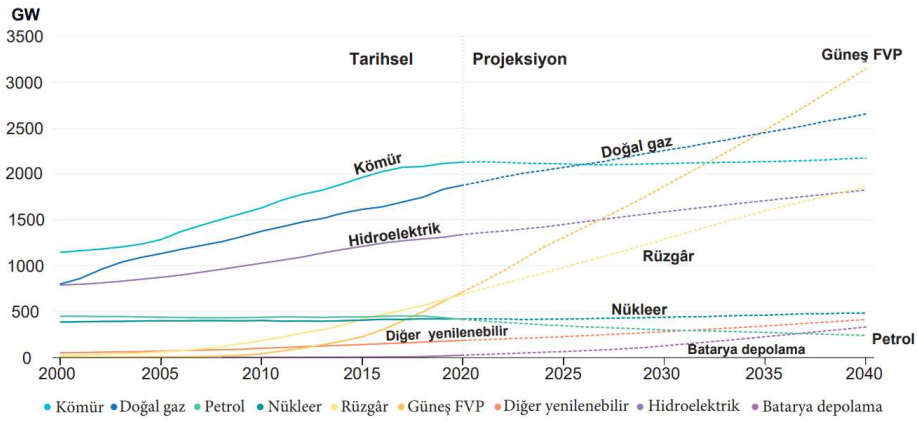
Enerji, insanoğlunun temel ihtiyaçlarını karşılayabilmesi, ekonomik ve sosyal yaşamını daha kolay sürdürebilmesi için en temel kaynaklardan biridir. Birincil enerji talebi, kentsel ve nüfus artışına ve sanayileşmeye paralel olarak yıllar içinde daha önemli hale gelmiştir. 2040 yılında dünya nüfusunun 9,2 milyara artış göstereceği Birleşmiş Milletler tarafından öngörülmektedir. Bu artış ile 1,9 milyar daha fazla insana enerji arzı sağlanması gerektiği görülmüştür [1]. Şekil 1.1’de küresel birincil enerji arzının mevcut dağılımı gösterilmektedir [2].



Şekil 1.1 Küresel birincil enerji arzının mevcut dağılımı [2]

Bu doğrultuda artan birincil enerji talebinin karşılanması amacıyla sürdürülebilir, çevreci ve ekonomik çözümler üretilmesi gerektiği görülmektedir. Şekil 1.2’de görüldüğü üzere 2040 yılı hedeflerine göre kömürün uzun süredir sürdürdüğü liderlik süreci, 2030 yılında doğalgaza geçmesi öngörülmektedir. 2035 yılı projeksiyonuna göre ise fotovoltaik panel güneş enerjisi kurulu güç kapasitesinin kömür ve doğalgazı geçmesi görülmektedir. Rüzgar, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında ise önemli oranda artış yaşanabileceği görülmektedir. Hidroelektrik, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji

kaynaklarının kurulu güçteki paylarının artmasıyla birlikte karbondioksit emisyonunun azalması öngörülmektedir [1].



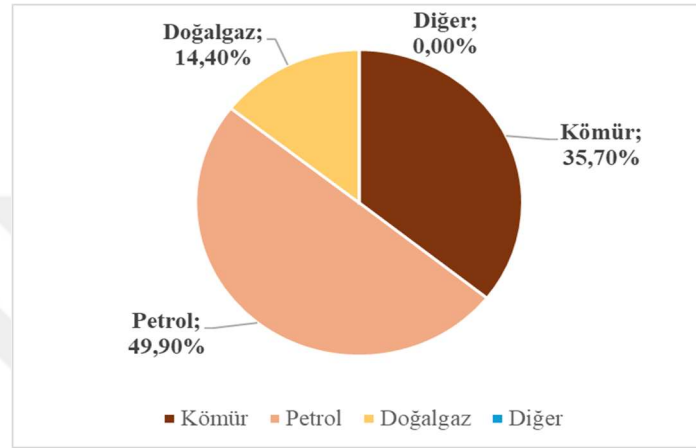
Şekil 1.2 Dünya genelinde kurulu güç kapasiteleri

Enerji kaynakları yenilenebilir ve yenilenemez olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Önemli bilimsel araştırmalar, yenilenemeyen kaynakların küresel ticari amaçlar için kullanılan elektriğin yaklaşık %80'ini ürettiğini, yenilenebilir enerji kaynaklarının ise kalan %20'yi oluşturduğunu göstermektedir [3].

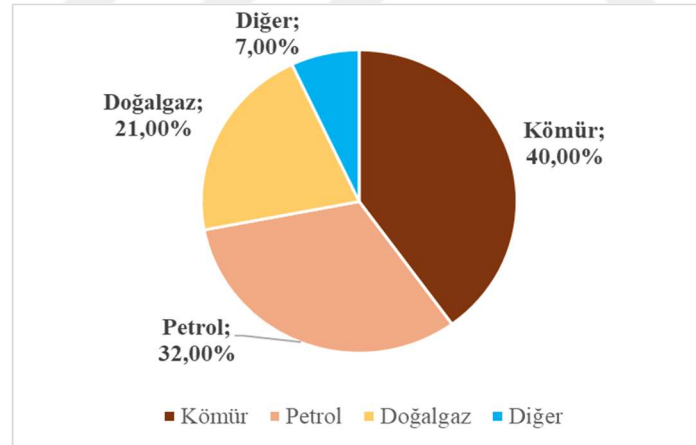
Dünya çapında enerji tüketimi 1971'den bu yana önemli ölçüde artmıştır. Dünya Bankası verilerine göre, enerji talebi yaklaşık üç kat artmıştır [4]. Enerji kaynaklarının önemli bir kısmı petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtları içeren yenilenemeyen kaynaklardan oluşmaktadır. Dünyanın birincil enerji ihtiyacının karşılanmasında büyük bir paya sahip olan fosil enerji kaynaklarının üretimi, taşınması ve kullanımı, sağladığı avantajların yanı sıra yerel ve küresel bazda her geçen gün daha da görünür hale gelen bazı sorunlara neden olmaktadır [5]. Özellikle fosil yakıtların tükenebilir olması ve kullanımları sonucu açığa çıkan başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere sera gazlarının küresel ısınma, iklim değişikliği, tükenme ve artan fiyatlar gibi nedenlerle cazibesini yitirmektedir. Ekonomik İş Birliği ve Kalkınma Örgütü (OECD), fosil yakıtların daha yüksek enerji yoğunlukları ve daha yavaş yenilik oranları nedeniyle yakın gelecekte baskın enerji kaynağı olmaya devam edeceğini öngörmektedir. Bununla birlikte, OECD ülkeleri fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için alternatif enerji kaynaklarını aktif olarak teşvik etmektedir [6]. Enerji güvenliğine ilişkin endişeler ve karbon emisyonlarını azaltma çabaları yoğunlaştıkça, çok sayıda ülke yenilenebilir

enerjinin benimsenmesini teşvik etmeye çalışmakta ve bu konuda önemli adımlar atmaktadır [7].

Yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ emisyonlarının zaman içindeki değişimi Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Doğalgaz, kömür ve diğerlerinin bu emisyonlar üzerindeki etkisi artarken, petrolün etkisinin azaldığı görülmektedir. Burada diğerleri, yenilenemeyen belediye atıkları ve endüstriyel atıkları içermektedir [8].



Şekil 1.3 Yakıtların yanmasından kaynaklanan 1973 yılı CO₂ emisyonları [8]



Şekil 1.4 Yakıtların yanmasından kaynaklanan 2022 yılı CO₂ emisyonları [8]

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkisini azaltmak için sera gazı emisyonlarının derhal azaltılması gerekmektedir. 2040 yılına kadar küresel ısınma artışını 1,5°C'nin altında tutabilmek için Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü topluluğunun (IPPC) hazırlamış olduğu rapora göre, CO₂ emisyonlarının kademeli olarak azaltılması gerektiği öngörülmektedir [9].

Ayrıca, 2016 yılında 177 ülkenin imzalamış olduğu Paris İklim Antlaşması ile, 2020 sonrası süreçte, iklim değişikliği tehlikesine karşı küresel sosyoekonomik dayanıklılığın güçlendirilmesini, endüstriyelleşme öncesi dönemle karşılaştırıldığında küresel sıcaklık artışının 2°C'nin olabildiğince altında (mümkünse 1,5°C derece seviyesinde) tutulması amaçlanmaktadır [10]. Bu amaç ile fosil yakıt kullanımının kısmen azaltılarak, yenilenebilir enerjiye yönelinmesini hedeflemektedir. Paris İklim Anlaşması iklim değişikliğine karşı uluslararası iş birliğini farklı bir yoldan sürdürmektedir. 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü'nde oluşturulan yapının küresel emisyonlarda en üst orana sahip olan ABD ve Çin gibi önemli tarafların azaltım eyleminin dışında kalmasına yol açtığı için etkili olmadığı görüşünden yola çıkılarak, tüm tarafları azaltım eylemine ortak etmesi beklenen yeni bir iş birliği olan Paris İklim Anlaşması sözleşmesi ile önemli bir adım atılarak iklim değişikliğinin çerçevesi ortaya koyulmuştur [11].

Yenilenebilir enerji kaynakları okyanus akıntıları, dalga, gelgit, okyanus termal enerji dönüşümü, rüzgar, güneş, jeotermal ve hidrojen enerjilerinden oluşuyor olup kendi kendini yenileyen kaynaklardır. Yenilenebilir enerji aynı zamanda güvenli, temiz ve en önemlisi çevresel sonuçları asgari düzeyde olan sürdürülebilir bir kaynaktır [12]. Yenilenebilir enerji sistemleri, sürekli artan enerji talebinin karşılanmasında hayati bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji sistemleri sınırsız ve çevre dostu fırsatlar sunarken, bu enerji kaynaklarının kesintili olması nedeniyle bu sistemleri faaliyete geçirmenin zorlu bir görev olduğu açıktır [13].

Fosil yakıtların kullanımına atfedilen çevresel bozulma ve küresel ısınma, son yıllarda dünya genelinde yaşamı önemli ölçüde etkilemiştir. Ayrıca, fosil yakıtların arz kaynaklarının sınırlı olduğu ve gelecekte artan enerji talebini karşılamak için yetersiz olduğu düşünülmektedir [14]. Sonuç olarak, sürdürülebilir çevresel kalkınma için temiz enerji kaynakları arayışı çok önemli bir hedef haline gelmiştir. Bu bağlamda, okyanus (dalga), rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi, sürdürülebilir enerji üretimine katkıları ve çevresel kaygıları gidermeleri nedeniyle artmıştır. Bu kaynaklar arasında rüzgar ve güneş enerjisi en yaygın kullanılan temiz enerji alternatifleridir [5]. Dalga enerjisinin de önemli güç kaynakları olarak rüzgar ve güneş enerjisini takip edeceği düşünülmektedir. Dalga enerjisinin en önemli özelliği, yenilenebilir enerji kaynakları arasında özellikle rüzgar ve güneşe kıyasla en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Dalgalar

tarafından üretilen enerjinin küresel ölçeği 8.000.000 TWh/yıl'dır [15]. Birbirleriyle kıyaslandığında dalga enerjisi metrekare (m²) başına güneş ve rüzgâr enerjilerinden sırasıyla yaklaşık 10 kat ve 5 kat daha yoğundur. Bu veriler dikkate alındığında, dalga enerjisindeki küçük bir verimlilik artışı, diğer yenilenebilir enerji formlarının 5-10 katı kadar bir enerji artışı ile sonuçlanacaktır [16]. Ayrıca, ilk yatırımından ve bakım giderlerinden başka gideri olmayan, primer enerjiye bedel ödenmeyen, doğaya herhangi bir kirlетici etki bırakmayan, ucuz, temiz ve çevreci bir enerji kaynağıdır.

Enerji talebi için önemli özellikleri nedeniyle, Türkiye'de okyanus (dalga enerjisi), rüzgar ve güneş enerjisinin entegrasyonu hem küresel ısınma hem de enerji ekonomisi açısından ciddi önem taşımaktadır. Şekil 1.5'te okyanus enerjisinin faydaları gösterilmiştir [17].



Şekil 1.5 Okyanus enerjisinin faydaları [17]

Yenilenebilir enerjinin önemli kaynakları olarak kabul edilen güneş ve rüzgar enerjisi, uygunlukları ve rekabetçi fiyatları nedeniyle günümüzde elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu enerji kaynaklarının kesintili ve değişken doğası, güç kaynağının güvenilirliği konusunda sınırlamalar getirmektedir. Ayrıca, etkinlikleri günlük veya mevsimsel iklim koşullarına

bağlıdır. Güneş enerjisi mevsimlere bağlı olarak değişmekle birlikte günün sadece üçte birinde elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Rüzgar enerjisi için de durum aynıdır [18]. Hava tahmini, mevcut iklim koşullarına bağlı olarak güneş, rüzgar veya okyanus kaynaklarından enerji elde etmek için en uygun yöntemlerin belirlenmesine yardımcı olur. Çok sayıda yenilenebilir enerji tesisi kuruluyor olsa da temel zorluk, bu kaynaklardan elde edilen geçici ve düzensiz çıktıda devam etmekte ve üretilen enerji miktarını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır [19]. Son araştırmalar, birbirini tamamlayan iki veya daha fazla alternatif enerji kaynağı kullanılarak sistem güvenilirliğinin artırılabilirliğini ortaya koymuştur. En yaygın hibrit enerji üretim sistemleri, güneş ve rüzgar kaynaklarının bir kombinasyonunu içerir. Rüzgar akışındaki dalgalanmalar ve güneş enerjisindeki değişimler, yük talebinin karşılanmasında verimsizliğe yol açabilir. Sonuç olarak, sıcaklık dalgalanmaları, bulut hareketi, rüzgar hızı, dalga hızı, dalga periyodu ve yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimini etkileyen diğer faktörler dahil olmak üzere iklim ve hava koşullarındaki potansiyel değişiklikler dikkate alınmalıdır. Araştırmacılar, yenilenebilir enerji üretim sürecinin genel verimliliğini artırmaya yönelik çok önemli bir adım olan hava tahminlerinin hassasiyetini artırmak için aktif olarak çalışmaktadır [19]. Yenilenebilir enerji kaynaklarını etkileyen iklim koşullarını tahmin etmenin yanı sıra, artan talebi karşılamak için gelecekteki elektrik enerjisi tüketimini tahmin etmek de zorunludur [20].

Bu nedenle araştırmacılar, gelecekteki yüklerin öngörülemezliğinden kaynaklanan sorunları ele almak için elektrik yük tüketimini tahmin etmeye yönelik bir yöntem geliştirmeyi amaçlamaktadır [21]. Rüzgar ve güneş enerjisinin kesintili kullanımı nedeniyle, enerji depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji sistemlerinin verimliliğini ve esnekliğini artırmak için çok önemlidir. Buna karşılık, gelgit ve dalga enerjileri tüm deniz yenilenebilir enerjileri arasında olgun bir teknik seviyeye ulaşmıştır. Bu kaynakların yüksek öngörülebilirliği, onları diğer seçeneklere göre daha güvenilir kılmaktadır. Bu nedenle, çeşitli alternatif enerji kaynaklarının entegre edilmesiyle, genel üretimin seyrekliği ve değişkenliği azaltılarak döngülerin güvenilirliği artırılabilir ve daha sürdürülebilir enerji üretimi sağlanabilir. Günümüzde birçok bilim insanı ve politikacı, sürdürülebilir enerjinin geleceğinde hayati bir rol oynayacak bazı kavramları değerlendirmektedir. Bu kavramların altında yatan motivasyon, verimli bir enerji sistemi elde etmek,

yenilenebilir enerji kullanmak, kirliliği azaltmak ve çevreyi korumaktır. Bu bağlamda, çoklu üretim kavramı benzersiz, önemli ve değerli bir çözümdür [22].

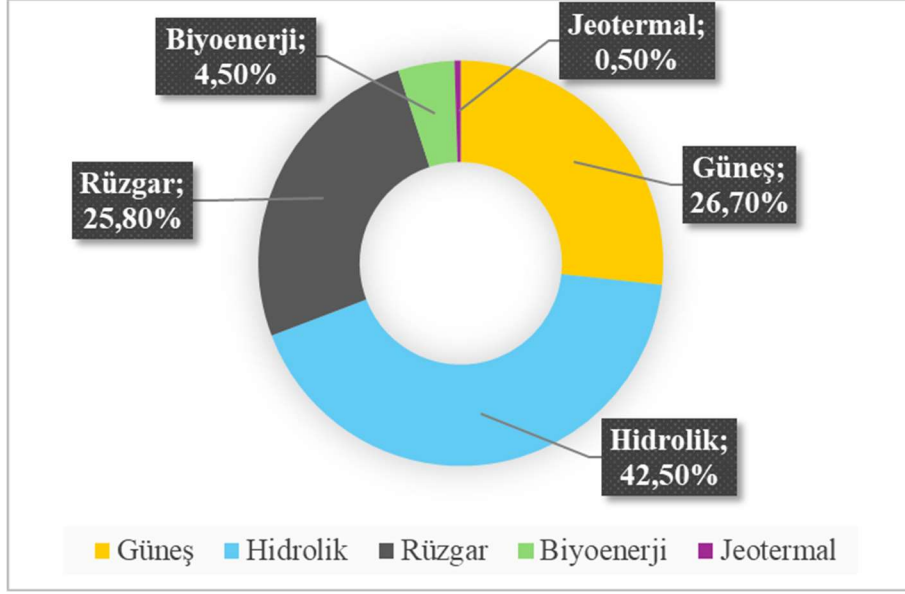
1.2 Dünya’da Yenilenebilir Enerjinin Durumu

Dünyada fosil yakıtlı enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, çevreye verdiği zarar, AB ülkelerinin 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefi ve Paris İklim Anlaşmasının getirdiği hükümler doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim gün geçtikçe artarak devam etmektedir [23]. Bununla birlikte enerji sektörü Covid-19 pandemisinden çıkışla beraber yükselişe geçen enerji talebi ve Ukrayna-Rusya savaşının enerji güvenliği açısından çok boyutlu etkileri neticesinde daha önce eşdeğeri görülmemiş olan tedarik zincirlerinin sürdürülebilirliğine ve güvenliğine etki eden bir enerji krizi ile karşı karşıya kaldığı görülmüştür [24].

Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarının Dünya enerji piyasasında daha yüksek ivmeyle gelişmesinin nedeni, fosil yakıtların olumsuz çevresel etkilerinin sıkıntılı noktalara ilerlemesi, düzensiz piyasa şartlarının oluşması sebebiyle fiyatların ciddi boyutlara ulaşması, rezervlerin düşüş eğilimi göstermesi ve yerel politikacıların şartlar gereği enerji politikalarını değiştirmesinden kaynaklı olduğu görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı enerji sektörünün geleceği ciddi anlamda olumlu ivme kazanmış olup sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarına hızlı bir geçiş olmuştur [25].

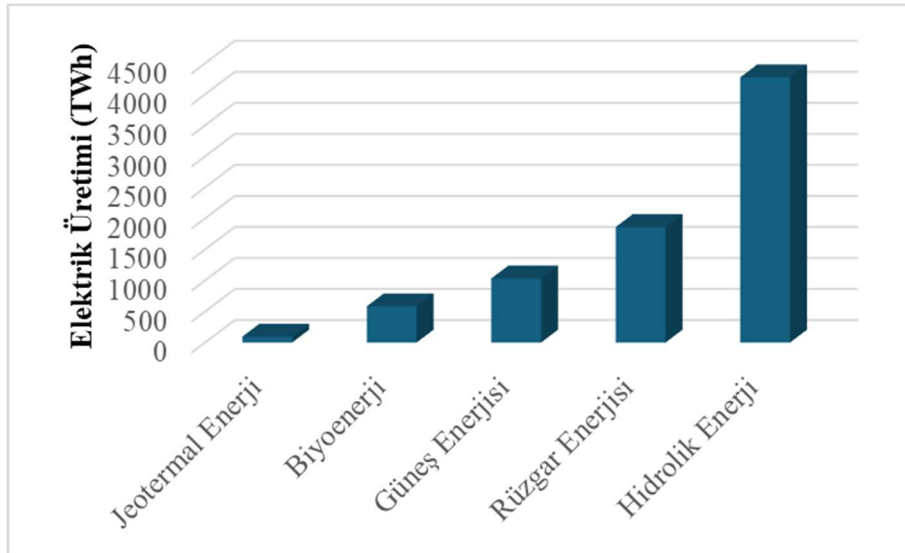
Yenilenebilir enerji %6 kapasite ve 500 TWh eşdeğer üretim ile 2021 yılında ölçülen güçlü ilerlemesini 2022 yılı içerisinde de ciddi enerji krizlerine rağmen sürdürmektedir. 2022-2027 hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kapasite artışının Dünya genelinde 2.400 GW’a ulaşması beklenmektedir [24].

Dünya’da yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2021 yılına ait kurulu güç dağılımı Şekil 1.6’da gösterilmektedir. Dünyada en yüksek kurulu güç hidrolik enerjiye ait olup %42,5’ini hidrolik enerji oluşturmaktadır. Hidrolik enerjiden sonra sırasıyla güneş, rüzgar, biyoenerji ve jeotermal enerji gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücü son on yılda iki kattan fazla arttığı görülmektedir. Bu durumun en önemli sebebi özellikle güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi santrallerindeki kurulu gücün son yedi yılda neredeyse üç kat artmasıdır [26].



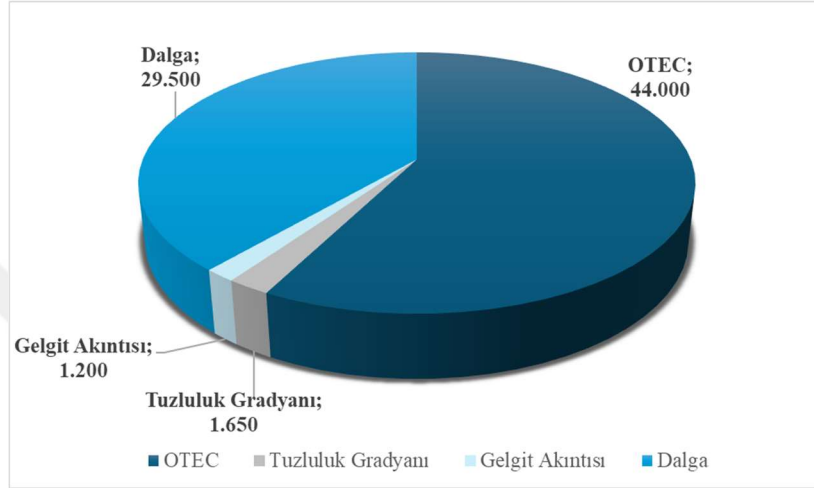
Şekil 1.6 Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç dağılımı

Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretimi ciddi oranda artış göstermektedir. Şekil 1.7’de dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi seviyeleri 2022 yılı için gösterilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en yüksek elektrik enerjisi üretimi sırasıyla hidrolik, rüzgar, güneş, biyoenerji ve jeotermal enerjiden sağlanıyor olup değerleri 4.273,8 TWh, 1.861,9 TWh, 1.032,5 TWh, 583,7 TWh ve 94,9 TWh olarak görülmektedir [26].



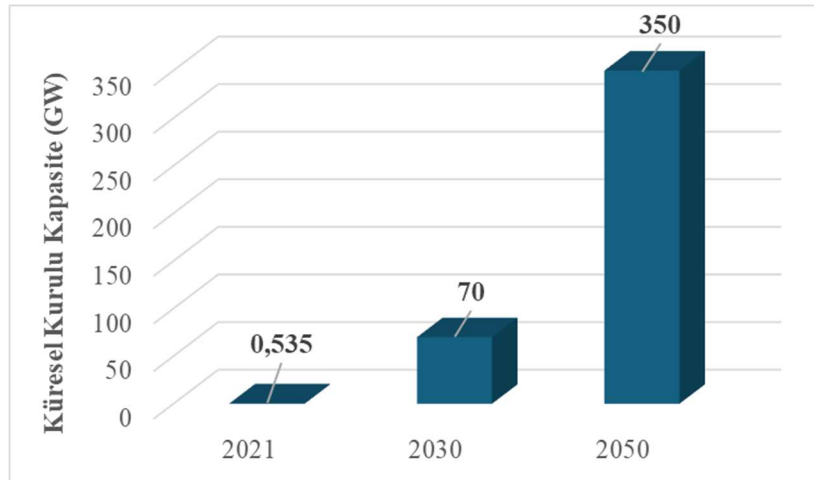
Şekil 1.7 Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi seviyeleri

Dünyanın %70'inden fazlasını kaplayan okyanuslar, uzun zamandır yenilenebilir enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Dalga enerjisi üzerine çalışmalar 1970'lerde petrol krizinin üzerine hız kazansa da birkaç başarısız denemeden sonra dalga enerjisi üzerine olan ilgi azalmıştır [27]. Ancak teknolojinin ilerlemesi ile ilgi yeniden artmış ve birçok yeni teknoloji geliştirilmiştir. Şekil 1.8, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na göre küresel okyanus enerjisi potansiyelini ve dağılımını göstermektedir [28].



Şekil 1.8 Küresel okyanus enerjisi potansiyeli ve dağılımı (TWh) [28]

Uluslararası Enerji Ajansı tarafından 2023 yılında yayınlanan Okyanus Enerji Sistemleri Uluslararası Vizyon Raporuna göre Şekil 1.9'da görüldüğü üzere, 2050 yılında Okyanus'tan elde edilen enerjinin 350 GW'a ulaşacağı ve 2050 yılına kadar 5,2 milyar ton CO₂ emisyonundan tasarruf sağlanacağı belirtilmiştir [28].



Şekil 1.9 Okyanustan elde edilen küresel kurulu kapasite (GW)

Dünya Enerji Konseyinin belirlemiş olduğu yol haritasına göre, yenilenebilir enerjinin birincil enerji arzındaki payı bugün, altıda birden daha az iken, 2050'ye kadar neredeyse üçte iki artacağı öngörülmektedir. Enerji verimliliği büyük ölçüde artırılacak olup enerji yoğunluğu iyileştirme oranı, yılda yaklaşık %2 olan son ortalamalardan, yılda %3,2'ye yükseleceği hedeflenmektedir [29].

Yenilenebilir enerji, küresel enerji talebinin yaklaşık %86'sını ekonomik olarak sağlayabilecek olup brüt elektrik tüketimi iki katından fazla olacaktır. Bunun yanında zamanla elektrikli hale getirilmiş ısı ve taşıma biçimlerine geçiş, yenilenebilir enerji üretimindeki artışlarla birleştirildiğinde, enerji ile ilgili CO₂ emisyon azaltımının %60'ını sağlayabilecektir. Bu tedbirler doğrudan yenilenebilir enerji kullanımı ile entegre edildiğinde, emisyon azaltımlarının payı gerekli toplamın %75'ine ulaştığı görülmektedir [29].

Ayrıca, Avrupa Birliği üye ülkelerinin 2030 hedefleri arasında, sera gazı emisyonlarının 1990 yılına göre %40 azaltılması, enerji tüketiminde yenilenebilir enerji payının %27'ye çıkarılması ve enerji verimliliğinin ise en az %27 oranında artırılması bulunmaktadır [8]. 2050 itibarıyla sera gazlarında 1990 yılına kıyasla %80 ila %90 arasında bir azalma hedeflenmektedir [30].

Bu hedeflerle birlikte, fosil yakıt kullanım oranının azaltılmasının yanında, yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte sürdürülebilir bir enerji üretimini sağlamanın mümkün olabileceği görülmektedir.

Global düzeyde enerji arzını sürdürülebilir kılarak enerji talebini yeterli miktarda karşılamak, enerji stratejilerinin en önemli etkenlerindendir. Artan enerji talebini karşılayabilmek adına sürdürülebilir enerji kaynaklarının olabilecek en verimli şekilde kullanımı önemli hale gelmektedir.

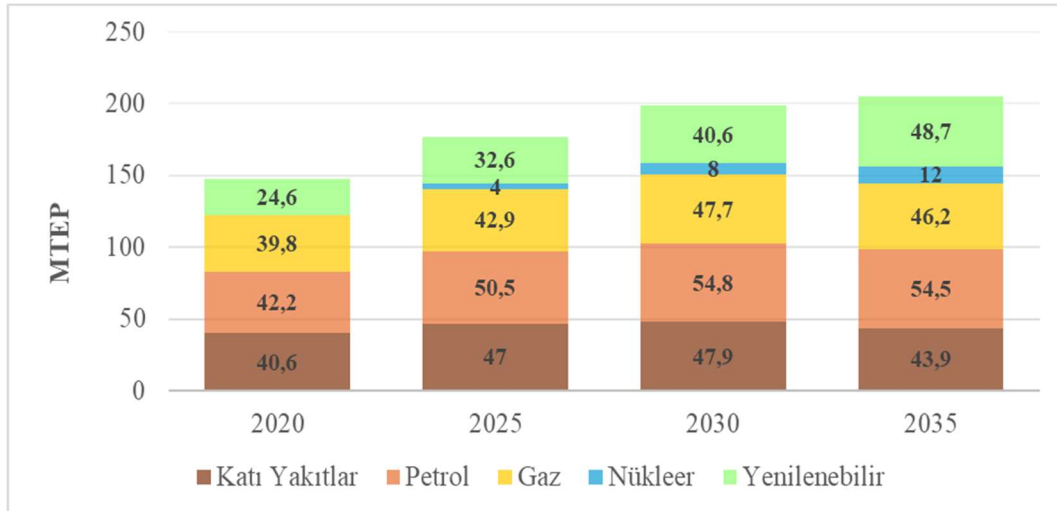
Dünya ülkelerinin, kentsel ve nüfus artışına ve sanayileşmeye paralel olarak enerji talebini karşılayacak arzı yönetmesi çok daha önem arz etmektedir. Buna ek olarak küresel ısınmaya neden olan sera gazı emisyonlarını azaltma hedeflerinin bulunması yenilenebilir enerji stratejilerinin çok daha titiz ve etkin bir şekilde planlanmasını gerekli kılmaktadır.

1.3 Türkiye’de Yenilenebilir Enerjinin Durumu

Türkiye'nin enerji ihtiyacının önemli bir kısmı halen fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmaktadır. Ülke kaynakları göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerji kaynakları Türkiye’nin enerji ihtiyacını karşılamak için alternatif bir kaynak olarak görünmektedir.

Türkiye sahip olduğu coğrafi konumundan dolayı büyük bir güneş enerjisi potansiyeline, yer-şekil özelliklerinden dolayı önemli derecede rüzgar ve hidrolik enerji potansiyeline sahiptir. Ayrıca jeotermal enerji açısından dünya potansiyelinin %8’ini oluşturmaktadır [26].

2020 yılında Türkiye’nin birincil enerji tüketimi 147,2 Mtep olarak gerçekleşmiş olup 2035 yılına kadar 205,3 Mtep’e yükselmesi hedeflenmektedir. Birincil enerji tüketimi, 2000-2020 döneminde yıllık ortalama %3,1 oranında artış göstermiş olup, 2020-2035 döneminde ise %2,2 düzeyinde arttığı görülmektedir. 2020 yılında 1,7 tep/kışı olan kışı başı birincil enerji tüketimi, 2035 yılında 2,1 tep/kışı düzeyine çıkmaktadır. Birincil enerji tüketimi içindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı 2020 yılında %16,7 iken, 2035 yılına kadar yaklaşık %23,7’ye yükselmesi hedeflenmektedir. Şekil 1.10’da ülkemizdeki kaynaklara göre birincil enerji tüketimi verilmektedir [31].



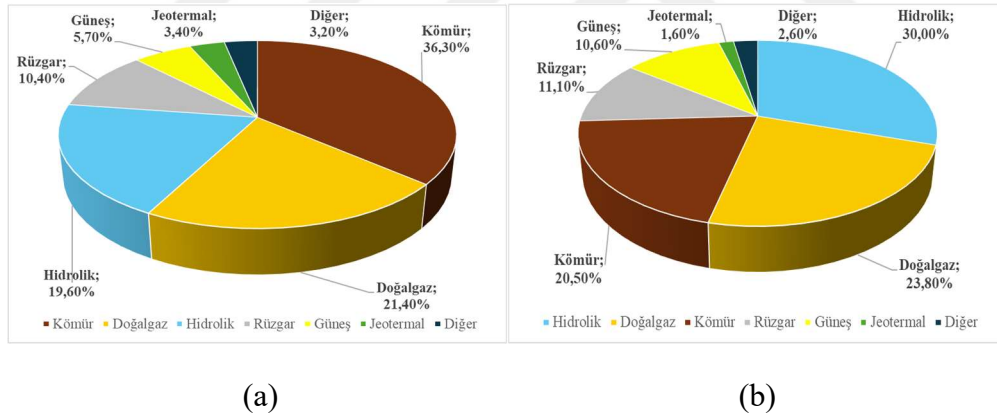
Şekil 1.10 Ülkemizdeki kaynaklara göre birincil enerji tüketimi

Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2023 yılında bir önceki yıla göre %0,2 oranında azalarak 330,3 TWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %0,6 azalarak 326,3 TWh olarak gerçekleştiği görülmüştür [32].

2020-2040 dönemi için yapılan Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu Raporu çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin baz senaryoya göre, 2025 yılında 370 TWh, 2040 yılında ise 591 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir [26]

Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh, 2035 yılında ise 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir [31].

Şekil 1.11’de 2023 yılında Türkiye’de elektrik üretimimizin elde edildiği kaynaklar (%36,3’ü kömürden, %21,4’ü doğalgazdan, %19,6’sı hidrolik enerjiden, %10,4’ü rüzgardan, %5,7’si güneşten, %3,4’ü jeotermal enerjiden ve %3,2’si diğer kaynaklar) ve 2023 yılı Kasım ayı sonu itibariyle kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı (%30,0’ı hidrolik enerji, %23,8’i doğal gaz, %20,5’i kömür, %11,1’i rüzgâr, %10,6’sı güneş, %1,6’sı jeotermal ve %2,6’sı ise diğer kaynaklar) verilmektedir. Türkiye’nin kurulu gücü 2023 yılı Aralık ayı sonu itibarıyla 106.668 MW’a ulaşmıştır [32].

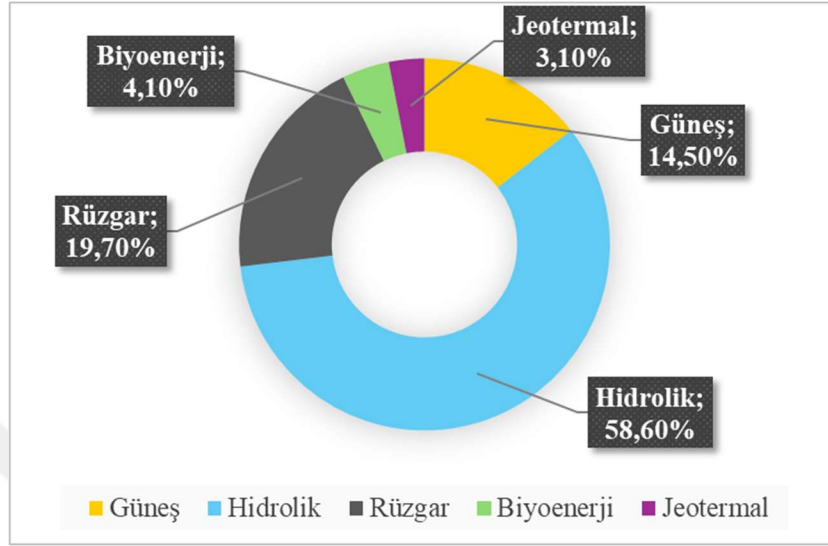


Şekil 1.11 (a) Türkiye’de elektrik üretiminin elde edildiği kaynaklar; (b) Türkiye’de kurulu gücün kaynaklara göre dağılımı

Türkiye’de yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının 2021 yılına ait kurulu güç dağılımı Şekil 1.12’de gösterilmektedir. Türkiye’de yenilenebilir enerjiye dayalı kurulu gücün %58,6’sını hidrolik enerji oluşturmakta olup sonrasındaki en büyük kurulu güçler sırasıyla rüzgar, güneş biyoenerji, jeotermal enerjidir ve yüzdesel oranları %19,7, %14,5, %4,1 ve %3,1’dir [26].

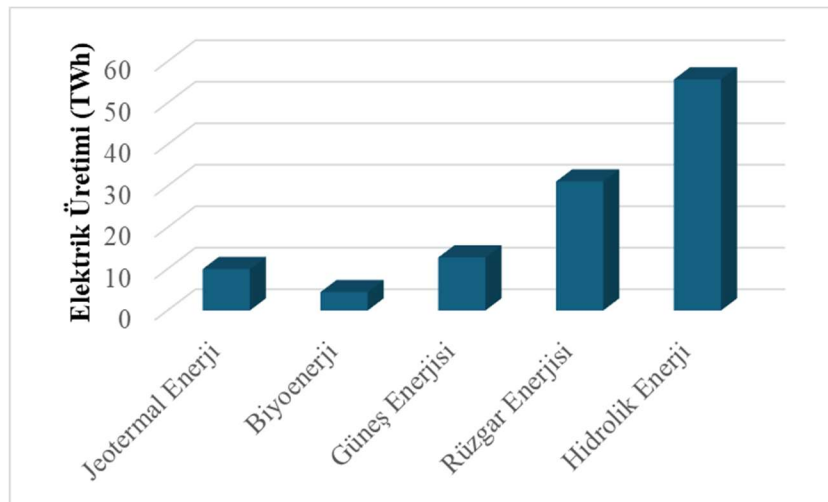
Yenilenebilir enerji kurulu güç kapasitesi son on yılda dünya ile paralel bir şekilde yaklaşık üç kat artış göstermiştir [19]. Bu duruma son süreçte rüzgar ve güneş enerji

santrallerindeki kurulu güç artışı neden olmuştur. Türkiye'nin son 2018-2022 yılları arasında elektrik üretim yatırımlarının %86'sı yenilenebilir enerji alanında gerçekleşmiş olup toplam kurulu güç içerisindeki oranı 2022 yılı itibari ile %54 olarak tespit edilmiştir [23].



Şekil 1.12 Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç dağılımı

Türkiye'de enerji arzının bir kısmını oluşturan yenilenebilir enerji kaynakları elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olup elektrik enerjisi seviyeleri Şekil 1.13'te gösterilmiştir. En yüksek elektrik enerjisi üretimi sırasıyla hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyoenerjiden sağlanmakta olup değerleri sırasıyla 55.7 TWh, 31.1 TWh, 12.8 TWh, 10.0 TWh ve 4.44 TWh'dir [26].



Şekil 1.13 Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye'deki elektrik üretimi seviyeleri (TWh)

Ayrıca, Türkiye Bilimler Akademisi tarafından yayınlanan 2018 raporuna göre yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payları Tablo 1.1’de seçili yıllardaki (2013-2017-2023) kurulu güç (MW) ve üretim değerleri (GWh) olarak gösterilmiştir.

Tablo 1.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu güç ve elektrik üretim değerleri

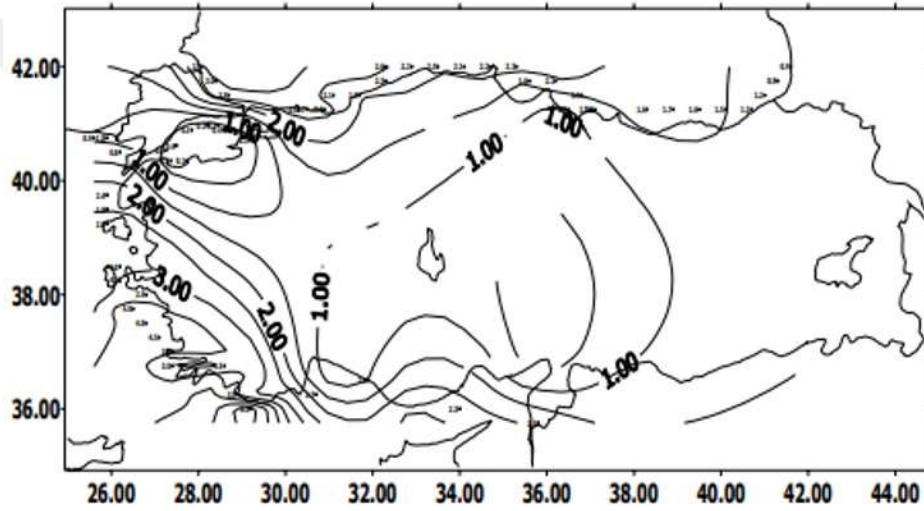
Yıllar	Kurulu Güç/ Elektrik Üretimi	Hidro elektrik	Rüzgar	Jeotermal	Güneş	Biyokütle
2013	MW	22.289	2.759	310	0	224
	GWh	59.420	7.558	1.634	0	1.171
2017	MW	2.700	6.300	1.000	1.500	500
2023	MW	35.000	20.000	800	4.000	1.500
	GWh	91.800	50.000	5.100	8.000	4.533

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi Tablo 1.1’de dikkate alındığında, 2013 yılında hidroelektrik kaynağının 22.289 MW ve 59.420 GWh değeri ile diğer kaynaklara nazaran daha fazla olduğu görülürken güneş enerjisinin de ise hiçbir üretimin olmadığı görülmektedir. 6.300 MW ile rüzgar enerjisinin 2017 yılında ilk sırada yer aldığı ancak güneş enerjisinin 500 MW kurulu güç ile 2013 yılına göre artmış olması yenilenebilir enerjide hangi noktaya gelindiğinin göstergesi olması açısından önemli olduğu ifade edilebilir. 35.000 MW kurulu güç ile 2023 yılında ilk sırada hidroelektrik enerjisi yer alırken, jeotermal enerjide gerileme, güneş enerjisinde ise 2013 yılına nazaran üç katı bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu veriler ülkemizde yenilenebilir enerjide zamanla artan bir üretimin olduğunu açık bir şekilde ifade etmektedir [33].

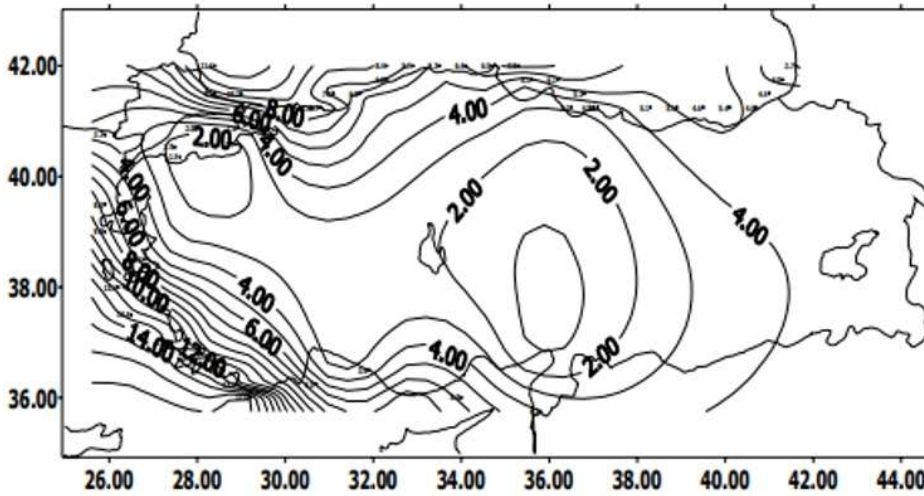
Dalga enerjisi üç tarafı denizlerle çevrili ve Marmara denizi dışındaki açık deniz kıyıları 8210 km kıyı uzunluğu bulunan Türkiye’de faydalanılması gereken önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olup hem Türkiye hem de dünyada yüksek oranda enerji potansiyeli bulunmaktadır. Ülkemizde, ilk yatırımından ve bakım giderlerinden başka gideri olmayan, primer enerjiye bedel ödenmeyen, doğaya her hangi bir kirlenici etki bırakmayan, ucuz, temiz, çevreci ve çok büyük bir enerji kaynağı olan dalga enerjisinin değerlendirilmesi önem arz etmektedir [34].

Akdeniz kıyıları için dalga cephesinin gücü ortalama 13 kW/m olarak ifade edilmektedir. Türkiye dışında Akdeniz’de yapılmış ölçümler, bu gücün yıl boyunca 8.4 – 15.5 kW/m arasında değiştiğini göstermektedir. Bu değerler iç denizlerde daha da düşmektedir. Türkiye kıyılarının beşte birinden yararlanılarak sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyeli 18.5 milyar kWh olarak öngörülmektedir [35].

NATO TU WAVE projesi kapsamında hazırlanan “Türk Kıyı Rüzgarları ve Derin Dalga Atlası” bulguları referans alınarak hesaplanan Türk sularının kullanıma hazır takribi minimum ve maksimum dalga enerji mertebeleri Şekil 1.14 ve 1.15’te gösterilmiştir [36].



Şekil 1.14 Türkiye haritası minimum dalga enerji seviyeleri [36]



Şekil 1.15 Türkiye haritası maksimum dalga enerji seviyeleri [36]

Türkiye haritasının minimum ve maksimum dalga enerji seviyeleri incelendiğinde, Karadenizin yüksek dalga seviyesinin bilinirliğinin aksine Akdeniz ve Ege denizinin daha yüksek dalga enerjisi potansiyeline sahip olduğu ve yıllık ortalama dalga gücü verilerinin yaklaşık 4-17 kW/m arasında olduğu gözlemlenmektedir. Bu doğrultuda dalga enerjisinden elektrik üretimi için en optimal lokasyon İzmir-Antalya arasına denk gelen Muğla-Dalaman ile Antalya-Finike arasındaki karasulardır.

Türkiye denizlerinin bölgesel ortalama dalga yoğunluk güçleri Tablo 1.2’de gösterilmektedir.

Tablo 1.2 Türkiye denizlerinin bölgesel ortalama dalga yoğunluk güçleri [36]

Bölgeler	Güç (kWh/m)
Karadeniz	1,96-4,22
Marmara Denizi	0,31-0,69
Ege Denizi	2,86-8,75
Akdeniz	2,59-8,26
İzmir-Antalya	3,91-12,05

Türkiye’nin yaklaşık yüz ölçümünün yarısının denizlerle çevrili olması, güneş alma oranının yüksek olması gibi coğrafi konumu, yeryüzü şekilleri ve yeraltı kaynakları özellikleri açısından dalga enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi birçok yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeline sahip olduğu açıkça görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından var olan koşullarda yararlanma durumu, teknolojik gelişmelerin yardımıyla daha da üst seviyelere iletilebilir. Bu durumda söz konusu imkanların kullanılması yoluyla çevresel açıdan olumsuz sonuçları bulunan fosil yakıt kullanım oranının git gide azaltılabileceği görülmektedir. Bu koşullarda Türkiye’nin ifade edilen özellikleri hususunda atılacak adımlarla enerji ihtiyaçlarını ithalata gerek kalmaksızın öz kaynaklarıyla karşılayabilecek bir ülke konumuna erişebileceği çok açıktır [37]. Sonuç olarak da iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi bütün ülkeleri ikaz durumuna geçiren ve önlem almak durumunda bırakan olumsuzluklara karşı ülke olarak sorumluluklarını yerine getirmede de büyük önem arz edeceği görülmektedir.

1.4 Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi

Güneş radyasyonundan kaynaklanan dünyanın farklı sıcaklık oranlarına sahip olması sebebiyle rüzgar enerjisi oluşmaktadır. Bunun sonucunda, farklı sıcaklık oranları basınç mertebelerinde dalgalanmaya neden olup farklı basınç mertebeleri de havanın yer değiştirmesine sebebiyet verir. Denizde ve karada üretilen yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar gücü, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda karbon emisyonuna sahip olmayıp herhangi bir yakıtta da ihtiyaç duymayan önemli bir enerji kaynağıdır [38].

Rüzgar enerjisini üretebilmek için kullanılan en önemli yapı rüzgar türbini olup rüzgardaki mekanik enerjiyi (hareket enerjisini) elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik sistemlerdir. Bu sistemler kule, dişli kutusu, jeneratör, pervane kanatları, frenler, şaft ve elektrik donanımı gibi elemanlardan meydana gelmektedir. Rüzgar türbinleri, dönüş eksenine göre 3 ana gruba ayrılmakta olup yatay, dikey ve eğik eksenli olarak üretilmektedir. Genelde tercih edilen rüzgar türbin çeşidi yatay eksenli rüzgar türbinleri olup Şekil 1.16’da gösterilmektedir [39].



Şekil 1.16 Rüzgar türbini [40]

1.5 Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi

Güneş ışığından elektrik enerjisi üretimi için çeşitli teknolojiler kullanılmakta olup, çalışmamızda fotovoltaik (PV) güneş panelleri ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinden (CSP) olan parabolik güneş kollektörü sistemleri kullanılmıştır.

1.5.1 Fotovoltaik Panelden Elektrik Üretimi

Güneş enerjisini, doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklere PV sistem denilmektedir. PV hücreler, silisyum, galyum, arsenit gibi yarı iletken maddelerden meydana gelmektedir ve bu maddeler üzerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşmaktadır.

Elektrik akımı oluşması için her bir hücre pozitif ve negatif katmanlara sahip olup, daha yüksek güç üretmek amacıyla daha fazla sayıda güneş pilleri paralel veya seri olarak birbirine bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilmektedir ve bu tür yapılar güneş pili modülü veya fotovoltaik modülü olarak adlandırılmaktadır. Güç ihtiyacına bağlı olarak modüller Şekil 1.17’de gösterildiği üzere birbirleriyle seri ya da paralel bağlanıp birkaç Watt’tan birkaç Megawatt’a kadar güç elde edilebilmesi amacıyla sistem oluşturulmaktadır [39].



Şekil 1.17 Fotovoltaik (PV) Panel [41]

Yarı iletken maddelerin n ya da p tipi katkıları, PV hücre olarak kullanılabilmesi için gereklidir. Bu işlem, saf yarı iletken sıvı içerisine gerekli katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle gerçekleştirilir. Pn tipi maddenin p bölgesi tarafında pozitif, n bölgesi tarafında negatif yük birikir. Pn ara yüzeyine “eklem bölgesi” veya “geçiş bölgesi” denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan ise “yapısal elektrik alan” olarak adlandırılır. Yarı iletkenler, yasak enerji aralığı ile ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar valans bandı ve iletkenlik bandıdır. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarı iletken

tarafından soğurulduğunda, enerjisini valans banttaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, PV hücresinin pn eklem ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır.

Bu şekilde PV hücresi, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine gönderen bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, PV hücresinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun PV hücre yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder.

Güneş hücreleri genellikle tek kristal (monokristal), çoklu kristal (polikristal), amorf silisyum veya ince film olarak üretilmektedir. Kristal güneş panellerinde en önemli malzeme silisyumdur. Monokristal Silisyum bloklardan üretilen güneş panellerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari panellerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Ömürleri ise ortalama 20-25 yıldır. Polikristal Silisyum güneş panelleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de %2-5 kadar düşük olmaktadır [42].

Fotovoltaik enerji sistemleri uygulamaları şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olarak ikiye ayrılmaktadır. Şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri, fotovoltaik paneller aracılığıyla elde edilen elektriğin ihtiyaç duyulan kısmının kullanıldığı, ihtiyaç fazla kısmının da şebekeye verildiği sistemlerdir. Fotovoltaik paneller aracılığıyla elde edilen doğru akım, evirici aracılığıyla evlerde kullanılan alternatif akıma dönüştürülür. Şebekeden bağımsız fotovoltaik güç sistemlerindeyse üretilen elektriğin depolanacağı batarya grubuna ihtiyaç vardır. Fotovoltaik paneller tarafından elde edilen elektrik şarj düzenleyici aracılığıyla batarya grubuna iletilir, ardından eviriciler aracılığıyla ihtiyaç duyulan kısmı alternatif akıma dönüştürülerek kullanılır [43].

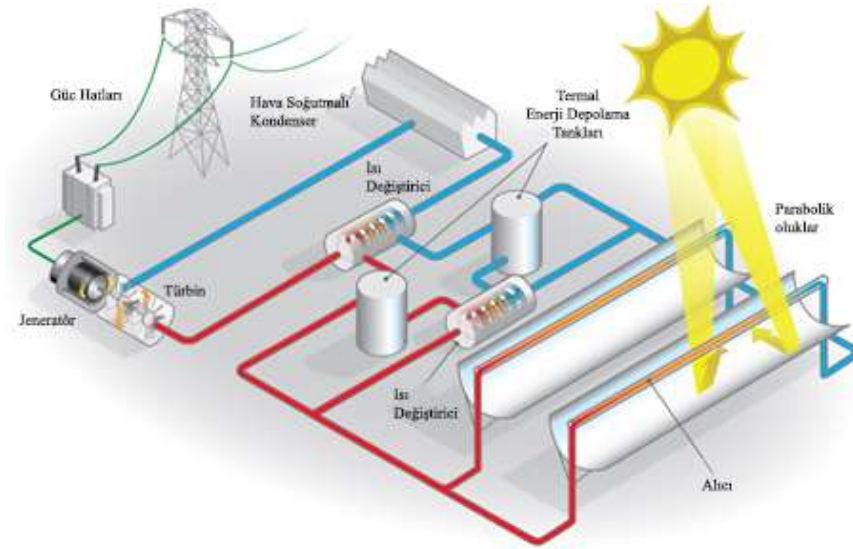
1.5.2 Parabolik Güneş Kolektöründen Elektrik Üretimi

Güneş enerjisinden elektrik üretmek için farklı teknolojiler geliştirilmiş olup bunlardan birisi de yoğunlaştırılmış güneş enerjisidir. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) sistemleri güneş ışığının akı yoğunluğunu artırma yolu ile yüksek sıcaklık, enerji dönüşüm verimlerine ulaşmak ve ısı enerjisi elde etmek için kullanılan bir enerji üretim yöntemidir. Akı yoğunluğu artırımı aynalar veya lensler kullanılarak büyük alanlara düşen güneş ışığının daha küçük alanlara odaklanması

ile elde edilmektedir [44]. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemleri orta ve yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmaya uygundur [45].

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinde aynalar ve aynalara bağlı olarak güneş izleyici sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerin birlikte çalışmasıyla aynaların üzerine düşen güneş ışınları tek bir noktada odaklamaktadır. Bu sistemler, doğrusal yoğunlaştırıcılar ve noktasal yoğunlaştırıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Doğrusal yoğunlaştırıcılar; frensel aynaları ve parabolik oluklu kolektörler olarak, noktasal yoğunlaştırıcılar ise merkezi alıcı sistemler ve parabolik çanak kolektörler olarak kendi aralarında da iki grupta ayrılmaktadır [46]. Çalışmamızda da tercih etmiş olduğumuz parabolik oluk tipi kolektörler, bir doğrusal yoğunlaştırıcı teknolojileri olup, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin arasında en yaygın ve en gelişmiş teknolojilerden biridir.

Parabolik güneş santralinde çizgisel yoğunlaştırma yapılarak, güneş enerjisinden yüksek sıcaklık elde edilir. Parabolik güneş kolektörleri, gelen güneş enerjisini aynalar vasıtasıyla, odakta yer alan ve boydan boya uzanan alıcı bir boruya odaklar. Enerjiyi toplamak için alıcı boruda bir sıvı dolaştırılır. Bu durum boru içerisindeki akışkanın sıcaklığının artmasını sağlar ve boru içerisindeki akışkan ısı kaynağı durumuna gelmektedir. Toplanan ısı, elektrik üretimi için enerji santraline gönderilerek güç çevrimine aktarılmaktadır [47]. Şekil 1.18’de şematik olarak gösterilmiştir.



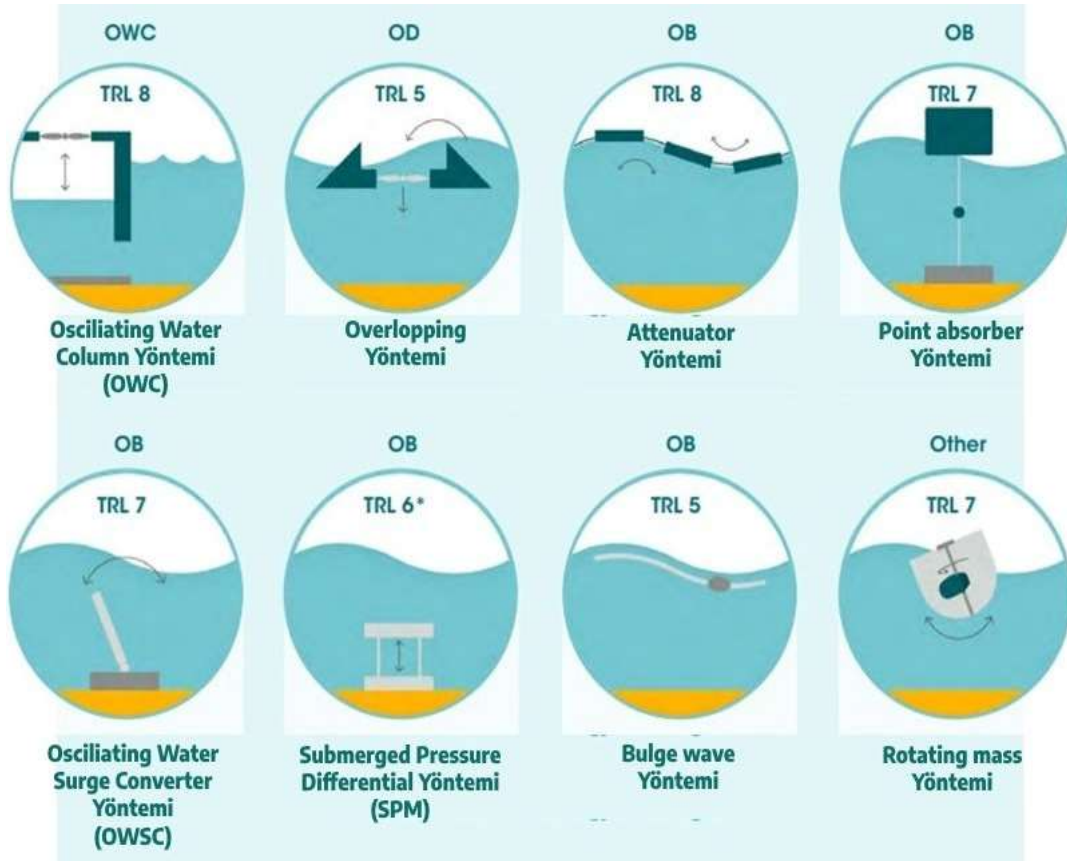
Şekil 1.18 Parabolik güneş kolektörü [48]

1.6 Dalga Enerjisinden Elektrik Üretimi

Dalga hareketlerinin oluşması, bazı dış etmenlerle (rüzgar, taşınlar, depremler, ay ve güneşin çekim kuvveti) dengesi bozulan su yüzeyinin yerçekimi etkisiyle tekrar orijinal konumuna dönmesiyle gerçekleşmektedir. Bu yüzden dalga enerjisi, rüzgar enerjisinin dolaylı bir şeklidir. Bununla birlikte, diğer etmenlerle kıyaslandığında rüzgar etkisiyle gerçekleşen deniz dalgaları daha sürekli ve düzenlidirler. Bu özelliğinden dolayı enerji eldesinde önem arz etmektedir [49]. Deniz yüzeyinde oluşan su dalgaları; karışık rastgele özelliklere sahip olup üç boyutlu karakterde periyodik su hareketleridir. Bu sebeple ifade edilen dalgaların matematiksel modellenmesi oldukça zordur. Bu tip dalgalar, yerçekimi dalgaları şeklinde ifade edilmektedir. Böylelikle, deniz yüzeyinde hafif esintilerin oluşturduğu dalgaların yer çekimi etkisi düşük olduğu görülmekte olup daha çok etkinin ise yüzey gerilim kuvvetlerinden kaynaklı olduğu ifade edilmektedir [50].

Dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren birçok sistem olmasına rağmen bunların birtakım ortak yönleri olduğu görülmektedir. Dalga enerjisinden elektrik üretimi için önce mekanik enerjiye daha sonra da mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [51]. Dalga enerjisinin en önemli avantajları; temiz, sınırsız ve ucuz enerji üretmesi, ilk yatırımından başka hiçbir girdisinin olmaması, elektrik şebekesinin olmadığı uzak alanlara elektrik sağlaması, primer enerjiye hiçbir bedel ödenmemesi, nüfus yoğunluğu kıyılarda toplanmış olan ülkemizde enerjinin üretildiği yerde tüketilebilmesi ve böylece uzun iletim hattına gerek olmaması ve santralin öngörülen enerji ihtiyacına göre boyutlandırılması, deniz ortamında yapılacak diğer çalışmalarda potansiyel teknolojinin kullanımına olanak tanınması, ileri teknoloji gerektiren, politik baskı ve ambargo malzemesi olabilecek, hiçbir girdisinin olmaması ve yoğun nüfuslu büyük şehirlerimizde ısınma amaçlı kullanılacağından, soluduğumuz havanın kalitesini yükseltecek olması ifade edilebilir [52].

Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri; kıyı şeridi boyunca, kıyıya yakın ve kıyından uzak bölgelerde uygulanan sistemler olmak üzere üç grupta toplanmakta olup şekil 1.19’da gösterilmektedir [17]. Tablo 1.3’de ise karşılaştırılması verilmiştir [53].

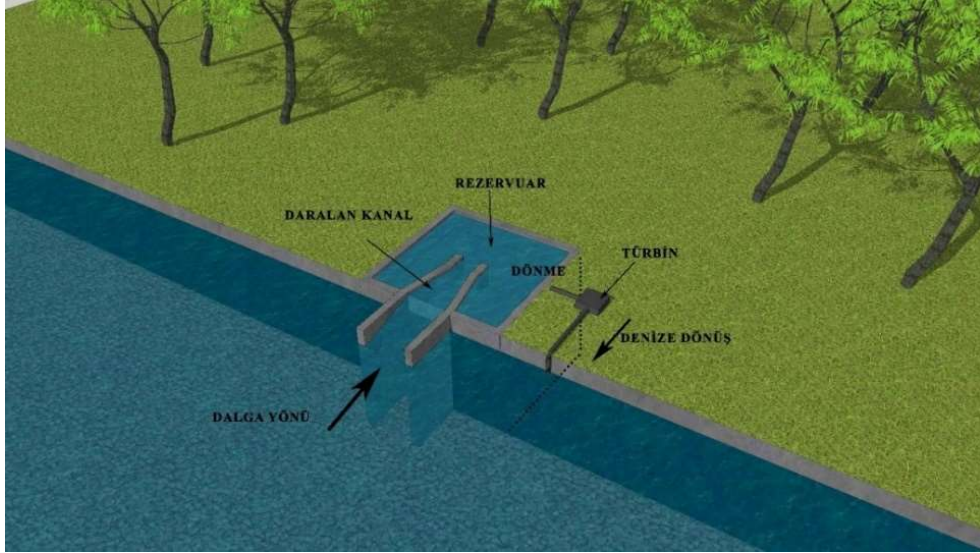


Şekil 1.19 Dalgı enerjisi dönüşüm sistemleri [17]

Tablo 1.3 Dalgı enerjisi dönüşüm sistemlerinin karşılaştırılması [53]

Uygulamalar	Yapı Tasarımı	Avantaj	Dezavantaj
Kıyı Şeridi OWC TAPCHAN Pendular	Kıyıda sabitlenmiş veya gömülü olarak uygulanır.	Bakımı kolaydır. İnşa maliyetleri daha düşüktür.	Dalgı rejimi az güce sahip dolayısıyla kazanılan enerji düşüktür.
Kıyıya Yakın Osprey WOSP 3500	10-15 m su derinliğine sahip bölgelerde uygulanır.	Üretim kapasitesi rüzgar jeneratörü eklenmesiyle artırılabilir.	İnşai maliyeti yüksektir.
Kıydan Uzak Salter's duck McCube Pelarmis	40 m ve daha fazla derinliğe sahip bölgelerde uygulanır.	Üretim kapasitesi daha yüksektir.	Uzun su altı kablolarına ihtiyaç duyulur.

Tez çalışmamızda kıyı şeridi boyunca kurulan dalga enerjisi üretim sistemi olan Tapchan yöntemi tercih edilmiştir. Tapchan sisteminin tercih edilmesinin sebebi; çok az hareketli parçası olduğundan düşük bakım maliyetine, derin su bağlantılarına ve uzun su altı elektrik kablolarına ihtiyaç olmaması, yüksek bir güvenilirliğe sahip olması, ihtiyaç duyulana kadar enerji depolanabilmesi ve inşai maliyetlerinin daha düşük olmasından dolayıdır [53]. Tapchan sistemi, yoğun ve büyük dalgalarla çalışmaktadır. Bu sistemde kıyıya gelen dalga, daralan kanala ulaştığında aynı su kütesinin, ebadının birinin değişmesi sebebiyle, kazandığı enerji ile yükselen su kütesinin rezervuarı doldurması prensibine göre çalışır. Rezervuardan Kaplan tipi türbin vasıtası ile jeneratör çalıştırılır. Sistem detaylı anlatılacak olursa, karada deniz seviyesinden yüksekte bir yerde kurulan bir rezervuar ve buna bağlı bir borudan meydana gelmektedir. Boru içinde bir türbin bulunur ve bir ucu rezervuara bağlı iken diğer ucu deniz seviyesine kadar inmektedir. Sistemde rezervuara bağlı daralan bir kanal bulunmakta olup düzgün doğrusal bir formda daralmaktadır [51]. Dalga kanalın geniş ucuna gelir ve hareket yönü gereği biraz yükselerek daralan kanala girer, dalgayı oluşturan su hacmi daralır ve sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı potansiyel enerjiye dönüşür. Kanalın diğer ucu ise rezervuara bağlı olduğu için yükselen su bu rezervuara akar. Rezervuar deniz seviyesinden yüksekte bulunduğundan dolayı rezervuardaki su potansiyel enerjiye sahiptir. Diğer tarafta rezervuara bağlı bulunan borunun içinde negatif bir basınç olmadığı için su zerrecikleri bu borudan aşağıya, deniz seviyesine inmek, fazla potansiyel enerjilerini vermek isterler. Boru içinde akan su zerrecikleri yine boru içinde yer alan ve tek bir yönde dönmesine izin verilen bir türbini döndürürler. Özetle su taneciklerinin potansiyel enerjisi türbinde kinetik enerjiye dönüştürmüş olmaktadır. Türbin bir jeneratöre bağlandığı takdirde kinetik enerjisinden elektrik elde edilebilmektedir [35]. Şekil 1.20’de Tapchan dalga enerjisi dönüşüm sisteminin şematik gösterimine yer verilmiş olup SketchUp [54] programında çizilmiştir.



Şekil 1.20 Tapchan dalga enerjisi dönüşüm sistemi

1.7 Tezin Amacı ve Motivasyonu

Enerji sistemlerinin verimli ve etkin kullanımı, ülkelerin enerji tüketiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sürekli artan enerji talebini karşılamak için enerji santrallerinin performansının iyileştirilmesi ve yenilikçi teknolojilerin kullanılması önemlidir. Güneş, rüzgar, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, kirlilik ve küresel ısınma konularıyla ilgili çevresel kaygılar nedeniyle ana veya tamamlayıcı kaynaklar olarak kullanılması önerilmektedir. Dalga, rüzgar ve güneş enerjilerinin entegrasyonu hem umut verici hem de etkili enerji çözüm seçeneklerinden biridir. Dalga, rüzgar ve güneş bazlı sistemler için gerekli teknolojilerin üretim maliyetinin düşürülmesiyle, bu sistemlerin daha uygun maliyetle uygulanabilir olması hedeflenmektedir.

Bu tezde, literatürdeki çalışmalar göz önüne alındığında ve Türkiye'nin üçte birinin denizlerle çevrili olduğu düşünüldüğünde, dalga enerjisi önemli bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak öne çıkmakta olup bu konu ile ilgili Türkiye'de yapılmış somut çalışmalar literatürde yer almamaktadır. Bu nedenle, dalga, rüzgar ve güneş enerjisini birleştiren entegre bir sistem tasarlayarak, Türkiye'deki potansiyellerinin belirlenmesi, enerji-ekserji üretim analizleri, optimizasyonu ve maliyet çalışması ile literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir. Entegre sistem için literatürdeki bilimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılan programlar tercih edilerek analiz çalışmaları yapılmıştır. Optimizasyon için ise Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) metodolojisi tercih edilmiştir. RSM, belirlenen faktörler ile yanıtlar arasındaki

ilişkilerin ortaya çıkarılmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada kullanılan RSM yönteminde Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) seçilerek hedeflenen modelin katsayılarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’de elektrik üretmek için etkili, verimli, ekonomik, sürdürülebilir, çevre dostu bir sistem tasarlayarak net sıfır hedeflerine ulaşmak ve karbonsuz enerji sistemlerine geçiş yapmaktır.

1.8 Tez Hipotezi

Türkiye’nin belirlenen il ve ilçelerinin elektrik ihtiyacının tamamını yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanması ileri sürülmüştür. Bu bağlamda elektrik üretimi için, dalga, rüzgar ve güneş enerjisi gibi Türkiye’nin sahip olduğu yüksek kapasiteli ve verimli yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde durulmuştur. Yürütülen tez çalışmasının literatüre iki ana katkısı bulunmaktadır. İlk önemli katkısı, Türkiye’nin kıyı şeridindeki entegre yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelini incelemek ve en uygun şehirleri bulmaktır. İkinci önemli katkısı, Türkiye’nin kıyı şeridinde dalga, rüzgar ve güneş enerjilerinin kapasitelerini enerji ve ekserji analizleri yoluyla entegre bir biçimde belirlemektir. Türkiye’de bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde önerilen bütünsel sistem ile ilgili literatürde bir çalışma bulunmamaktadır. Bu durum tez çalışmasının önemini ve literatüre yapacağı katkıyı vurgulamaktadır.

Türkiye’de mevcut enerji üretimi ağırlıklı olarak yenilenemeyen enerji kaynakları kullanılarak gerçekleştiği için bu tez kapsamında yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak önerilen sistemin gelecek enerji senaryosunda önemli bir yere sahip olacağına inanılmaktadır. Bundan dolayı yerel politikacılar ve hükümetler, enerji eğilimlerini ülkenin mevcut yenilenebilir enerji potansiyelleriyle uyumlu hale getirmek için farklı bölgeler için sağlanan dalga, güneş ve rüzgar enerjisi potansiyelini etkin bir şekilde kullanabilirler. Böylelikle Türkiye’nin bölgede önemli bir enerji merkezi olarak etkin bir rol oynamasına katkıda bulunabileceğine düşünülmektedir.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Rüzgar ve Güneş ile Entegre Yapılan Çalışmalar

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, elektrik üretiminin enerji ve ekserji analizleri için literatürde farklı entegre yenilenebilir enerji kaynakları mevcuttur. Özlü ve arkadaşları [55] güneş ve rüzgar hibrit çoklu enerji sistemlerinin analizi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada enerji, ekserji, ekonomi ve çevresel etkiler analiz edilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %43 ve %65 olarak hesaplanmıştır. Maksimum türbin çıkışı 48 kW, soğutma etkisi 28 kW ve ısıtma etkisi 298,5 kW'tır. Sistem sayesinde yılda 1.614 ton CO₂ tasarrufu sağlanmaktadır. Bu çoklu üretim sistemi en az 49 hanenin tüm enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Sezer ve diğerleri [56], hidrojen, oksijen ve elektrik gibi değerli ürünler üretmek için rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarını verimli bir şekilde kullanan yenilenebilir enerji odaklı çoklu üretim sistemi üzerinde çalışmıştır. Yenilikçi tasarım, sırasıyla %61,3 ve %47,8 olarak hesaplanan enerji ve ekserji verimliliği ile sürdürülebilirlik çabalarına katkıda bulunmaktadır. Al-Sharafi ve diğerleri [57] Suudi Arabistan'ın farklı yerlerinde güneş ve rüzgar enerjisi destekli elektrik ve hidrojen üretiminin tekno-ekonomik değerlendirmesini araştırmıştır. Farklı güneş radyasyonu ve rüzgar hızlarına sahip Suudi Arabistan iklimi altında elektrik ve hidrojen üretimini incelemişlerdir. En düşük enerji ve hidrojen üretim maliyetleri Abha bölgesi için 1.208 USD/kWh ve 43,1 USD/kg olarak bulunmuştur. Yılmaz ve diğerleri [5] rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarından elektrik ve hidrojen üretmek için çalışmışlardır. Bu çalışma dört alt sistemden oluşmakta olup güneş kolektörü çevrimi, ORC, rüzgar türbini gücü, hidrojen üretim ve sıkıştırma sistemleridir. Sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %21 ve %16 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, organik rankine çevrimi ve rüzgar türbini birlikte sırasıyla 195,9 kW ve 326,5 kW net elektrik üretimi sağlamıştır. Bu bulgular, önerilen tesisin çevreye duyarlı bir seçim olma potansiyelini göstermektedir. Huang ve arkadaşları [58] hibrit güneş-rüzgar sistemleri üzerine bir çalışma yürütmüş ve daha büyük bir rüzgar türbini yerine birden fazla küçük rüzgar türbini kullanan yeni bir kategoriyi tanıtmışlardır. Çok türbinli hibrit sistem ile geleneksel rüzgar türbini arasındaki elektrik gücü farkını analiz etmişlerdir. Tianjin'de karşılaştırılabilir kapasiteler

sunan ve elektrik gücü hesaplamaları için TRNSYS yazılımını kullanan iki hibrit rüzgar-güneş sistemi geliştirilmiştir. Çalışma, çok türbinli hibrit sistemin referans sisteme kıyasla daha düşük rüzgar hızlarında daha fazla güç sağladığı sonucuna varmıştır. Kaabeche ve diğerleri [59] hibrit bir PV-rüzgar enerji sisteminin termodinamiğini, ekonomisini ve optimizasyonunu analiz etmiştir. Çalışma, güç kaynağı açıklarını, net maliyetleri, fazla güç üretimini, yıllık maliyetleri ve başa baş mesafelerini dikkate alarak hibrit PV-rüzgar sistemi için yinelemeli bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Araştırmacılar, teknik ve ekonomik güvenilirlik gereksinimlerini karşılamak için bir batarya bankası kullanarak PV-güneş enerjisi hibrit sistemini optimize etmişlerdir.

Ayrıca, Karapekmez ve diğerleri [22] daha yüksek çevresel ve sistem performansı ana hedefi ile yenilenebilir tabanlı bir enerji sistemi geliştirmek için rüzgar, güneş ve jeotermal enerji kaynaklarından oluşan entegre bir sistemi incelemişlerdir. Enerji ve ekserji yaklaşımı kullanılarak kapsamlı bir termodinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Sistemin enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %52,97 ve %55,69 olarak hesaplanmıştır.

2.2 Rüzgar, Güneş ve Dalga Enerjisinden Bütünleşik Entegre Formda Yapılan Çalışmalar

Entegre biçimde kullanılan rüzgar ve güneş enerjisinin yanı sıra dalga enerjisinin kullanımı üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Roy ve arkadaşları [18] uzak deniz alanlarının elektrik enerjisi temini üzerine çalışmışlardır. Bu makale, uzak deniz alanlarında elektrik enerjisi sağlayabilecek farklı kaynaklar olan dalga, gelgit, rüzgar ve güneş enerjilerinin temel özelliklerini sunmaktadır. Bu çalışma, sadece endüstriyel projeleri değil, aynı zamanda ilgili kavramları ve araştırma çalışmalarını da kapsayarak deniz enerjilerini kullanan çok kaynaklı sistemlere odaklanmaktadır. Lavidas ve diğerleri [60] Yunanistan'ın en kalabalık kentsel kıyı şeridinin bir parçası olan Saronik Körfezi'nde çoklu yenilenebilir enerji kaynaklarını incelemiştir. Dalga, rüzgar ve güneş enerjisi kaynakları analiz edilmiş ve enerji üretimini etkileyen uzun vadeli özellikleri karşılaştırılmıştır. Özellikle rüzgar ve dalgaların zamansal örtüşmesi ile farklı kaynaklardan çoklu üretimin kesintili üretimi azaltacağı ve dolayısıyla enerji iletimini hızlandıracağı düşünülmektedir. Kumar ve diğerleri [61] dalga, rüzgar, güneş ve batarya enerji

depolama sistemleri gibi entegre yenilenebilir enerji kaynaklarını incelemiştir. Kayıpları azaltmak için ekonomik ve emisyon yük dağılımını (CEED) birleştirmeyi amaçlayan, gün öncesi talep tarafı yönetimi (DSM) ile entegre bir hibrit güç yönetimi algoritması (PMA) tanıtmışlardır. Halamay ve diğerleri [62] okyanus dalga enerjisi, rüzgar enerjisi, güneş enerjisi üretimi ve şebeke yükü değişimleri arasındaki etkileşimi analiz etmiştir. Sonuçlar, çeşitlendirilmiş bir değişken yenilenebilir enerji karışımının şebeke rezerv gereksinimlerini azaltabileceğini ve değişkenliği azaltmaya yardımcı olabileceğini vurgulamıştır. Ibrahim ve diğerleri [15] elektrik üretmek için dalga, rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarını kullanan hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi geliştirmeyi amaçlamıştır. Hibrit sistem, Malezya Terengganu Üniversitesi (UMT) kampüsüne yakın kıyı bölgesinde kurulmuş ve test edilmiştir. Ölçüm sonuçları, mevcut dalga, rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının elektrik ihtiyacını önemli ölçüde karşılamak için entegre bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. M. Talaat ve diğerleri [63] dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinin entegre edilmesinin fizibilitesini incelemişlerdir. Bu çalışmada, üç yenilenebilir enerji kaynağı kıyıya yakın bir konut binasına güç sağlamak için kullanılmıştır. Enerji üretim sürecini etkileyen faktörlerin değişkenliği nedeniyle entegre bir sistem daha güvenilir olacak şekilde tasarlanmıştır. H. Lund [64] dalga enerjisi, rüzgar enerjisi ve PV'nin Danimarka referans enerji sistemine büyük ölçekli entegrasyonunu incelemiştir. Dalgalanan yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin elektrik arzına entegre edilmesindeki sorunları analiz etmiştir. Teknik olarak en uygun optimum kombinasyon belirlenerek sistem entegre edildiğinde elektrik üretimi incelenmiştir. Qu ve diğerleri [65] yüzer rüzgar türbini, PV ve dalga enerjisi dönüştürücüleri kullanan hibrit bir yüzer sistem tasarlamıştır. Tasarım, yüzer temelin kaldırma kuvvetini artırmak için bir ızgara sistemi içermektedir. Widen ve diğerleri [66] önceki araştırmalara dayanarak güneş, rüzgar, dalga ve gelgit enerji kaynaklarının değerlendirilmesi, değişimi ve tahmini üzerine bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışma, her bir alandaki bilgi durumunu özetlemeyi ve ilgili kaynaklar için kullanılan yaklaşımları karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Reikard ve diğerleri [67] rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklarının yanı sıra dalga enerjisinin elektrik şebekesine entegrasyonunu araştırmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nin Kuzeybatı Pasifik bölgesi bu üç enerji kaynağının elverişli bir kombinasyonuna sahiptir. Yük ve rüzgar gücü serileri hükümet veri tabanlarından elde edilirken, güneş enerjisi beş eyaletteki 12 noktadan alınan veriler

kullanılarak belirlenmiştir. Dalga enerjisi şamandıra verileri, ECMWF modeli simülasyonları ve üç tip dalga enerjisi dönüştürücüsü için güç matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır. Analiz iki önemli sonuca yol açmaktadır. İlk olarak, yenilenebilir enerji jeneratörlerinin coğrafi dağılımı, yerel gürültüyü ortalama hale getirme eğilimindedir ve bu da güç tahminini daha yönetilebilir hale getirir. Buna ek olarak, dalga gücünün tahmin edilmesi rüzgar veya güneş enerjisine göre önemli ölçüde daha kolaydır. Subekti ve diğerleri [68] geniş alanlar için temiz, yenilenebilir enerji üretmeyi amaçlayan dalga ve rüzgar enerjisini birleştiren hibrit enerji santrallerinin tasarımını araştırmıştır. Dikey okyanus dalga enerjisi, doğru akım jeneratörlerine bağlı dönen türbinler tarafından basınçlı su enerjisine dönüştürülür. Eş zamanlı olarak rüzgar türbinleri de doğru akım jeneratörlerine bağlanır. Araştırma ve geliştirme teknikleri sayesinde doğru akım jeneratörleri, okyanus dalga enerjisi jeneratöründen gelen elektrik enerjisi dalgalanmalarının kararlılığını artırmaktadır. Hibrit enerji santralinin tasarım hesaplaması, 0,0054 m³/s deşarj ve 65 m yüksekliğe sahip okyanus dalgalarının 2 kW elektrik enerjisi üretebileceğini göstermektedir.

Pennoek ve diğerleri [69] Büyük Britanya'da güvenilir ve yüksek güç üreten yenilenebilir enerji kaynakları olan dalga, gelgit, rüzgar ve güneş enerjisini incelemiştir. Çalışma, bu enerji kombinasyonlarının zamansal tamamlayıcılığını ve arz-talep dengeleme gereksinimlerini ölçmenin yanı sıra bu sistem faydalarının potansiyel büyüklüğünü araştırmak için on ölçüt kullanmıştır. Çalışma, gelgit ve dalga üretiminin yenilenebilir enerji karışımına dahil edilmesinin, çeşitli koşullarda kullanılabilirliğini artırdığını ortaya koymuştur. Araştırma, bir yıl boyunca yoğun talep, ardışık saatlik dönemler ve rüzgar-güneş enerjisi üretiminin mevcut olmadığı zamanlarda üç bölgesel vaka çalışması yürütmüştür. Her üç bölgesel vaka çalışması da deniz enerjisinin dahil edilmesinin bölgesel arz-talep eşleşmesini geliştirdiğini, enerji kıtlıklarını ve fazlalıklarını azalttığını ve Büyük Britanya'da özellikle kısıtlı yerlerde iletim tıkanıklığını potansiyel olarak hafiflettiğini göstermektedir. Jacobson ve diğerleri [70] elektrik, ulaşım ve ısıtma/soğutma talebini karşılamak için rüzgar, su ve güneş ışığı gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını analiz etmiştir. Sistemin özelliklerini, mevcut ve gelecekteki enerji talebini, kaynak mevcudiyetini, cihaz miktarını, alan ve malzeme gereksinimlerini incelemiştir. Çalışma, dünyanın enerji talebinin %30 oranında azaltılabileceğini, buna karşılık

arazi kullanımında sadece küçük bir artış (ayak izi için %0,41 ve alan için %0,59) gerekeceğini öne sürmektedir. Yazarlar, 2030 yılına kadar rüzgar, su (dalga) ve güneş kaynaklarından enerji üretilmesini önermektedir. Bu geçişin önündeki engellerin teknolojik ya da ekonomik olmaktan ziyade sosyal ve politik olduğunu savunmaktadırlar. Astariz ve diğerleri [71] dalga, gelgit ve açık deniz rüzgar enerjisinin ekonomik bir analizini yapmıştır. Çalışma, dalga, gelgit ve açık deniz rüzgar enerjisi için seviyelendirilmiş maliyetlerin sırasıyla 225 Euro/MW, 190 Euro/MW ve 165 Euro/MW olduğunu bulmuştur. Bu sonuçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının geleneksel enerji kaynaklarına göre daha yüksek enerji maliyetine sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, entegre sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarının ortak gelişimini hızlandırdığını, sürdürülebilir kullanımı teşvik ettiğini ve kaynağa özgü değişkenlikten kaynaklanan arz belirsizliklerini azalttığını öne sürmektedir. Astariz ve diğerleri [72] dalga ve açık deniz rüzgar enerjisi arasındaki entegrasyona, gölge etkisine ve rüzgar türbinlerinin artan erişilebilirliğine odaklanarak dalga enerjisi ekonomisinin bütünsel bir analizini yapmıştır. Azzellino ve diğerleri [73], dalga ve açık deniz rüzgar yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen güç çıkışını yumuşatmanın yanı sıra işletme ve bakım maliyetlerini azaltarak ekonomik uygulanabilirliklerini iyileştirme potansiyelini incelemiştir. Yazarlar ayrıca bir mekansal planlama yaklaşımı kullanarak İtalyan denizlerinde açık deniz rüzgar türbinleri ve dalga enerjisi dönüştürücülerinin birlikte konumlandırılması olasılığını analiz etmişlerdir. Çalışma, dalgalar ve rüzgarların genellikle güçlü bir şekilde bağımlı olmasına rağmen, bağımlılığın daha düşük olduğu ve daha ilginç birleşik enerji üretimi ile sonuçlanan durumlar olduğunu belirtmektedir. Entegre sistem için en uygun alanlar Elba adasının güneyindeki Tiren kıyıları, kuzeybatı Sardunya kıyıları ve güney Adriyatik ve İyonya kıyı sularıdır. Ayrıca, Shi ve diğerleri [74], maliyet ve çevresel etkiyi en aza indirmeye odaklanarak deniz yenilenebilir enerji sektörünün geliştirilmesi için potansiyel ilgi alanlarını belirlemek amacıyla optimize edilmiş bir içi boş silindirik dalga enerjisi dönüştürücüsü (WEC) kullanan entegre bir rüzgar dalga enerjisi sisteminin dinamik güç ve yük etkisi performansını araştırmıştır. Optimize edilmiş bir dalga enerjisi dönüştürücüsüne sahip 5 MW'lık bir yarı dalgıç rüzgar türbininin simülasyonunu yapmak için açık kaynaklı F2A kodu kullanılarak sayısal bir model oluşturulmuştur. Entegre platform üzerindeki hidrodinamik yükler, AQWA hidrodinamik kodu kullanılarak potansiyel akış teorisine göre hesaplanmıştır.

Dalga enerjisi dönüştürücüsünün şekil optimizasyonu boyutsuz optimizasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve optimum değer diferansiyel evrim algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Makale, dalga enerjisi dönüştürücü optimizasyonu olan ve olmayan entegre sistemin zaman alanı ve istatistiksel yanıtlarını karşılaştırmaktadır. Bu makale, açık deniz rüzgar ve dalga enerjisi entegre sistemlerinin optimum tasarımının elde edilmesine rehberlik etmiş ve üretilen dalga enerjisi gücünde optimum tasarımların kullanılmasının faydalarını ölçerek kolaylık sağlamıştır. Yang ve diğerleri [75] dalga ve rüzgar enerjisini aynı anda toplayabilen hibrit bir enerji üretim sisteminin tasarımını ve geliştirilmesini incelemiştir. Sistem hem dikey hem de yatay dalga enerjisinin yanı sıra rüzgar enerjisini de toplayabilmesi açısından benzersizdir. Sistem hem dalga hem de rüzgar enerjisini 5kW'lık sabit miktatıslı bir jeneratörle kinetik enerjiye dönüştürebilmekte ve bu enerji daha sonra elektrik üretmek için kullanılmaktadır.

Sağlam ve diğerleri [76] Türkiye'nin dalga enerjisi potansiyelinin 4-17 kW/m dalga gücü aralığında kullanılabilir bir kaynak olarak yaklaşık 10 TWh/yıl olduğunu belirtmiştir. İstanbul Boğazı'nın kuzeyi, Batı Karadeniz bölgesi ve Ege Denizi'nin güneybatı kıyıları (Marmaris ve Finike arası) dalga enerjisi için en iyi yerler olarak önerilmiştir. Özdamar ve diğerleri [77] Çeşme-İzmir'e odaklanarak Türk sularındaki potansiyel dalga enerjisini ve ilgili maliyetleri araştırmıştır. Çeşme, deniz dalgası oluşumuna önemli ölçüde katkıda bulunan bol rüzgarıyla ünlüdür. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü 05.11.1998 ile 05.11.1999 tarihleri arasında Çeşme'de 10 metre yükseklikte rüzgar hızı ölçümleri yapmıştır. Ölçülen değerler deniz seviyesinden 19,5 m yükseklikte alınmıştır. Pierson-Moskowitz dalga enerjisi spektrumunu uygulayan ekip, yıl boyunca bölgedeki dalga enerjisi potansiyelini belirlemek için analiz yapmıştır. Dalga enerjisindeki aylık değişimler değerlendirilmiş ve veriler, ölçüm alanına kurulacağı varsayılan 1 m genişliğinde bir türbin tarafından üretilen elektriğin birim maliyetini hesaplamak için kullanılmıştır. Özkop ve diğerleri [53] önceki çalışmaları sistem bileşenlerine göre özetleyip kategorize ederek dalga enerjisi dönüşümü teknolojilerine yeni bir bakış açısı getirmiştir. Bu yaklaşım, son yirmi yılda dalga enerjisi dönüşümü teknolojilerinin performansını, verimliliğini ve ilerlemesini etkili bir şekilde sergilemektedir. Araştırma, dalga enerjisi dönüştürücü tiplerini, jeneratör hareketini, kontrol tekniklerini ve güç elektroniği dönüştürücülerini kapsayan bir

WEC sistemi içindeki çeşitli unsurların birbiriyle ilişkili doğasını göstermektedir. Sonuç olarak, etkili optimizasyon tüm bileşenlerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmekte ve hiçbir unsurun tek başına optimize edilmemesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, WEC sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapıldığını göstermektedir. Bu makalenin yazarları, burada sunulan anket ve analizin araştırma camiasına ve yatırımcılara dalga enerjisinden elektrik üretiminin gelişim sürecini hızlandırmada yardımcı olacağını öngörmektedir. Ishaq ve diğerleri [78] temiz hidrojen üretimi için üç farklı yenilenebilir enerji yöntemini, Okyanus Termal Enerji Dönüşümü (OTEC), rüzgar ve güneş enerjisini incelemiştir. Bu çalışma, temiz OTEC tabanlı bir hidrojen üretim sistemi geliştirmenin ve pratik uygulamalar için uygulamanın değerini göstermektedir. Hidrojen üretimi için rüzgar enerjisine dayalı metodolojinin toplam enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla yaklaşık %33,51 ve %32,7'dir. Okyanus termal enerji dönüşümüne dayalı sistem için bu oranlar sırasıyla yaklaşık %5,61 ve %13,6'dır. Güneş enerjisine dayalı termokimyasal çevrim için verimlilikler sırasıyla yaklaşık %32,7 ve %33,2 olarak bulunmuştur.

3

BÜTÜNLEŞİK SİSTEM TASARIMI ve ANALİZLER

3.1 Sistem Tanıtımı

Bu çalışma, elektrik üretimi için yenilenebilir enerji tabanlı üç metodoloji sunmaktadır. Sistem tasarımının birincil amacı, çevreye zarar vermeden elektrik de dahil olmak üzere bir dizi değerli kaynak üretmektir. Enerji sistemi tasarımı, sistemi çalıştırmak için dalga, rüzgar ve güneş enerjisini kullanarak yalnızca yenilenebilir kaynaklara dayanmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerindeki yedi ilin seçilen ilçelerinde (Antalya, Çanakkale, İstanbul, İzmir, Kastamonu, Kırklareli, Muğla) dalga, rüzgar ve güneş potansiyeli; dalga verileri, rüzgar hızları, güneşlenme süreleri ve global radyasyon değerleri açısından belirlenmiştir. Şekil 3.1'de belirlenen yedi ilin seçilen ilçeleri şu şekildedir: Antalya (Kaş), Çanakkale (Ayvacık), İstanbul (Şile), İzmir (Urla), Kastamonu (Doğanyurt), Kırklareli (Demirköy) ve Muğla (Datça).



Şekil 3.1 Türkiye'nin farklı bölgelerindeki şehirler (Türkiye Haritası) [79]

Türkiye dalga enerjisi verilerine baktığımızda, 26°-45° doğu meridyenleri ile 36°-42° kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Seçilen bölgelerin dalga, güneş ve rüzgar enerjisi verileri, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı

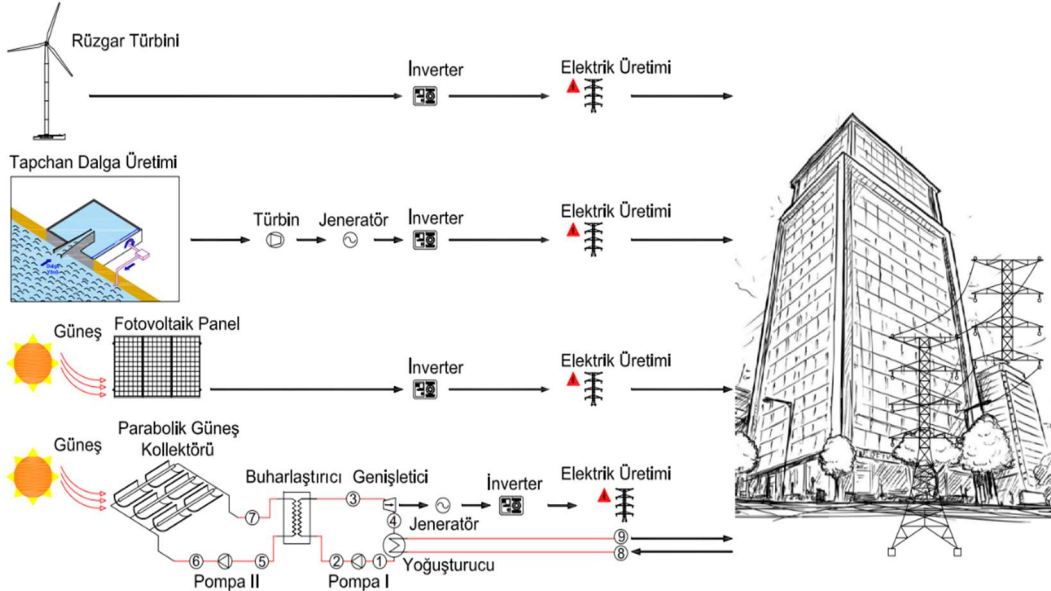
Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün bağlı olduğu Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi'nin (ECMWF) hava tahmin modeli olan ERA5 veritabanından [80, 81], T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası [82], PV*SOL (Meteonorm veritabanı) [83, 84] ve National Renewable Energy Laboratory (NREL) System Advisor Model'den (SAM) (Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS-SARAH2 veritabanı) [48,85] alınmıştır. Dalga ve rüzgar enerjisi hesaplamaları ERA5 veritabanında son beş yılın aylık verileri alınarak yapılmış olup Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Hava tahmini modeli verileri grid bazında çalışmaktadır. Gridler 0,5 derece enlem ve boylam frekansı ile kaydedilmiştir. Her grid noktası için enlem-boylam, rüzgar ve dalga verileri sunulmaktadır. ERA5, 30 km'lik bir ızgara üzerinde çok sayıda atmosferik, kara ve okyanus iklim değişkeninin saatlik tahminlerini sağlar ve atmosferi yüzeyden 80 km'ye kadar 137 seviye kullanarak çözer. Azaltılmış mekânsal ve zamansal çözünürlüklerde tüm değişkenler için belirsizlik bilgileri dahil edilmiştir. Fotovoltaik sistemden elektrik üretmek için hesaplamalar PV*SOL program ile yapılmıştır. PV*SOL, Meteotest tarafından geliştirilen ve güneş enerjisi endüstrisinde yaygın olarak kabul gören ve kullanılan bir güneş radyasyonu veri kaynağı olan Meteonorm veri kaynağını kullanmaktadır. Güneş enerjisi simülasyonları için standart meteorolojik veri tabanı haline gelmiştir. Ayrıca, parabolik bir güneş kolektörü sisteminden elektrik üretmek için ise SAM Yöntemi kullanılmıştır. Seçilen şehirler için veriler, güneş enerjisi endüstrisinde yaygın olarak kabul gören ve kullanılan bir güneş radyasyonu veri kaynağı olan PVGIS'ten elde edilmiştir. PVGIS, Kuzey ve Güney Kutupları hariç, dünyadaki herhangi bir yer için güneş radyasyonu ve fotovoltaik sistem performansı hakkında bilgi sağlamaktadır. PVGIS, Avrupa'yı kapsayan ve yaygın olarak kullanılan PVGIS-SARAH2 güneş radyasyonu verileri de dahil olmak üzere çeşitli veri tabanları kullanmaktadır. Ayrıca, Meteonorm ve PVGIS'ten elde edilen tüm güneş verileri T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı GEPA tarafından doğrulanmıştır.

Bu veriler kullanılarak Türkiye'nin farklı bölge ve şehirlerinde (Antalya, Çanakkale, İstanbul, İzmir, Kastamonu, Kırklareli, Muğla) kuracağımız sisteme göre elde edilecek güç miktarı bulunmuştur.

Grid Numarası	Boylam (26°45'0")	Enlem (36°42'0")	Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Maksimum Rüzgar Hızı (m/s)	Ortalama Dalg Periyodu (s)	Maksimum Dalg Periyodu (s)	Ortalama Dalg Yüksekliği (m)	Maksimum Dalg Yüksekliği (m)
989	26.0	38.0	6.24	12.94	3.94	5.93	0.80	2.36
1109	26.0	39.0	5.21	11.42	3.74	5.84	0.67	2.02
1169	26.0	39.5	5.90	12.53	3.70	5.82	0.66	2.05
1229	26.0	40.0	6.49	13.59	3.59	5.68	0.79	2.51
1289	26.0	40.5	5.85	12.65	3.22	5.06	0.57	1.81
810	26.5	36.5	7.06	14.02	4.48	6.17	1.05	2.75
870	26.5	37.0	7.15	14.26	4.21	6.02	0.99	2.69
990	26.5	38.0	6.90	14.15	3.64	5.44	0.72	2.15
811	27.0	36.5	7.00	14.20	4.37	6.10	0.99	2.68
871	27.0	37.0	7.03	14.44	3.97	5.64	0.83	2.37
991	27.0	37.5	6.37	13.38	3.84	5.27	0.67	1.82
812	27.5	36.5	6.38	13.51	4.11	5.71	0.81	2.28
753	28.0	36.0	4.44	10.41	4.32	6.27	0.63	1.82
1293	28.0	40.5	4.92	10.97	3.12	5.20	0.59	2.11
754	28.5	36.0	5.37	13.22	4.16	6.21	0.74	2.34
814	28.5	36.5	4.67	11.81	3.62	5.72	0.53	1.86
1294	28.5	40.5	4.58	10.55	2.98	4.90	0.52	1.87
1474	28.5	42.0	6.06	13.18	4.43	6.99	0.92	2.89
755	29.0	36.0	5.24	13.26	4.19	6.33	0.75	2.36
815	29.0	36.5	2.75	7.92	3.78	5.99	0.46	1.52
1415	29.0	41.5	5.84	12.32	4.44	7.13	0.86	2.78
756	29.5	36.0	4.72	12.06	4.25	6.46	0.72	2.15
1416	29.5	41.5	5.69	12.24	4.47	7.19	0.87	2.81
757	30.0	36.0	4.18	11.67	4.32	6.60	0.70	2.09
1417	30.0	41.5	5.61	12.67	4.49	7.20	0.86	2.79
1483	33.0	42.0	4.75	11.17	4.44	7.01	0.81	2.40
764	33.5	36.0	4.88	12.33	4.22	6.67	0.67	2.08
1484	33.5	42.0	4.75	11.15	4.41	7.00	0.76	2.33
765	34.0	36.0	4.83	12.47	4.17	6.45	0.68	2.14
1485	34.0	42.0	4.33	10.93	4.41	6.97	0.74	2.28
766	34.5	36.0	4.62	11.95	4.13	6.31	0.67	2.17
826	34.5	36.5	3.45	9.32	3.56	5.68	0.41	1.37
1486	34.5	42.0	4.15	10.46	4.39	6.90	0.72	2.24
767	35.0	36.0	4.67	11.49	4.10	6.29	0.68	2.19

Şekil 3.2 Türkiye'nin farklı boylam ve enlemlerinde dalg periyodu, dalg yükseklikleri ve rüzgar hızı [81]

Modellenen sistem rüzgar, okyanus (dalg) ve güneş enerjisinden yararlanarak elektrik üretimi ve optimizasyon için tasarlanmıştır. Şekil 3.3'deki sistemin modellenmesi Microsoft Visio [86] kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.3 Sistem modeli

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, mevcut sistem rüzgar türbini, Tapchan dalg üretim yöntemi, fotovoltaik panel (PV) ve parabolik güneş kolektörü sisteminden oluşmaktadır. Sistem tasarımında Engineering Equation Solver (EES) [87] yazılım

programı kullanılarak entegre sistemin termodinamik modellemesi ve denklemleri ile enerji ve ekserji yaklaşımları açısından termodinamik analizi yapılmıştır. Ayrıca PV sistemi için PV*SOL ve parabolik güneş kolektörü sistemi için National Renewable Energy Laboratory System Advisor Program (SAM) kullanılmıştır. Belirlenen bölgelerde dikkate alınan kıyı uzunlukları göz önünde bulundurularak rüzgar, dalga ve güneş enerjisinden üretilebilecek yıllık toplam elektrik gücü hesaplanmıştır.

Bu tasarımda, Türkiye’de dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesinden yola çıkılarak, deniz kıyı şeridinde elektrik üretim tesislerinin kurulması için belirlenen her lokasyonda aynı ve farklı kıyı uzunlukları belirlenerek model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen potansiyel elektrik gücü farklı senaryolara göre analiz edilmiştir. Santralin kurulacağı yerin coğrafi yapısı, rakımı ve çevresel faktörleri göz önünde bulundurularak sistem tasarımı ve planlaması yapılmıştır.

3.2 Entegre Sistemin Termodinamik Eşitlikleri ve Analizi

Bu bölümde, tasarlanan entegre sistemin enerji ve ekserji performans analizlerine göre termodinamik modellemesi ve denklemleri verilmektedir. Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak enerji ve ekserji yaklaşımları açısından bir termodinamik analiz yapılmıştır.

3.2.1 Rüzgar Türbini Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi

Rüzgar türbininden elde edilen güç aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \eta_{wt} \rho_{hava} A_{wt} C_{p,wt} V^3 \quad (3.1)$$

Rüzgar türbini gücü (P_{wt}), havanın yoğunluğu ($\rho_{hava}(\text{kg/m}^3)$), verim (η_{wt}), hız ($V(\text{m/s})$) ve türbin güç katsayısı ($C_{p,wt}$) olarak ifade edilmektedir [88].

Rüzgar türbininden elde edilen ekserji aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\dot{E}x_{wt} = \frac{1}{2} \rho_{hava} A_{wt} V^3 \quad (3.2)$$

Ekserji verimliliği aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\eta_{wt} = \frac{P_{wt}}{\dot{E}x_{wt}} \quad (3.3)$$

Rüzgar türbininin ekserji yıkımı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\dot{E}x_{yıkım,wt} = \left(\frac{1}{C_{p,wt}} \right) P_{wt} \quad (3.4)$$

3.2.2 Fotovoltaik Sistemin (PV) Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi

PV sistemlerin, Termodinamiğin 1. ve 2. yasasına göre enerji ve ekserji analizleri verilmiştir. PV sistemin enerji dengesi Denklem 3.5’de belirtilmektedir [89].

$$En_{PV} = En_{PV,elektrik} + En_{PV,termal} \quad (3.5)$$

$En_{PV,elektrik}$, ile PV sisteminin elektrik üretimi, $En_{PV,termal}$, ile ise sistemin ısı kayıpları temsil edilmiştir.

$$En_{PV,elektrik} = V_{oc} I_{sc} \quad (3.6)$$

V_{oc} açık devre voltajını, I_{sc} kısa devre akımını göstermektedir.

$$En_{PV,termal} = h_{ca} A_c (T_c - T_a) \quad (3.7)$$

PV sisteminin çevreye olan ısı kayıpları Denklem 3.7’de verilmiştir.

PV sistemin toplam enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$En_{PV} = V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A_c (T_c - T_a) \quad (3.8)$$

PV sistemin enerji verimliliği de, çıktı enerjisinin yani elektrik ve termal enerjinin toplamının, PV yüzey üzerine ulaşan güneş enerjisine oranı olarak tanımlanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\eta_{PV} = \frac{En_{PV}}{I_s x A_c} = \frac{V_{oc} I_{sc} + h_{ca} A_c (T_c - T_a)}{I_s x A_c} \quad (3.9)$$

Normalde PV panellerden sadece elektrik üretme açısından faydalandığından, verimlilik için sadece elektrik enerjisine dönüşen kısım alınır. $E_{PV,E}$, sistem tarafından bir gün boyunca üretilen enerjinin Wh cinsinden değeridir. PV sistemin günlük elektrik verimi aşağıda verilmektedir.

$$\eta_{PV,D} = \frac{E_{PV,E}}{E_s} \quad (3.10)$$

PV sistem tarafından üretilen elektrik ekserjisi, mevcut enerjinin olabildiğince tamamını faydalı olarak kullanmayı hedeflemektedir. Ekserji dengesi Denklem 3.11’de verilmiştir.

$$x_{PV} = Ex_{PV,elektrik} - Ex_{PV,termal} - Ex_{PV-d,elektrik} \quad (3.11)$$

Burada $Ex_{PV,elektrik}$, PV sisteminin elektrik ekserjisini, $Ex_{PV-d,elektrik}$, ve $Ex_{PV,termal}$, sırasıyla iç ve dış ekserji kayıplarını temsil etmektedirler.

$$Ex_{PV,elektrik} = V_{oc}I_{sc} \quad (3.12)$$

$$Ex_{PV-d,elektrik} = V_{oc}I_{sc} - V_mI_m \quad (3.13)$$

$$Ex_{PV,termal} = (1 - T_a/T_c)x[h_{ca}A_c(T_c - T_a)] \quad (3.14)$$

PV sistemlerin ekserji verimi, PV sistemin ekserji değerinin PV sistem yüzeyine gelen güneş radyasyonunun ekserji değerine oranı ile hesaplanmaktadır.

$$\psi_{PV} = \frac{Ex_{PV}}{Ex_{güneş}xA_c} = \frac{V_mI_m - (1 - T_a/T_c)x[h_{ca}A_c(T_c - T_a)]}{[(1 - T_a/T_s)xI_s]xA_c} \quad (3.15)$$

Denklem 3.16'daki $Ex_{güneş}$ kolektöre gelen güneş ışıınının ekserjisidir. En sade haliyle bu değer, Denklem 3.17'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Ex_{güneş} = \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)xQ_s \quad (3.16)$$

$$\frac{T_s}{T_s^*} = 0,9562 + 0,2777\ln\left(\frac{1}{f}\right) + 0,0511f \quad (3.17)$$

3.2.3 Parabolik Güneş Kollektörü Sisteminin Termodinamik Enerji ve Ekserji Analizi

Parabolik güneş kolektörü sisteminin genel termodinamik denge eşitlikleri olan kütle, enerji, entropi ve ekserji ifadeleri aşağıda sunulmaktadır.

Pompa1 için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.18)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_1h_1 + \dot{W}_{P-I} = \dot{m}_2h_2 \quad (3.19)$$

Entropi Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_1s_1 + \dot{S}_{gen,P-I} = \dot{m}_2s_2 \quad (3.20)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_1 ex_1 + \dot{W}_{P,I} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}x_{d,P,I} \quad (3.21)$$

Isı değiştiricisi (evaporator) için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 ; \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (3.22)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (3.23)$$

Entropi Dengesi Eşitliği.:

$$\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{gen,HEX} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_5 s_5 \quad (3.24)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{d,HEX} \quad (3.25)$$

Türbin için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (3.26)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{W}_T \quad (3.27)$$

Entropi Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{gen,T} = \dot{m}_4 s_4 \quad (3.28)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{W}_T + \dot{E}x_{d,T} \quad (3.29)$$

Kondenser için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 ; \dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (3.30)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_9 h_9 \quad (3.31)$$

Entropi Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\text{gen,con}} = \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_9 s_9 \quad (3.32)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_8 ex_8 = \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{d,\text{con}} \quad (3.33)$$

Pompa-II için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (3.34)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{P_II} = \dot{m}_6 h_6 \quad (3.35)$$

Entropi Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{gen,P_II}} = \dot{m}_6 s_6 \quad (3.36)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_{P_II} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{d,P_II} \quad (3.37)$$

Güneş kolektörü için kütle, enerji, entropi ve ekserji eşitlikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Kütle Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (3.38)$$

Enerji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_6 h_6 + \dot{Q}_{\text{güneş}} = \dot{m}_7 h_7 \quad (3.39)$$

Entropi Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{\text{gen,sc}} = \dot{m}_7 s_7 \quad (3.40)$$

Ekserji Dengesi Eşitliği:

$$\dot{m}_6 ex_6 + \dot{Q}_{güneş} \left(1 - \frac{T_0}{T_{sc}}\right) = \dot{m}_7 ex_7 + \dot{E}x_{d,sc} \quad (3.41)$$

3.2.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Termodinamik Analizi

Deniz dalgalarında enerji dalgalanmaları gözlemlenebilir. Dalga enerjisinde, okyanus dalgalarındaki enerji elektriğe dönüştürülür. Dalgalardan elde edilen elektrik gücü, dalgaların genliğine ve periyoduna bağlıdır. Dalgalardan üretilen güç, genliğin karesiyle orantılı olduğundan, dalga genliğinin güç çıkışı üzerinde hareket periyodundan daha fazla etkisi vardır [90].

Dalga boyu (λ/m) ile periyot (s) arasındaki ilişki aşağıdaki ifade ile belirtilmektedir:

$$\lambda = 1.56\tau^2 \quad (3.42)$$

Hareket eden dalga aşağıdaki ifade ile belirtilmektedir:

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\tau}t\right) \quad (3.43)$$

Genlik (a), dalga boyu (λ), deniz seviyesinden yükseklik (y), zaman (t), yatay koordinat (x), periyot (τ) olarak ifade edilmektedir:

$$w = \frac{2\pi}{\tau}, \tau = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}}, w = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \quad (3.44)$$

Dalga hızı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$V = \frac{\lambda}{\tau} \quad (3.45)$$

Toplam dalga enerjisi, potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamı olarak aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$E_{dalga} = E_{KE} + E_{PE} \quad (3.46)$$

Birim alan başına düşen kinetik ve potansiyel enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$E_{KE} = \frac{1}{4}\rho a^2 g, E_{PE} = \frac{1}{4}\rho a^2 g, E_{dalga} = \frac{1}{4}\rho a^2 g + \frac{1}{4}\rho a^2 g = \frac{1}{2}\rho a^2 g \left(\frac{J}{m^2}\right) \quad (3.47)$$

Son olarak, birim zamandaki dalga enerjisi, frekans ve Denklem (3.47) ile çarpılarak elde edilebilmektedir.

$$\dot{E}_{dalga} = \frac{1}{2} f \rho a^2 g = \frac{1}{2\tau} \rho a^2 g \quad (3.48)$$

Dalganın enerji potansiyeli aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$w_{potansiyel} = \frac{1}{2} \rho a^2 g \quad (3.49)$$

Dalganın güç potansiyeli aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\dot{w}_{potansiyel} = \frac{E_{TE}}{\tau} = \frac{1}{2\tau} \rho a^2 g \quad (3.50)$$

Bu sistemde dalgadan enerji üretim yöntemi olarak daralan kanal sistemi (Tapchan) tercih edilmiş olup dalga santral verimi aşağıdaki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$\eta = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{\pi H}{2}} \quad (3.51)$$

Dalga boyu (λ), havanın yoğunluğu (ρ_{hav} (kg/m^3)), verim (η_{wt}), hız ($V(\text{m/s})$) ve türbin güç katsayısı ($C_{p,wt}$) olarak ifade edilmektedir [49].

3.3 Senaryolar

Bu bölümde, tasarlanan entegre sistemin termodinamik modellemesi ve denklemleri, EES mühendislik yazılımı kullanılarak enerji ve ekserji yaklaşımları açısından bir termodinamik analiz yapılmıştır. Ayrıca, PV sistem için PV*SOL ve parabolik güneş kollektörü sistemi için ise de System Advisor Model (SAM) programları kullanılarak analiz çalışmaları yapılmıştır.

Belirlenen bölgelerde hesaba esas alınan kıyı uzunlukları dikkate alınarak; dalga, rüzgar ve güneş enerjisinden üretilebilecek yıllık toplam elektrik gücü hesaplanmıştır. Bu çalışmada, Türkiye'deki deniz kıyı şeridinde elektrik üretim tesislerinin kurulması için, belirlenen her lokasyonda farklı kıyı uzunlukları belirlenerek üç ayrı model tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımı ve planlama neticesinde kıyı uzunlukları belirlenirken; santralin kurulacağı yerin coğrafik yapısı, rakımı ve çevresel faktörleri dikkate alınarak uzunluklar belirlenmiştir.

1. Modelde, kıyı uzunluklarına göre %40 oranında dalga, %20 rüzgar, %20 PV ve %20 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. 2. Modelde %40 oranında rüzgar, %20 dalga, %20 PV ve %20 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. Diğer yandan 3. Modelde ise, %25 dalga, %25 rüzgar, %25 PV ve %25 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. 3.

Modelde, Kastamonu'nun kıyı uzunluğu çok düşük olduğu için hesaba eklenmemiştir. Modellere ait belirlenen farklı illere göre kıyı uzunlukları ve alanlar Tablo 3.1'de verilmiştir. Her üç modelde de kıyıdan karaya olan mesafe 100 m olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3.1 Seçilen lokasyonlara göre belirlenen kıyı uzunlukları ve alanlar

Bölgeler	1. Model (km)	1. Model Alan (m ²)	2. Model (km)	2. Model Alan (m ²)	3. Model (km)	3. Model Alan (m ²)
Antalya (Kaş)	29,14	1.165.600	29,14	582.800	5,4	135.000
Çanakkale (Ayvacık)	26,83	1.073.200	26,83	536.600	5,4	135.000
İstanbul (Şile)	13,40	536.000	13,40	268.000	5,4	135.000
İzmir (Urla)	49,28	1.971.200	49,28	985.600	5,4	135.000
Kastamonu (Doğanyurt)	2,38	95.200	2,38	47.600	-	-
Kırklareli (Demirköy)	5,40	216.000	5,40	108.000	5,4	135.000
Muğla (Datça)	67,44	2.697.600	67,44	1.348.800	5,4	135.000

Bu hesaplamalarda kıyı uzunluğu parametresinin değiştirilmesi ile enerji kaynaklarından üretilebilecek elektrik gücü potansiyeli özellikle dalga enerjisine göre analiz edilmiştir. Bu analizler çerçevesinde bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır. Sonuç olarak, seçilen bölgelerde potansiyel elektrik gücü ve buna bağlı ihtiyacı karşılanabilecek ev sayıları karşılaştırılmıştır.

Yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimi hesaplamalarında kullanılan dalga yüksekliği, dalga periyodu, rüzgar hızı ve global radyasyon parametrelerinin farklı veri tabanlarından (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi'nin (ECMWF) hava tahmin modeli olan ERA5 veri tabanı ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, PV*SOL (Meteonorm veri tabanı) ve SAM (PVGIS-SARAH2 veri tabanı)) elde edildiğini belirtmek önemlidir. Bu nedenle, gerçekte kurulabilecek entegre bir sistem tarafından üretilen elektrik miktarı, bu parametrelerdeki öngörülemeyen değişiklikler nedeniyle biraz farklılık gösterebilir.

3.3.1 Senaryo 1

1. modelde, kıyı uzunluklarına göre %40 oranında dalga, %20 rüzgar, %20 PV ve %20 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. Modelde kıyıdan karaya olan mesafe 100 m olarak kabul edilmiştir.

3.3.1.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES yazılım programı kullanılarak entegre rüzgar türbini sisteminin parametrik analizi yapılmıştır. Sistemde kullanılan rüzgar türbini modeli olarak V100-2.0 MW IEC IIB (Vestas) tercih edilmiştir [40]. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te gösterildiği gibi, seçilen rüzgar türbini için 7.854 m²'lik bir süpürme alanı ve 50 m'lik bir rotor yarıçapı alınmıştır. Bir rüzgar türbini, rüzgar gücünün belirli bir kısmını enerjiye dönüştürebilir. Bir rüzgar türbininin enerjiye dönüştürebileceği güç miktarı Betz limitini aşamaz. Betz limiti 0,59 olduğuna göre, bir rüzgar türbini rüzgar gücünün en fazla %59'unu enerjiye dönüştürebilir. Gerçekte bu değere ulaşamayacağı için çalışmamızda rüzgar türbininden elde edilebilecek güç miktarı 0,35 olarak alınmıştır. Bu bağlamda, sonuçlar EES programı kullanılarak yapılan hesaplamalarla belirtilmiştir [88, 91].

Tablo 3.2. Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri

Bölgeler/ Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	Kastamonu (Doğanyurt)	İzmir (Urla)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
A [m ²]	7.854*						
r [m]	50*						
C _p	0,35						
η_{wt}	0,9						
ρ [kg/m ³]	1.225						
V [m.s ⁻¹]	5,2	5,9	5,7	4,7	6,9	6,1	6,4
$\dot{P}_{wt}$ [W]	213.067	311.216	280.628	157.326	497.799	343.951	397.234
$\dot{E}_{x_{wt}}$ [W]	676.404	987.989	890.883	499.447	1.580.000	1.092.000	1.261.000
$\dot{E}_{x_{dest,wt}}$ [W]	608.763	889.190	801.794	499.502	1.422.000	982.716	1.135.000
η_{xwt}	0,314999616	0,314999458	0,314999837	0,315	0,315062658	0,314973443	0,315015067
*A [m ²], r [m]: V100-2.0 MW IEC IIB model rüzgar türbinine (Vestas) göre kabullerdir.							

Tablo 3.3 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri

Rüzgar Türbini Özellikleri	
Seçilen Rüzgar Türbini	V100-2.0 MW IEC IIB
Rüzgar Türbini Gücü	2.0 MW
Rotor Çapı	100 m
Nominal Güç	2000 kW
Kesme Rüzgar Hızı	3 m/s
Boşaltma Rüzgar Hızı	22 m/s
Yeniden Kesme Rüzgar Hızı	20 m/s
Taranan Alan	7854 m ²
Göbek Yüksekliği	80 / 95 m

3.3.1.2 Fotovoltaik (PV) Enerji Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak PV güneş enerjisi sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmış olup PV*SOL programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur. Tablo 3.4'te sistemde kullanılan PV modeli, panel gücü, alanı, adet ve kurulu güçleri bölgelere göre verilmiştir [83, 89, 41].

Tablo 3.4 Seçilen fotovoltaik modelin özellikleri ve PV*SOL çözümleri

PV Özellikleri / Bölgeler	Seçilen PV Model / Gücü (Wp)	PV Alanı (m²)	PV Panel (Adet)	Kurulu Güç (kWp)
Antalya (Kaş)	CWT 455 (455 Wp)	582.800	214.857	97.756 kWp
Çanakkale (Ayvacık)	CWT 455 (455 Wp)	536.600	197.824	90.008 kWp
İstanbul (Şile)	CWT 455 (455 Wp)	268.000	98.801	44.954 kWp
İzmir (Urla)	CWT 455 (455 Wp)	985.600	363.354	165.324 kWp
Kastamonu (Doğanyurt)	CWT 455 (455 Wp)	47.600	17.548	7.984 kWp
Kırklareli (Demirköy)	CWT 455 (455 Wp)	108.000	39.815	18.115 kWp
Muğla (Datça)	CWT 455 (455 Wp)	1.348.800	496.958	226.112 kWp

3.3.1.3 Parabolik Güneş Kolektörü Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, parabolik güneş kolektörü enerji sistemi için entegre sistemin parametrik analizi, System Advisor Model (SAM) programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur [48]. Sistemde Therminol VP1 akışkanı seçilmiştir. Seçilen şehirlerin güneş verileri Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sisteminden (PVGIS) alınmış ve işlenmiştir [85]. PVGIS, bir fotovoltaik (PV) sistemin güneş ışıınımını ve enerji çıkışını hesaplamak için kullanılmıştır. PVGIS'teki güneş radyasyonu verilerinin çoğu uydu görüntülerinden hesaplanmıştır ve kullanılan uydulara bağlı olarak bunu yapmanın çeşitli yöntemleri vardır. Bu analiz için PVGIS-SARAH2 seçilmiştir. PVGIS, kullanıcılara Tipik Meteorolojik Yıl (TMY) verilerini içeren bir veri setini indirme seçeneği sunar. Bu veri seti; tarih ve saat, küresel yatay ışıınım, doğrudan normal ışıınım, dağınık yatay ışıınım, hava basıncı, kuru termometre sıcaklığı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, bağıl nem ve uzun süreli ölçüm gibi parametrelere ilişkin saatlik verileri içerir. Veri seti, PVGIS-SARAH2 için özellikle 2005 ile 2020 yılları arasındaki 16 yıllık tam zamanlı dönemden yılın her ayı için en temsili ayın seçilmesiyle oluşturulmuştur.

3.3.1.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak dalga enerjisi (Tapchan) sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmıştır [90, 49]. Tablo 3.5'te görüldüğü üzere seçilen bölgelerin dalga yükseklikleri, dalga hızları, rüzgar hızları ve belirlenen modellere göre alanları belirlenerek EES çözümleri yapılmıştır.

Tablo 3.5 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri

Bölgeler/ Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	İzmir (Urla)	Kastamonu (Doğanyurt)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
H [m]	2,36	2,05	2,81	2,15	2,33	2,89	2,28
a [m]	1,180	1,025	1,405	1,075	1,165	1,445	1,140
V [m.s ⁻¹]	6,536	5,772	6,973	5,678	6,880	6,911	6,412
η	0,8808	0,8690	0,8760	0,8596	0,8924	0,8709	0,8804
f [s ⁻¹]	0,2387	0,2703	0,2237	0,2747	0,2268	0,2257	0,2433
λ [m]	27,39	21,36	31,17	20,67	30,34	30,61	26,35
ρ [kg/m ³]	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025
T [s]	4,19	3,70	4,47	3,64	4,41	4,43	4,11
$\dot{W}$ [kW]	1.947.717	1.532.529	1.189.920	3.146.035	147.274	511.920	4.289.184
$\dot{W}_{wpv}$ [W/m ²]	1.671	1.428	2.220	1.596	1.547	2.370	1.590
W_{wpv} [J/m ²]	7.000	5.282	9.925	5.810	6.824	10.498	6.534
g [m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Tapchan Alanı [m ²]	1.165.600	1.073.200	536.000	1.971.200	95.200	216.000	2.697.600

3.3.2 Senaryo 2

2. modelde, %40 oranında rüzgar, %20 dalga, %20 PV ve %20 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. Kıyıda karaya olan mesafe 100 m olarak kabul edilmiştir.

3.3.2.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES yazılım programı kullanılarak entegre rüzgar türbini sisteminin parametrik analizi yapılmıştır. Sistemde kullanılan rüzgar türbini modeli olarak V100-2.0 MW IEC IIB (Vestas) tercih edilmiştir. Tablo 3.6’da gösterildiği gibi, seçilen rüzgar türbini için 7.854 m²’lik bir süpürme alanı ve 50 m’lik bir rotor yarıçapı alınmıştır. Bir rüzgar türbini, rüzgar gücünün belirli bir kısmını enerjiye dönüştürebilir. Bir rüzgar türbininin enerjiye dönüştürebileceği güç miktarı Betz limitini aşamaz. Betz limiti 0,59 olduğuna göre, bir rüzgar türbini rüzgar gücünün en fazla %59’unu enerjiye dönüştürebilir. Gerçekte bu değere ulaşamayacağı için çalışmamızda rüzgar türbininden elde edilebilecek güç miktarı 0,35 olarak alınmıştır. Bu bağlamda, sonuçlar EES programı kullanılarak yapılan hesaplamalarla belirtilmiştir.

Tablo 3.6 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri

Bölgeler/ Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	Kastamonu (Doğanyurt)	İzmir (Urla)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
A [m ²]	7.854*						
r [m]	50*						
C _p	0,35						
η _{wt}	0,9						
ρ [kg/m ³]	1.225						
V [m.s ⁻¹]	5,2	5,9	5,7	4,7	6,9	6,1	6,4
Ḗ _{wt} [W]	213.067	311.216	280.628	157.326	497.799	343.951	397.234
Ẃ _{x,wt} [W]	676.404	987.989	890.883	499.447	1.580.000	1.092.000	1.261.000
Ẃ _{dest,wt} [W]	608.763	889.190	801.794	499.502	1.422.000	982.716	1.135.000
η _{xwt}	0,314999616	0,314999458	0,314999837	0,315	0,315062658	0,314973443	0,315015067
*A [m ²], r [m]: V100-2.0 MW IEC IIB model rüzgar türbinine (Vestas) göre kabullerdir.							

Tablo 3.7 Seçilen rüzgar türbininin özellikleri

Rüzgar Türbini Özellikleri	
Seçilen Rüzgar Türbini	V100-2.0 MW IEC IIB
Rüzgar Türbini Gücü	2.0 MW
Rotor Çapı	100 m
Nominal Güç	2000 kW
Kesme Rüzgar Hızı	3 m/s
Boşaltma Rüzgar Hızı	22 m/s
Yeniden Kesme Rüzgar Hızı	20 m/s
Taranan Alan	7854 m ²
Göbek Yüksekliği	80 / 95 m

3.3.2.2 Fotovoltaik (PV) Enerji Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak PV güneş enerjisi sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmış olup PV*SOL programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur. Tablo 3.8’de sistemde kullanılan PV modeli, panel gücü, alanı, adet ve kurulu güçleri bölgelere göre verilmiştir.

Tablo 3.8 Seçilen fotovoltaik modelin özellikleri ve PV*SOL çözümleri

PV Özellikleri / Bölgeler	Seçilen PV Model / Gücü (Wp)	PV Alanı (m²)	PV Panel (Adet)	Kurulu Güç (kWp)
Antalya (Kaş)	CWT 455 (455 Wp)	582.800	214.857	97.756 kWp
Çanakkale (Ayvacık)	CWT 455 (455 Wp)	536.600	197.824	90.008 kWp
İstanbul (Şile)	CWT 455 (455 Wp)	268.000	98.801	44.954 kWp
İzmir (Urla)	CWT 455 (455 Wp)	985.600	363.354	165.324 kWp
Kastamonu (Doğanyurt)	CWT 455 (455 Wp)	47.600	17.548	7.984 kWp
Kırklareli (Demirköy)	CWT 455 (455 Wp)	108.000	39.815	18.115 kWp
Muğla (Datça)	CWT 455 (455 Wp)	1.348.800	496.958	226.112 kWp

3.3.2.3 Parabolik Güneş Kolektörü Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, parabolik güneş kolektörü enerji sistemi için entegre sistemin parametrik analizi, SAM programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur. Sistemde Therminol VP1 akışkanı seçilmiştir. Seçilen şehirlerin güneş verileri PVGIS'den alınmış ve işlenmiştir. PVGIS, bir fotovoltaik (PV) sistemin güneş ışıınımını ve enerji çıkışını hesaplamak için kullanılmıştır. PVGIS'teki güneş radyasyonu verilerinin çoğu uydu görüntülerinden hesaplanmıştır ve kullanılan uydulara bağlı olarak bunu yapmanın çeşitli yöntemleri vardır. Bu analiz için PVGIS-SARAH2 seçilmiştir. PVGIS, kullanıcılara TMY verilerini içeren bir veri setini indirme seçeneği sunar. Bu veri seti; tarih ve saat, küresel yatay ışıınım, doğrudan normal ışıınım, dağınık yatay ışıınım, hava basıncı, kuru termometre sıcaklığı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, bağıl nem ve uzun süreli ölçüm gibi parametrelere ilişkin saatlik verileri içerir. Veri seti, PVGIS-SARAH2 için özellikle 2005 ile 2020 yılları arasındaki 16 yıllık tam zamanlı dönemden yılın her ayı için en temsili ayın seçilmesiyle oluşturulmuştur.

3.3.2.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak dalga enerjisi (Tapchan) sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmıştır.

Tablo 3.9'da görüldüğü üzere seçilen bölgelerin dalga yükseklikleri, dalga hızları, rüzgar hızları ve belirlenen modellere göre alanları belirlenerek EES çözümleri yapılmıştır.

Tablo 3.9 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri

Bölgeler/ Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	İzmir (Urla)	Kastamonu (Doğanyurt)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
H [m]	2,36	2,05	2,81	2,15	2,33	2,89	2,28
a [m]	1,180	1,025	1,405	1,075	1,165	1,45	1,140
V [m.s ⁻¹]	6,536	5,772	6,973	5,678	6,88	6,911	6,412
η	0,8808	0,8690	0,8760	0,8596	0,8924	0,8709	0,8804
f [s ⁻¹]	0,2387	0,2703	0,2237	0,2747	0,2268	0,2257	0,2433
λ [m]	27,39	21,36	31,17	20,67	30,34	30,61	26,35
ρ [kg/m ³]	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
T [s]	4,19	3,7	4,47	3,64	4,41	4,43	4,11
$\dot{W}$ [kW]	973.858	766.264	594.960	1.573.017	73.637	255.960	2.144.592
$\dot{W}_{wpp}$ [W/m ²]	1.671	1.428	2.220	1.596	1.547	2.370	1.590
W_{wpp} [J/m ²]	7.000	5.282	9.925	5.810	6.824	10.498	6.534
g [m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Tapchan Alanı [m ²]	582.800	536.600	268.000	985.600	47.600	108.000	1.348.800

3.3.3 Senaryo 3

3. Modelde ise, %25 dalga, %25 rüzgar, %25 PV ve %25 parabolik güneş kollektörü enerjisi kurulumu tasarlanmıştır. Kıyıdan karaya olan mesafe 100 m olarak kabul edilmiştir.

3.3.3.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES yazılım programı kullanılarak entegre rüzgar türbini sisteminin parametrik analizi yapılmıştır. Sistemde kullanılan rüzgar türbini modeli olarak V100-2.0 MW IEC IIB (Vestas) tercih edilmiştir. Tablo 3.10’da gösterildiği gibi, seçilen rüzgar türbini için 7.854 m²’lik bir süpürme alanı ve 50 m’lik bir rotor yarıçapı alınmıştır. Bir rüzgar türbini, rüzgar gücünün belirli bir kısmını enerjiye dönüştürebilir. Bir rüzgar türbininin enerjiye dönüştürebileceği güç miktarı Betz limitini aşamaz. Betz limiti 0,59 olduğuna göre, bir rüzgar türbini rüzgar gücünün en fazla %59’unu enerjiye dönüştürebilir. Gerçekte bu değere ulaşamayacağı için çalışmamızda rüzgar türbininden elde edilebilecek güç miktarı 0,35 olarak alınmıştır. Bu bağlamda, sonuçlar EES programı kullanılarak yapılan hesaplamalarla belirtilmiştir.

Tablo 3.10 Seçilen rüzgar türbini modelinin özellikleri ve EES çözümleri.

Bölgeler / Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	İzmir (Urla)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
$A [m^2]$	7.854*					
$r [m]$	50*					
C_p	0,35					
η_{wt}	0,9					
$\rho [kg/m^3]$	1.225					
$V [m.s^{-1}]$	5,2	5,9	5,7	6,9	6,1	6,4
$\dot{P}_{wt} [W]$	213.067	311.216	280.628	497.799	343.951	397.234
$\dot{E}_{x_{wt}} [W]$	676.404	987.989	890.883	1.580.000	1.092.000	1.261.000
$\dot{E}_{x_{dest,wt}} [W]$	608.763	889.190	801.794	1.422.000	982.716	1.135.000
η_{xwt}	0,314999616	0,314999458	0,314999837	0,315062658	0,314973443	0,315015067
*A [m ²], r [m]: V100-2.0 MW IEC IIB model rüzgar türbinine (Vestas) göre kabullerdir.						

3.3.3.2 Fotovoltaik (PV) Enerji Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak PV güneş enerjisi sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmış olup PV*SOL programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur. Seçilen tüm şehirlerde, 135.000 m² panel alanına sahip CWT 455 (455 Wp) PV modeli olarak seçilmiştir. Bu dikkate alındığında, hesaplanan panel sayısı ve kurulu güç sırasıyla 49.769 ve 22.644,9 kWp olarak bulunmuştur.

3.3.3.3 Parabolik Güneş Kollektörü Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, parabolik güneş kollektörü enerji sistemi için entegre sistemin parametrik analizi, SAM programı kullanılarak tasarım ve simülasyondan güç üretimi bulunmuştur. Sistemde Therminol VP1 akışkanı seçilmiştir. Seçilen şehirlerin güneş verileri PVGIS'den alınmış ve işlenmiştir. PVGIS, bir fotovoltaik (PV) sistemin güneş ışıınımını ve enerji çıkışını hesaplamak için kullanılmıştır. PVGIS'teki güneş radyasyonu verilerinin çoğu uydu görüntülerinden hesaplanmıştır ve kullanılan uydulara bağlı olarak bunu yapmanın çeşitli yöntemleri vardır. Bu analiz için PVGIS-SARAH2 seçilmiştir. PVGIS, kullanıcılara TMY verilerini içeren bir veri setini indirme seçeneği sunar. Bu veri seti; tarih ve saat, küresel yatay ışıınım, doğrudan normal ışıınım, dağınık yatay ışıınım, hava basıncı, kuru termometre sıcaklığı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, bağıl nem ve uzun süreli ölçüm gibi parametrelere ilişkin saatlik verileri içerir. Veri seti,

PVGIS-SARAH2 için özellikle 2005 ile 2020 yılları arasındaki 16 yıllık tam zamanlı dönemden yılın her ayı için en temsili ayın seçilmesiyle oluşturulmuştur.

3.3.3.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Analizi

Bu bölümde, EES programı kullanılarak dalga enerjisi (Tapchan) sistemi için entegre sistemin parametrik analizi yapılmıştır.

Tablo 3.11’de görüldüğü üzere seçilen bölgelerin dalga yükseklikleri, dalga hızları, rüzgar hızları ve belirlenen modellere göre alanları belirlenerek EES çözümleri yapılmıştır.

Tablo 3.11 Seçilen lokasyonların özellikleri ve EES çözümleri.

Bölgeler / Veriler	Antalya (Kaş)	Çanakkale (Ayvacık)	İstanbul (Şile)	İzmir (Urla)	Kırklareli (Demirköy)	Muğla (Datça)
H [m]	2,36	2,05	2,81	2,15	2,89	2,28
a [m]	1,180	1,025	1,405	1,075	1,45	1,140
V [m.s ⁻¹]	6,536	5,772	6,973	5,678	6,911	6,412
η	0,8808	0,8690	0,8760	0,8596	0,8709	0,8804
f [s ⁻¹]	0,2387	0,2703	0,2237	0,2747	0,2257	0,2433
λ [m]	27,39	21,36	31,17	20,67	30,61	26,35
ρ [kg/m ³]	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025	1.025
T [s]	4,19	3,7	4,47	3,64	4,43	4,11
$\dot{W}$ [kW]	225.600	192.700	299.700	215.500	319.900	214.600
$\dot{W}_{wpp}$ [W/m ²]	1.671	1.428	2.220	1.596	2.370	1.590
W_{wpp} [J/m ²]	7.000	5.282	9.925	5.810	10.498	6.534
g [m/s ²]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Tapchan Alanı [m ²]	135.000	135.000	135.000	135.000	135.000	135.000

3.4 Optimizasyon ve Maliyet Analizi

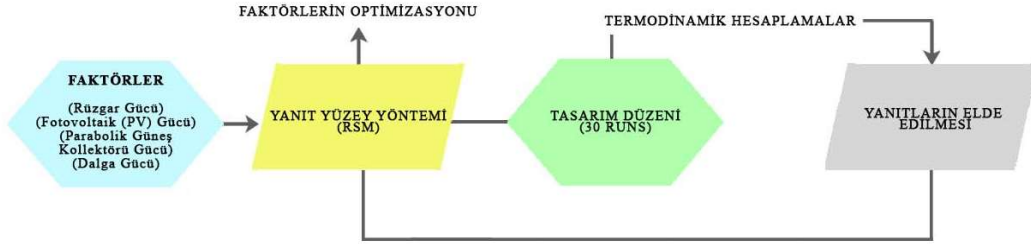
3.4.1 Yanıt Yüzey Yöntemi

Box and Wilson tarafından geliştirilmiş ve tanımlanmış olan Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM), “Denemelerin Optimum Koşullara Ulaşması” ismi ile 1951 yılında ortaya konulmuş olup ilk olarak kimya uygulamalarında görülmüştür. Yanıt yüzey yöntemini, proseslerin geliştirilmesi ve optimizasyonu için gerekli istatistiksel ve matematiksel metotların beraber uygulandığı bir teknik olarak Myers ve Montgomery tarafından belirtilmiştir [92]. Bu optimizasyon yöntemi, sistemin

cevabı ve üzerinde etkili olan bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan empirik modelleme tekniklerini ve proses değişkenlerinin sistemin cevabında hedeflenen etkiyi gösterdiği seviyelerinin bulunması için kullanılan optimizasyon tekniklerini ihtiva etmektedir [93].

Yanıt yüzey yöntemi eleme denemeleri, bölge araştırması ve ürünün optimizasyonu olarak başlıca üç aşamadan oluştuğu görülmektedir. İlk aşama olan eleme denemeleri, daha düşük sayıda ve daha faydalı ana deneme yapılmasına imkan tanımaktadır. Diğer kademede amaç, eleme denemeleri ile tespit edilen bağımsız değişkenlerin sistemin cevabında oluşturdukları değerlerin, optimum noktaya yakın sonuçlar oluşturup oluşturmadığını tespit etmektedir. Son aşama ise optimum noktaya yaklaşıldığında süreç başlar. Gerçek cevap fonksiyonu optimum nokta etrafında önemli bir eğrilik oluştuğu görülmektedir. Bu durumun hesaplanmasında sırasıyla üssel modeller, ikinci dereceden polinomiyal modeller ve non-lineer modellerden faydalanılarak uygun bir model elde edilir. Bu makul model optimum noktanın incelenmesinde değerlendirilir [94]. RSM optimizasyon yaklaşımı, diğer optimizasyon yöntemlerine göre önemli bir avantaj sunar. RPM genellikle daha az simülasyon örneği gerektirir, bu da bileşen simülasyonlarının, etkileşimlerin ve belirli yanıtların daha düzgün ve düzenli bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Bu nedenle, bu çalışmada yaygın olarak kullanılan Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) ile RSM kullanılmıştır [95].

Bu çalışmada izlenen bütünleşik formda dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinden elektrik üretimi parametrelerinin modellenmesi ve optimizasyonu çalışması Şekil 3.4’de gösterildiği gibi blok diyagramda özetlenmiştir. Çalışmada deneysel tasarım düzenini geliştirmek için yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılmıştır. Bu, karşılık gelen yanıtları tahmin etmek için belirli düşük ve yüksek gerçek sınırlara sahip faktörlerin girilmesini içeriyordu. Yanıtlar daha sonra yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılarak değerlendirilmiş ve maksimum elektrik üretimine ulaşmaya, ev sayısını belirlemeye ve ilgili maliyetleri en aza indirmeye odaklanılarak optimize edilmiştir. Bunu başarmak için, bu analizler için ticari yazılım Design-Expert [96] kullanılarak RSM ve CCD tarafından sağlanan 30 simülasyon çalıştırması kullanılmıştır [97,98].



Şekil 3.4 Bütünleşik sistem sürecinin optimizasyon çalışması için blok diyagram

3.4.2 Senaryolar

Yanıt yüzey optimizasyon yöntemi ile üç ayrı senaryoya göre optimizasyon çalışmaları yapılmış olup aşağıda detaylı bir şekilde gösterilmektedir.

3.4.2.1 Senaryo 1

Araştırma optimizasyonu, amaç fonksiyonları ve optimize edilmiş değişkenler için optimum değerleri belirleyen RSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.12’de gösterildiği gibi dört tasarım parametresi optimizasyon değişkenleri olarak seçilmiştir. Seçilen faktörlerin optimizasyonu tüm yanıtlar için istatistiksel bir yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.13’te hesaplanan yanıtlarla birlikte yüz merkezli merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sunulmaktadır. RSM tasarımında kullanılan yanıtların ayrıntılı istatistiksel sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 3.12 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri

Faktörler	Kodlanmış Faktörler	Minimum	Maksimum	Cevaplar	Kodlanmış Cevaplar
Rüzgar gücü (kW)	A	157,33	10.328,08	Toplam Yıllık Elektrik Üretim Miktarı (kWh/yıl)	R1
Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	B	1.158,79	44.388,36	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	R2
Parabolik güneş kolektörü gücü (kW)	C	816,49	41.730,37	Toplam Maliyet (\$)	R3
Dalga gücü (kW)	D	147.300	4.289.000		

Tablo 3.13’de verilen faktörlerin düşük ve yüksek gerçek sınırlarıyla birlikte yanıtların girilmesinin ardından RSM yöntemi ile analiz yapılmıştır.

Tablo 3.13 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları

Std	Run	Faktör 1 Rüzgar Gücü (kW)	Faktör 2 Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Faktör 3 Parabolik Güneş Kollektörü Gücü (kW)	Faktör 4 Dalga Gücü (kW)	Cevap 1 Toplam Yıllık Elektirik Üretimi (GWh/yıl)	Cevap 2 Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Cevap 3 Toplam Maliyet (\$)
12	1	10.328,10	44.388,40	816,49	4.289.180	38.059,72	10.427.321	12.403.884.318,39
2	2	10.328,10	1.158,79	816,49	147.274	1.397,90	382.986	445.115.366,39
29	3	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
21	4	5.242,70	22.773,60	816,49	2.218.230	19.684,26	5.392.948	6.416.887.507,95
15	5	157,33	44.388,40	41.730,40	4.289.180	38.329,03	10.501.104	12.621.451.545,43
30	6	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
23	7	5.242,70	22.773,60	21.273,40	147.274	1.721,90	471.753	566.867.590,37
10	8	10.328,10	1.158,79	816,49	4.289.180	37.681,03	10.323.570	12.377.946.552,39
1	9	157,33	1.158,79	816,49	147.274	1.308,80	358.576	429.873.444,47
26	10	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
16	11	10.328,10	44.388,40	41.730,40	4.289.180	38.418,13	10.525.514	12.636.693.467,35
19	12	5.242,70	1.158,79	21.273,40	2.218.230	19.674,12	5.390.169	6.520.322.940,37
4	13	10.328,10	44.388,40	816,49	147.274	1.776,59	486.737	471.053.132,39
28	14	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
22	15	5.242,70	22.773,60	41.730,40	2.218.230	20.042,67	5.491.142	6.649.696.656,91
25	16	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
14	17	10.328,10	1.158,79	41.730,40	4.289.180	38.039,43	10.421.763	12.610.755.701,35
24	18	5.242,70	22.773,60	21.273,40	4.289.180	38.005,03	10.412.337	12.499.698.776,37
9	19	157,33	1.158,79	816,49	4.289.180	37.591,93	10.299.160	12.362.704.630,47
8	20	10.328,10	44.388,40	41.730,40	147.274	2.134,99	584.930	703.862.281,35
17	21	157,33	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.818,92	5.429.840	6.525.670.884,89
6	22	10.328,10	1.158,79	41.730,40	147.274	1.756,30	481.179	677.924.515,35
3	23	157,33	44.388,40	816,49	147.274	1.687,49	462.327	455.811.210,47
27	24	5.242,70	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.863,46	5.442.045	6.533.291.826,37
18	25	10.328,10	22.773,60	21.273,40	2.218.230	19.908,01	5.454.250	6.540.912.806,81
13	26	157,33	1.158,79	41.730,40	4.289.180	37.950,34	10.397.353	12.595.513.779,43
11	27	157,33	44.388,40	816,49	4.289.180	37.970,62	10.402.911	12.388.642.396,47
20	28	5.242,70	44.388,40	21.273,40	2.218.230	20.052,81	5.493.920	6.546.260.706,37
7	29	157,33	44.388,40	41.730,40	147.274	2.045,90	560.520	688.620.359,43
5	30	157,33	1.158,79	41.730,40	147.274	1.667,21	456.769	662.682.593,43

3.4.2.2 Senaryo 2

Araştırma optimizasyonu, amaç fonksiyonları ve optimize edilmiş değişkenler için optimum değerleri belirleyen RSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.14’de gösterildiği gibi dört tasarım parametresi optimizasyon değişkenleri olarak seçilmiştir. Seçilen faktörlerin optimizasyonu tüm yanıtlar için istatistiksel bir yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.15’de hesaplanan yanıtlarla birlikte yüz merkezli merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sunulmaktadır. RSM tasarımında kullanılan yanıtların ayrıntılı istatistiksel sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Tablo 3.14 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri

Faktörler	Kodlanmış Faktörler	Minimum	Maksimum	Cevaplar	Kodlanmış Cevaplar
Rüzgar gücü (kW)	A	314,65	21.450,64	Toplam Yıllık Elektrik Üretim Miktarı (kWh/yıl)	R1
Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	B	1.158,79	44.388,36	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	R2
Parabolik güneş kollektörü gücü (kW)	C	816,49	41.730,37	Toplam Maliyet (\$)	R3
Dalga gücü (kW)	D	73.637	2.145.000		

Tablo 3.15 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları

Std	Run	Faktör 1 Rüzgar Gücü (kW)	Faktör 2 Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Faktör 3 Parabolik Güneş Kollektörü Gücü (kW)	Faktör 4 Dalga Gücü (kW)	Cevap 1 Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Cevap 2 Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Cevap 3 Toplam Maliyet (\$)
16	1	21.450,60	44.388,40	41.730,40	2.144.590	19.728,93	5.405.187	6.474.797.855,85
18	2	21.450,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.289,60	2.819.069	3.362.206.265,31
10	3	21.450,60	1.158,79	816,49	2.144.590	18.991,84	5.203.243	6.216.050.940,89
14	4	21.450,60	1.158,79	41.730,40	2.144.590	19.350,24	5.301.436	6.448.860.089,85
9	5	314,65	1.158,79	816,49	2.144.590	18.806,69	5.152.517	6.184.376.609,22
28	6	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.197,03	2.793.706	3.346.369.060,51
21	7	10.882,60	22.773,60	816,49	1.109.110	10.017,82	2.744.609	3.229.964.742,09
1	8	314,65	1.158,79	816,49	73.637	665,12	182.225	217.961.016,22
17	9	314,65	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.104,45	2.768.343	3.330.531.933,64
12	10	21.450,60	44.388,40	816,49	2.144.590	19.370,53	5.306.994	6.241.988.706,89
8	11	21.450,60	44.388,40	41.730,40	73.637	1.587,37	434.895	508.382.262,85
29	12	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.101,71	2.767.591	3.346.369.060,51
5	13	314,65	1.158,79	41.730,40	73.637	1.402,22	384.169	450.770.165,18
7	14	314,65	44.388,40	41.730,40	73.637	1.402,22	384.169	476.707.931,18
19	15	10.882,60	1.158,79	21.273,40	1.109.110	10.007,68	2.741.830	3.333.400.174,51
30	16	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.197,03	2.793.706	3.346.369.060,51
23	17	10.882,60	22.773,60	21.273,40	73.637	1.126,24	308.560	363.171.347,51
6	18	21.450,60	1.158,79	41.730,40	73.637	1.208,68	331.144	482.444.496,85
11	19	314,65	44.388,40	816,49	2.144.590	19.185,38	5.256.268	6.210.314.375,22
2	20	21.450,60	1.158,79	816,49	73.637	850,27	232.951	249.635.347,89
24	21	10.882,60	22.773,60	21.273,40	2.144.590	19.267,81	5.278.852	6.329.586.940,51
3	22	314,65	44.388,40	816,49	73.637	1.043,81	285.976	243.898.782,22
26	23	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.197,03	2.793.706	3.346.369.060,51
25	24	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.197,03	2.793.706	3.346.369.060,51
13	25	314,65	1.158,79	41.730,40	2.144.590	19.165,09	5.250.710	6.417.185.758,18
27	26	10.882,60	22.773,60	21.273,40	1.109.110	10.197,03	2.793.706	3.346.369.060,51
15	27	314,65	44.388,40	41.730,40	2.144.590	19.543,78	5.354.461	6.443.123.524,18
22	28	10.882,60	22.773,60	41.730,40	1.109.110	10.376,23	2.842.803	3.462.773.891,05
20	29	10.882,60	44.388,40	21.273,40	1.109.110	10.386,37	2.845.581	3.359.337.940,51
4	30	21.450,60	44.388,40	816,49	73.637	1.228,96	336.702	275.573.113,89

3.4.2.3 Senaryo 3

Tablo 3.16’da gösterildiği gibi dört tasarım parametresi optimizasyon değişkenleri olarak seçilmiştir. Seçilen faktörlerin optimizasyonu tüm yanıtlar için istatistiksel bir yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.17’de hesaplanan yanıtlarla

birlikte yüz merkezli merkezi kompozit tasarım kullanılarak yapılan analiz çalışmaları sunulmaktadır.

Tablo 3.16 Faktörlerin ve yanıtların minimum ve maksimum verileri

Faktörler	Kodlanmış Faktörler	Minimum	Maksimum	Cevaplar	Kodlanmış Cevaplar
Rüzgar gücü (kW)	A	426,13	995,60	Toplam Yıllık Elektrik Üretim Miktarı (kWh/yıl)	R1
Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	B	3.023,17	4.529,81	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	R2
Parabolik güneş kollektörü gücü (kW)	C	2.264,48	4.994,81	Toplam Maliyet (\$)	R3
Dalga gücü (kW)	D	192.700	319.900		

Tablo 3.17 Tüm cevapların hesaplanmış sonuçları

Std	Run	Faktör 1 Rüzgar Gücü (kW)	Faktör 2 Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Faktör 3 Parabolik Güneş Kollektörü Gücü (kW)	Faktör 4 Dalga Gücü (kW)	Cevap 1 Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Cevap 2 Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Cevap 3 Toplam Maliyet (\$)
9	1	426,13	3.023,17	2.264,48	319.900	2.852,38	781.473	936.969.795,80
16	2	995,60	4.529,81	4.994,81	319.900	2.894,48	793.009	954.263.356,92
12	3	995,60	4.529,81	2.264,48	319.900	2.870,56	786.456	938.727.178,55
8	4	995,60	4.529,81	4.994,81	192.700	1.780,21	487.729	587.800.156,92
5	5	426,13	3.023,17	4.994,81	192.700	1.762,02	482.746	586.042.774,17
4	6	995,60	4.529,81	2.264,48	192.700	1.756,29	481.176	572.263.978,55
21	7	710,87	3.776,49	2.264,48	256.300	2.304,33	631.324	754.616.887,17
19	8	710,87	3.023,17	3.629,65	256.300	2.309,69	632.793	761.933.012,81
24	9	710,87	3.776,49	3.629,65	319.900	2.873,43	787.241	945.616.604,81
18	10	995,60	3.776,49	3.629,65	256.300	2.318,79	635.284	762.811.704,19
20	11	710,87	4.529,81	3.629,65	256.300	2.322,89	636.409	762.836.996,81
2	12	995,60	3.023,17	2.264,48	192.700	1.743,09	477.560	571.359.994,55
27	13	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81
3	14	426,13	4.529,81	2.264,48	192.700	1.751,30	479.809	571.410.579,80
30	15	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81
23	16	710,87	3.776,49	3.629,65	192.700	1.759,16	481.961	579.153.404,81
10	17	995,60	3.023,17	2.264,48	319.900	2.857,37	782.840	937.823.194,55
6	18	995,60	3.023,17	4.994,81	192.700	1.767,01	484.113	586.896.172,92
14	19	995,60	3.023,17	4.994,81	319.900	2.881,28	789.393	953.359.372,92
29	20	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81
26	21	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81
28	22	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81
11	23	426,13	4.529,81	2.264,48	319.900	2.865,57	785.089	937.873.779,80
13	24	426,13	3.023,17	4.994,81	319.900	2.876,29	788.026	952.505.974,17
15	25	426,13	4.529,81	4.994,81	319.900	2.889,49	791.642	953.409.958,17
17	26	426,13	3.776,49	3.629,65	256.300	2.313,80	633.917	761.958.305,44
22	27	710,87	3.776,49	4.994,81	256.300	2.328,25	637.877	770.153.065,55
1	28	426,13	3.023,17	2.264,48	192.700	1.738,10	476.193	570.506.595,80
7	29	426,13	4.529,81	4.994,81	192.700	1.775,22	486.362	586.946.758,17
25	30	710,87	3.776,49	3.629,65	256.300	2.316,29	634.601	762.385.004,81

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Termodinamik Analiz Sonuçları

Bu bölümde, tasarlanan entegre sistemin termodinamik modellemesi ve denklemleri ile enerji ve ekserji yaklaşımları açısından termodinamik analizi dalga ve rüzgar enerjisi için EES mühendislik yazılımı, PV sistem için PV*SOL ve parabolik güneş kollektörü sistemi için ise de SAM programları kullanılarak analiz çalışmaları yapılmıştır. Belirlenen bölgelerde dikkate alınan kıyı uzunlukları dikkate alınarak dalga, rüzgar ve güneş enerjisinden üretililecek yıllık toplam elektrik gücü ve ev sayısı hesaplanmıştır.

4.1.1 Senaryo 1

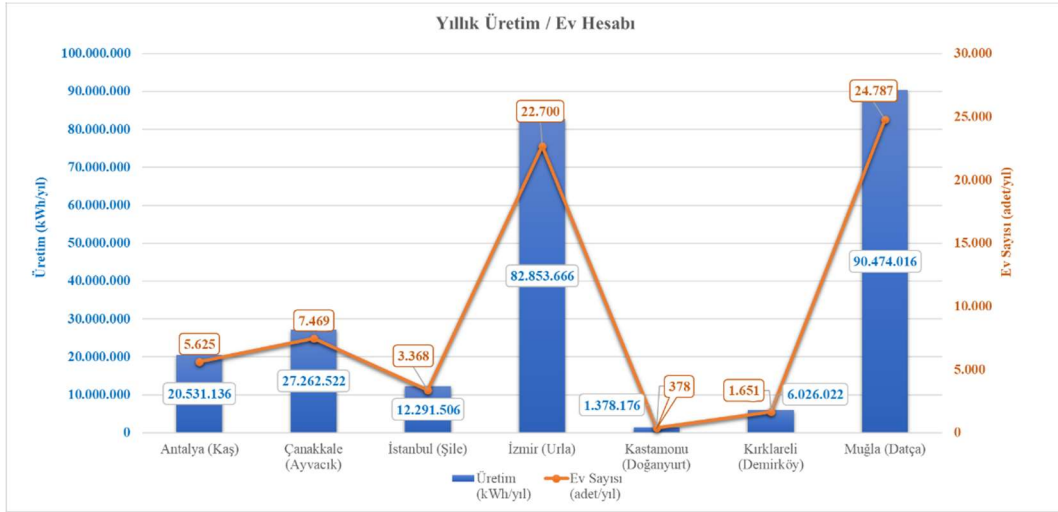
4.1.1.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.1’de görüldüğü üzere, bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.1 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	20.531.136,120	2.343,737	5.625
Çanakkale (Ayvacık)	27.262.521,600	3.112,160	7.469
İstanbul (Şile)	12.291.506,400	1.403,140	3.368
İzmir (Urla)	82.853.665,560	9.458,181	22.700
Kastamonu (Doğanyurt)	1.378.175,760	157,326	378
Kırklareli (Demirköy)	6.026.021,520	687,902	1.651
Muğla (Datça)	90.474.015,840	10.328,084	24.787

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, rüzgar türbininden elde edilen güç diğer lokasyonlara kıyasla Muğla/Datça’da en yüksektir. Muğla’yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Rüzgar türbini verimliliğinin %90 olduğu varsayılmıştır. Rüzgar türbininin ekserji verimliliği ise %31,5 olarak hesaplanmıştır.

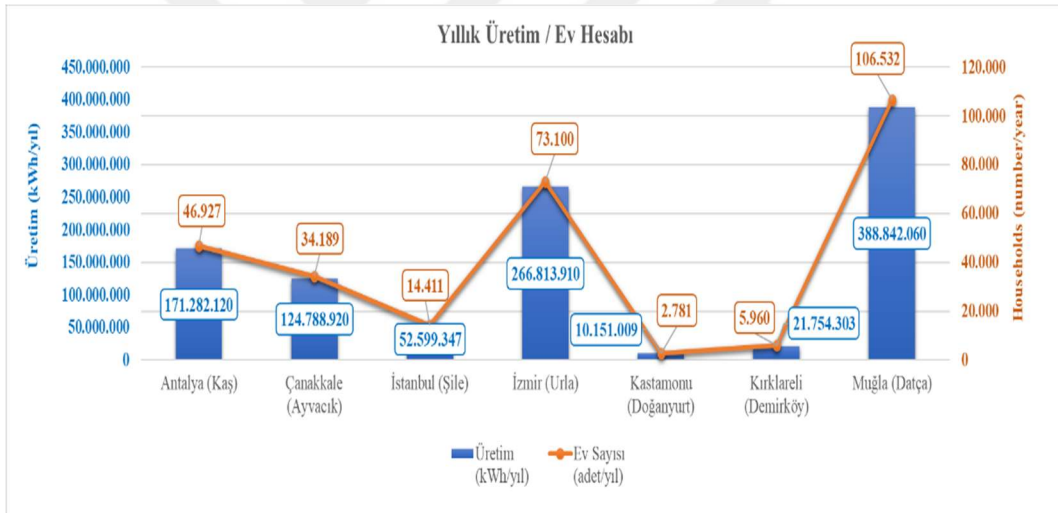
4.1.1.2 Fotovoltaik Sistemin (PV) Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.2’de görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.2 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	171.282.120	19.552,753	46.927
Çanakkale (Ayvacık)	124.788.920	14.245,311	34.189
İstanbul (Şile)	52.599.347	6.004,492	14.411
İzmir (Urla)	266.813.910	30.458,209	73.100
Kastamonu (Doğanyurt)	10.151.009	1.158,791	2.781
Kırklareli (Demirköy)	21.754.303	2.483,368	5.960
Muğla (Datça)	388.842.060	44.388,363	106.532

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, fotovoltaiik enerji sisteminden elde edilen güç diğer lokasyonlara kıyasla Muğla/Dalaman’da en yüksektir. Muğla’yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.

- Sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri yaklaşık %26,48 ve %22,01 olarak hesaplanmıştır.

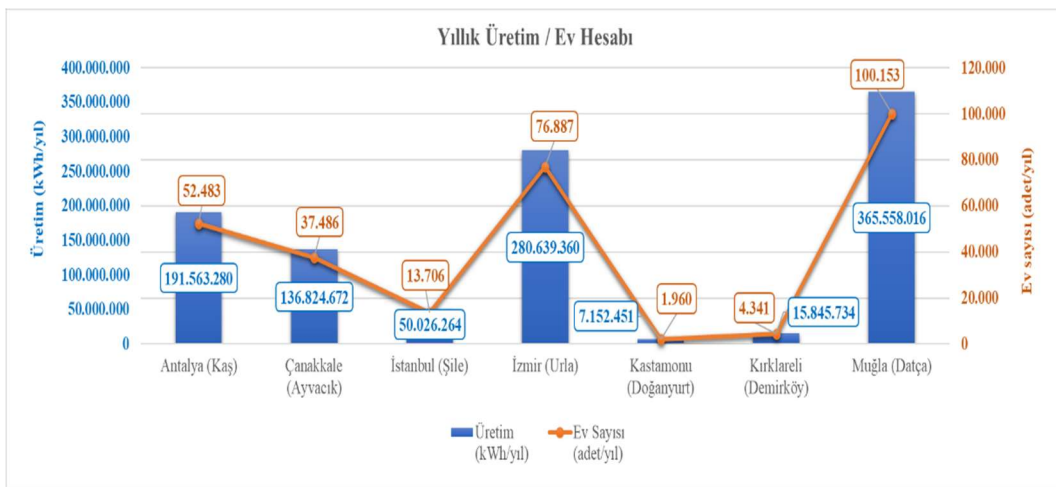
4.1.1.3 Parabolik Güneş Kollektörü Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.3 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	191.563.280	21.867,954	52.483
Çanakkale (Ayvacık)	136.824.672	15.619,255	37.486
İstanbul (Şile)	50.026.264	5.710,761	13.706
İzmir (Urla)	280.639.360	32.036,457	76.887
Kastamonu (Doğanyurt)	7.152.451	816,490	1.960
Kırklareli (Demirköy)	15.845.734	1.808,874	4.341
Muğla (Datça)	365.558.016	41.730,367	100.153

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, parabolic güneş kollektörü enerji sisteminden elde edilen güç Muğla/Datça bölgesinde en yüksektir. Muğla'yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Parabolik güneş kollektörü sisteminin kapasite faktörü %35,7 ile Antalya'da en yüksek ve %16,8 Kırklareli'nde en düşük olarak hesaplanmıştır.

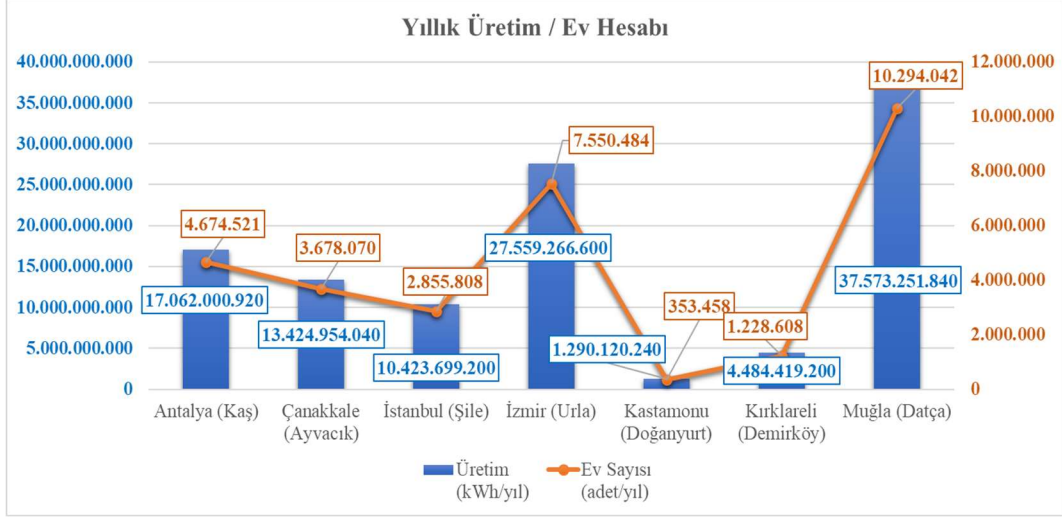
4.1.1.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.4'te görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.4 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	17.062.000.920	1.947.717	4.674.521
anakkale (Ayvacık)	13.424.954.040	1.532.529	3.678.070
İstanbul (Şile)	10.423.699.200	1.189.920	2.855.808
İzmir (Urla)	27.559.266.600	3.146.035	7.550.484
Kastamonu (Doğanyurt)	1.290.120.240	147.274	353.458
Kırklareli (Demirköy)	4.484.419.200	511.920	1.228.608
Muğla (Datça)	37.573.251.840	4.289.184	10.294.042

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç Muğla/Datça bölgesinde en yüksektir. Muğla'yı İzmir, Antalya, Çanakkale, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Dalga enerjisi sisteminin (Tapchan) verimi en çok Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde, en az ise İzmir/Urla bölgesinde bulunmuştur.

4.1.1.5 Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinin Termodinamik Sonuçları

Bu bölümde, dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinden oluşan entegre bir sistemden üretilebilecek yıllık toplam elektrik enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurularak, Tablo 4.5'de verildiği gibi yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısını belirlemek için seçilen konumlarda ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 4.5 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	17.445.377.456	1.991.481	4.779.555
Çanakkale (Ayvacık)	13.713.830.154	1.565.506	3.757.214
İstanbul (Şile)	10.538.616.317	1.203.038	2.887.292
İzmir (Urla)	28.189.573.536	3.217.988	7.723.171
Kastamonu (Doğanyurt)	1.308.801.876	149.407	358.576
Kırklareli (Demirköy)	4.528.045.259	516.900	1.240.560
Muğla (Datça)	38.418.125.932	4.385.631	10.525.514

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıp entegre sistemden yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısı açısından değerlendirildiğinde, en yüksek Muğla/Datça, en düşük ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesi bulunmuştur.

4.1.2 Senaryo 2

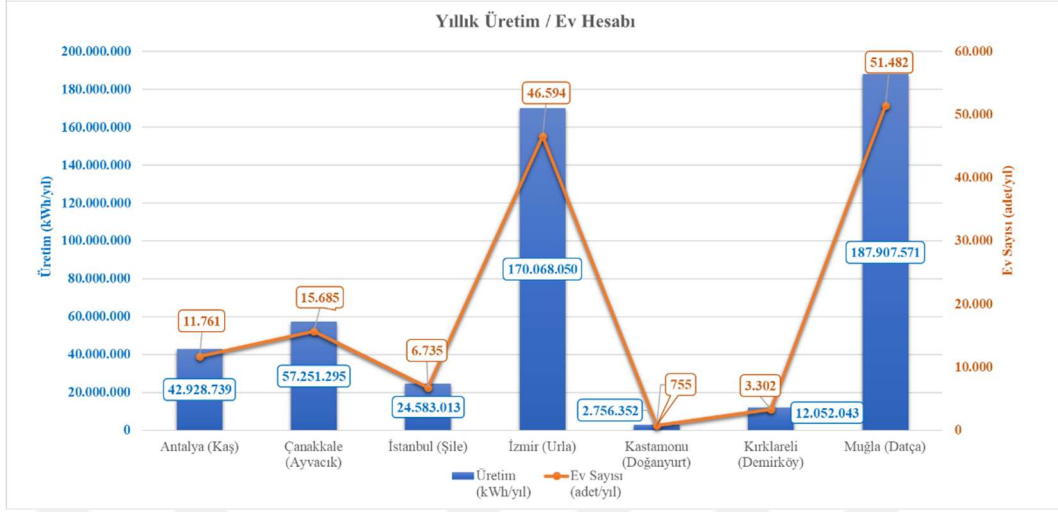
4.1.2.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.6’da görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.6 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	42.928.739	4.900,541	11.761
Çanakkale (Ayvacık)	57.251.295	6.535,536	15.685
İstanbul (Şile)	24.583.013	2.806,280	6.735
İzmir (Urla)	170.068.050	19.414,161	46.594
Kastamonu (Doğanyurt)	2.756.352	314,652	755
Kırklareli (Demirköy)	12.052.043	1.375,804	3.302
Muğla (Datça)	187.907.571	21.450,636	51.482

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, rüzgar türbininden elde edilen güç diğer lokasyonlara kıyasla Muğla/Datça’da en yüksektir. Muğla’yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Rüzgar türbini verimliliğinin %90 olduğu varsayılmıştır. Rüzgar türbininin ekserji verimliliği ise sırasıyla %31,5 olarak hesaplanmıştır.

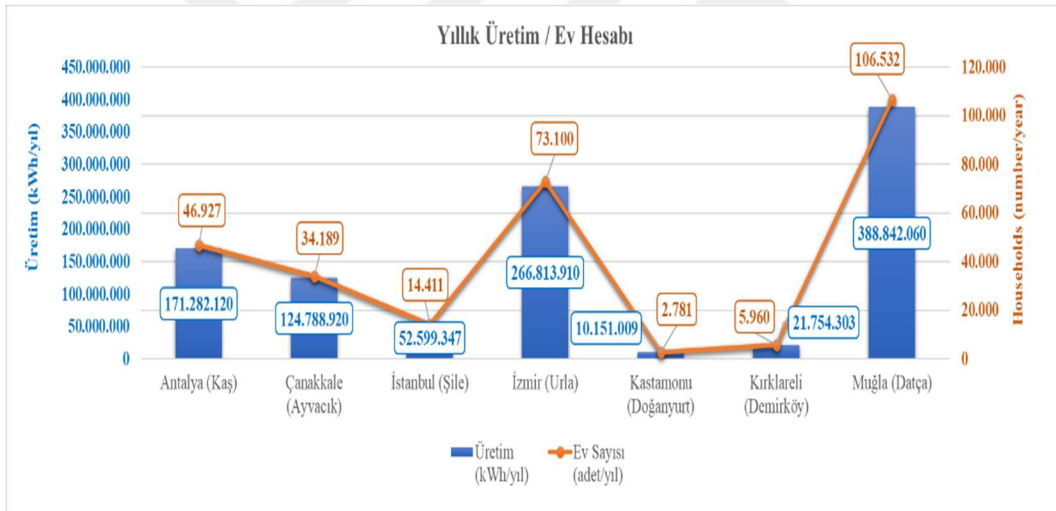
4.1.2.2 Fotovoltaik Sistemin (PV) Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.7’de görüldüğü üzere her iki model esas alınarak bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.7 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	171.282.120	19.552,753	46.927
Çanakkale (Ayvacık)	124.788.920	14.245,311	34.189
İstanbul (Şile)	52.599.347	6.004,492	14.411
İzmir (Urla)	266.813.910	30.458,209	73.100
Kastamonu (Doğanyurt)	10.151.009	1.158,791	2.781
Kırklareli (Demirköy)	21.754.303	2.483,368	5.960
Muğla (Datça)	388.842.060	44.388,363	106.532

Şekil 4.6’da görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, fotovoltaik enerji sisteminden elde edilen güç diğer lokasyonlara kıyasla Muğla/Dalaman’da en yüksektir. Muğla’yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.

- Sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri yaklaşık %26,48 ve %22,01 olarak hesaplanmıştır.

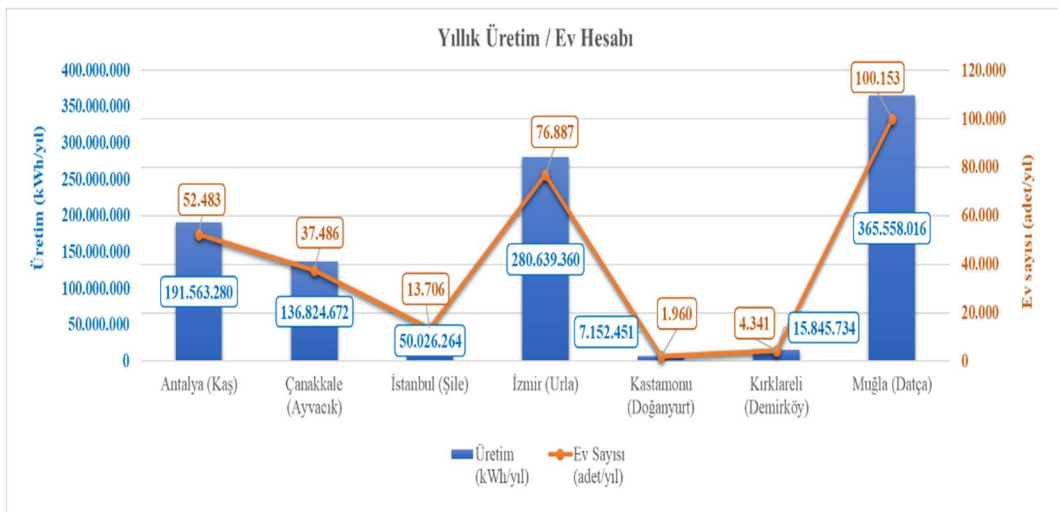
4.1.2.3 Parabolik Güneş Kollektörü Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.8’de görüldüğü üzere her iki model esas alınarak bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.8 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	191.563.280	21.867,954	52.483
Çanakkale (Ayvacık)	136.824.672	15.619,255	37.486
İstanbul (Şile)	50.026.264	5.710,761	13.706
İzmir (Urla)	280.639.360	32.036,457	76.887
Kastamonu (Doğanyurt)	7.152.451	816,490	1.960
Kırklareli (Demirköy)	15.845.734	1.808,874	4.341
Muğla (Datça)	365.558.016	41.730,367	100.153

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, fotovoltaik enerji sisteminden elde edilen güç diğerk lokasyonlara kıyasla Muğla/Dalaman’da en yüksektir. Muğla’yı İzmir, Çanakkale, Antalya, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Parabolik güneş kollektörü sisteminin kapasite faktörü %35,7 ile Antalya’da en yüksek ve %16,8 Kırklareli’nde en düşük olarak hesaplanmıştır.

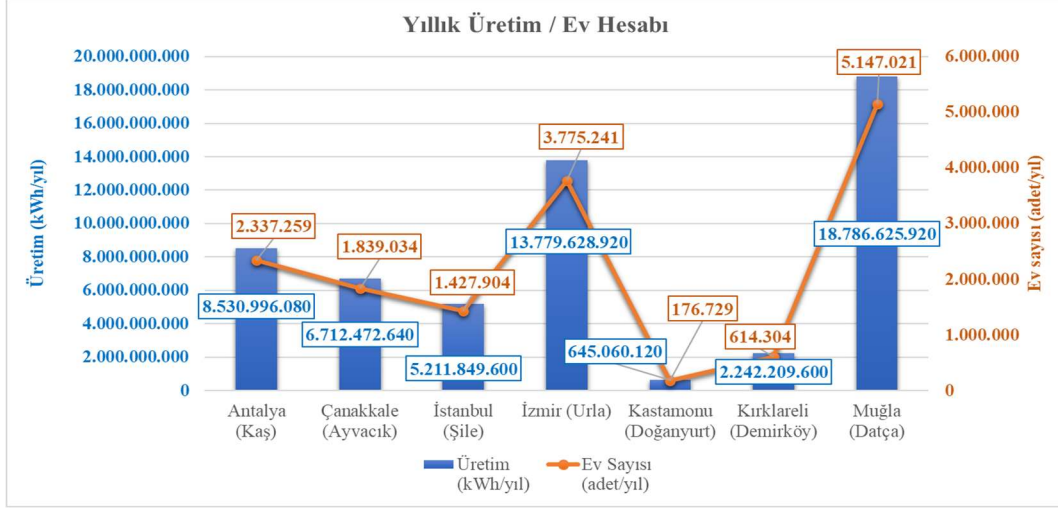
4.1.2.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.9’da görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.9 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	8.530.996.080	973.858	2.337.259
anakkale (Ayvacık)	6.712.472.640	766.264	1.839.034
İstanbul (Şile)	5.211.849.600	594.960	1.427.904
İzmir (Urla)	13.779.628.920	1.573.017	3.775.241
Kastamonu (Doğanyurt)	645.060.120	73.637	176.729
Kırklareli (Demirköy)	2.242.209.600	255.960	614.304
Muğla (Datça)	18.786.625.920	2.144.592	5.147.021

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç Muğla/Datça bölgesinde en yüksektir. Muğla'yı İzmir, Antalya, Çanakkale, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Muğla/Datça bölgesinde, en düşük sayının ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Dalga enerjisi sisteminin (Tapchan) verimi en çok Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde, en az ise İzmir/Urla bölgesinde bulunmuştur.

4.1.2.5 Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinin Termodinamik Sonuçları

Bu bölümde, dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinden oluşan entegre bir sistemden üretilebilecek yıllık toplam elektrik enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurularak, Tablo 4.10'da verildiği gibi yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısını belirlemek için seçilen konumlarda ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 4.10 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	8.936.770.219	1.020.179	2.448.430
Çanakkale (Ayvacık)	7.031.337.527	802.664	1.926.394
İstanbul (Şile)	5.339.058.224	609.482	1.462.756
İzmir (Urla)	14.497.150.240	1.654.926	3.971.822
Kastamonu (Doğanyurt)	665.119.932	75.927	182.225
Kırklareli (Demirköy)	2.291.861.680	261.628	627.907
Muğla (Datça)	19.728.933.567	2.252.161	5.405.187

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıp entegre sistemden yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısı açısından değerlendirildiğinde, en yüksek Muğla/Datça, en düşük ise Kastamonu/Doğanyurt bölgesi bulunmuştur.

4.1.3 Senaryo 3

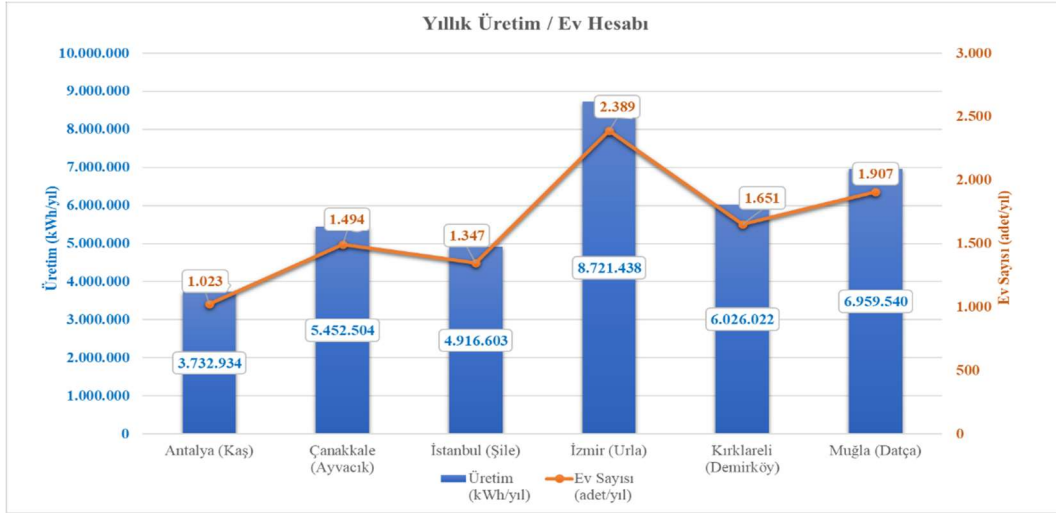
4.1.3.1 Rüzgar Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.11’de görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.11 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	3.732.934	426,134	1.023
Çanakkale (Ayvacık)	5.452.504	622,432	1.494
İstanbul (Şile)	4.916.603	561,256	1.347
İzmir (Urla)	8.721.438	995,598	2.389
Kırklareli (Demirköy)	6.026.022	687,902	1.651
Muğla (Datça)	6.959.540	794,468	1.907

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, rüzgar türbininden elde edilen güç diğer lokasyonlara kıyasla İzmir/Urla’da en yüksektir. İzmir’i Muğla, Kırklareli, Çanakkale, İstanbul ve Antalya takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının İzmir/Urla bölgesinde, en düşük sayının ise Antalya/Kaş bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Rüzgar türbini verimliliğinin %90 olduğu varsayılmıştır. Rüzgar türbininin ekserji verimliliği ise yaklaşık %31,5 olarak hesaplanmıştır.

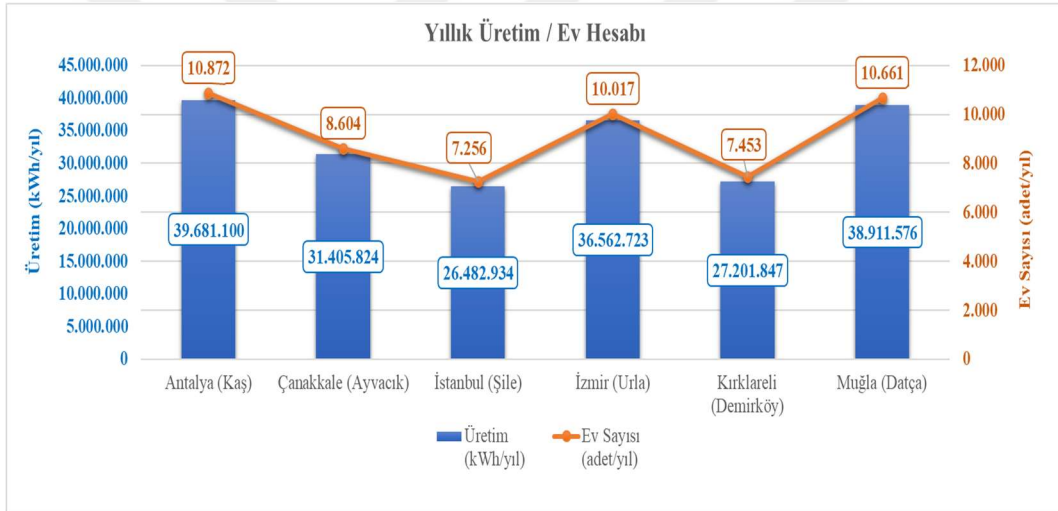
4.1.3.2 Fotovoltaik Sistemin (PV) Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.12’de görüldüğü üzere her iki model esas alınarak bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.12 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	39.681.100	4.529,806	10.872
Çanakkale (Ayvacık)	31.405.824	3.585,140	8.604
İstanbul (Şile)	26.482.934	3.023,166	7.256
İzmir (Urla)	36.562.723	4.173,827	10.017
Kırklareli (Demirköy)	27.201.847	3.105,234	7.453
Muğla (Datça)	38.911.576	4.441,961	10.661

Şekil 4.10’da görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, fotovoltaik enerji sisteminden elde edilen güç Antalya/Kaş'ta en yüksektir. Antalya'yı Muğla, İzmir, Çanakkale, Kırklareli ve İstanbul takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Antalya/Kaş bölgesinde, en düşük sayının ise İstanbul/Şile bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.

- Sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri sırasıyla %26,48 ve %22,01 olarak hesaplanmıştır.

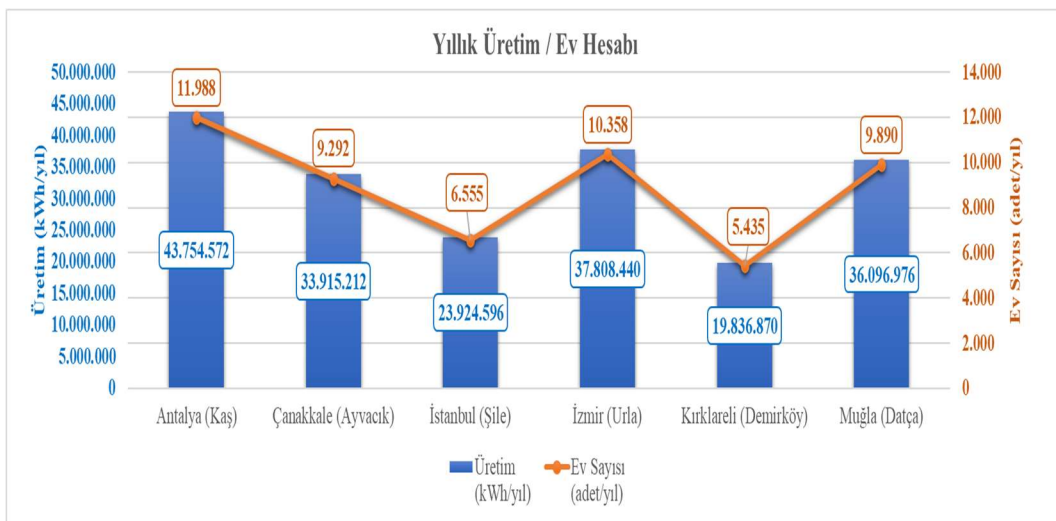
4.1.3.3 Parabolik Güneş Kollektörü Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.13'te görüldüğü üzere her iki model esas alınarak bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.13 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	43.754.572	4.994,814	11.988
Çanakkale (Ayvacık)	33.915.212	3.871,600	9.292
İstanbul (Şile)	23.924.596	2.731,118	6.555
İzmir (Urla)	37.808.440	4.316,032	10.358
Kırklareli (Demirköy)	19.836.870	2.264,483	5.435
Muğla (Datça)	36.096.976	4.120,659	9.890

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, parabolik güneş kollektörü enerji sisteminden elde edilen güç Antalya/Kaş bölgesinde en yüksektir. Antalya'yı İzmir, Muğla, Çanakkale, İstanbul ve Kırklareli takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Antalya/Kaş bölgesinde, en düşük sayının ise Kırklareli/Demirköy bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Sistemin kapasite faktörü %35,7 ile Antalya'da en yüksek ve %16,8 ile Kırklareli'nde en düşük olarak hesaplanmıştır.

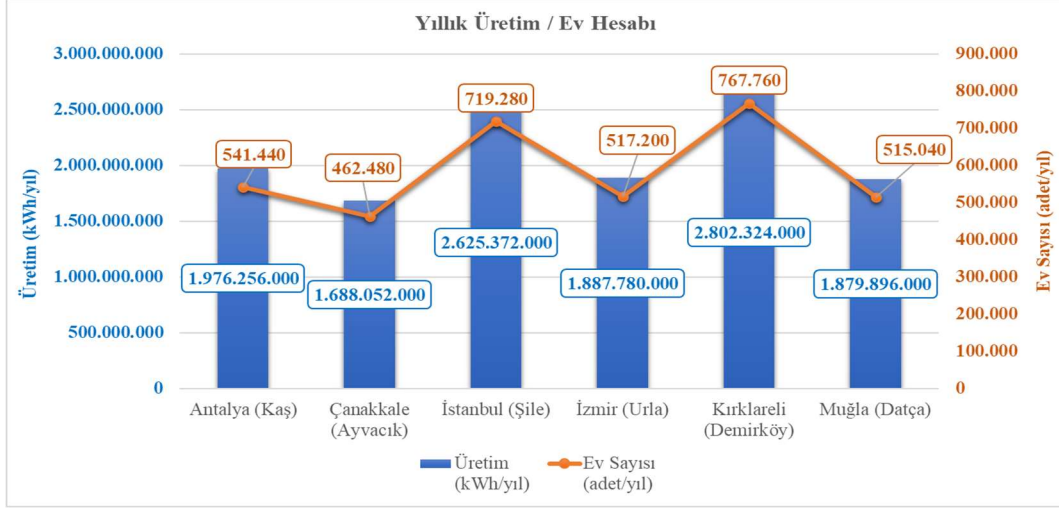
4.1.3.4 Okyanus (Dalga) Enerjisi Sisteminin Termodinamik Sonuçları

Tablo 4.14'te görüldüğü üzere bir evin günlük elektrik enerjisi ihtiyacının 10 kWh olduğu varsayılarak; seçilen lokasyonlar için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış olup yıllık toplam elektrik gücü ve elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayısı hesaplanmıştır.

Tablo 4.14 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	1.976.256.000	225.600	541.440
anakkale (Ayvacık)	1.688.052.000	192.700	462.480
İstanbul (Şile)	2.625.372.000	299.700	719.280
İzmir (Urla)	1.887.780.000	215.500	517.200
Kırklareli (Demirköy)	2.802.324.000	319.900	767.760
Muğla (Datça)	1.879.896.000	214.600	515.040

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev sayısı hesabı grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Seçilen lokasyonlara göre yıllık üretim ve ev hesabı

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Modele göre, dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç Kırklareli/Demirköy bölgesinde en yüksektir. Kırklareli’ni İstanbul, Antalya, İzmir, Muğla and Çanakkale takip etmektedir.
- Hesaplanan güçlere göre elektrik tüketimi karşılanan ev sayısı açısından değerlendirildiğinde; en yüksek sayının Kırklareli/Demirköy bölgesinde, en düşük sayının ise Çanakkale/Ayvacık bölgesinde karşılandığı tespit edilmiştir.
- Dalga enerjisi sisteminin (Tapchan) verimi en çok Kastamonu/Doğanyurt bölgesinde, en az ise İzmir/Urla bölgesinde bulunmuştur.

4.1.3.5 Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinin Termodinamik Sonuçları

Bu bölümde, dalga, güneş ve rüzgar enerjilerinden oluşan entegre bir sistemden üretilebilecek yıllık toplam elektrik enerjisi potansiyeli analiz edilmiştir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurularak, Tablo 4.15’de verildiği gibi yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısını belirlemek için seçilen konumlarda ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 4.15 Seçilen lokasyonlara göre elektrik enerjisi üretimi ve ev sayısı hesabı

Bölgeler	Üretim (kWh/yıl)	Üretim (kW)	Ev Sayısı (adet/yıl)
Antalya (Kaş)	2.063.424.606	235.551	565.322
Çanakkale (Ayvacık)	1.758.825.540	200.779	481.870
İstanbul (Şile)	2.680.696.133	306.016	734.437
İzmir (Urla)	1.970.872.601	224.985	539.965
Kırklareli (Demirköy)	2.855.388.739	325.958	782.298
Muğla (Datça)	1.961.864.092	223.957	537.497

Seçilen lokasyonlar için hesaplamalar yapıp entegre sistemden yıllık toplam elektrik gücünü ve elektrik ihtiyaçlarını karşılayabilecek ev sayısı açısından değerlendirildiğinde, en yüksek Kırklareli/Demirköy, en düşük ise Çanakkale/Ayvacık bölgesi bulunmuştur.

4.2 Optimizasyon ve Maliyet Analizi Sonuçları

4.2.1 Senaryo 1

Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonu yapılan entegre sistemin Senaryo 1'e göre sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 4.16, toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 63.174,91'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, AD, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin 0,9999, hem de düzeltilmiş R² değerinin 1 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri

sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 638,9267 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.16 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	1,099x10 ¹¹	7,853x10 ⁹	63.174,91	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	1,719x10 ⁶	1,719x10 ⁶	13,83	0,0021
B-Fotovoltaik (PV) gücü	3,091x10 ⁷	3,091x10 ⁷	248,71	< 0.0001
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	2,770x10 ⁷	2,770x10 ⁷	222,89	< 0.0001
D-Dalga gücü	1,061x10 ¹¹	1,061x10 ¹¹	8,537x10 ⁵	< 0.0001
AB	3.761,29	3.761,29	0,0303	0,8642
AC	3.379,75	3.379,75	0,0272	0,8712
AD	7,305x10 ⁵	7,305x10 ⁵	5,88	0,0284
BC	59.309,73	59.309,73	0,4772	0,5003
BD	1,310x10 ⁷	1,310x10 ⁷	105,36	< 0.0001
CD	1,174x10 ⁷	1,174x10 ⁷	94,45	< 0.0001
A ²	732,98	732,98	0,0059	0,9398
B ²	870,7	870,7	0,007	0,9344
C ²	854,92	854,92	0,0069	0,935
D ²	1,339x10 ⁹	1,339x10 ⁹	10.771,38	< 0.0001
Standart Sapma	352,56			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	1,0000			
Tahmin Edilen R ²	0,9999			
Yeterli Hassasiyet	638,9267			

Tablo 4.17, toplam ev sayısı için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 63.174,91'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, AD, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşliğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin

doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R^2 değerinin 0,9999, hem de düzeltilmiş R^2 değerinin 1 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 638,9267 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.17 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	3,012x10 ⁷	2,151x10 ⁶	63.174,91	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	471,03	471,03	13,83	0,00
B-Fotovoltaik (PV) gücü	8.469,65	8.469,65	248,71	< 0.0001
C-Parabolik güneş kollektörü gücü	7.590,35	7.590,35	222,89	< 0.0001
D-Dalga gücü	2,907x10 ⁷	2,907x10 ⁷	8,537x10 ⁵	< 0.0001
AB	1,03	1,03	0,0303	0,8642
AC	0,9260	0,9260	0,0272	0,8712
AD	200,1300	200,1300	5,8800	0,0284
BC	16,25	16,25	0,4772	0,5003
BD	3.588,10	3.588,10	105,36	< 0.0001
CD	3.216,60	3.216,60	94,45	< 0.0001
A ²	0,2008	0,2008	0,0059	0,9398
B ²	0,2385	0,2385	0,0070	0,9344
C ²	0,2342	0,2342	0,0069	0,9350
D ²	3,668x10 ⁵	3,668x10 ⁵	10.771,38	< 0.0001
Standart Sapma	5,84			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	1,0000			
Tahmin Edilen R ²	0,9999			
Yeterli Hassasiyet	638,9267			

Tablo 4.18, toplam maliyet için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 35.819'luk önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu

değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. B, C, D, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin 0,9999, hem de düzeltilmiş R² değerinin 0,9999 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 481,0676 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

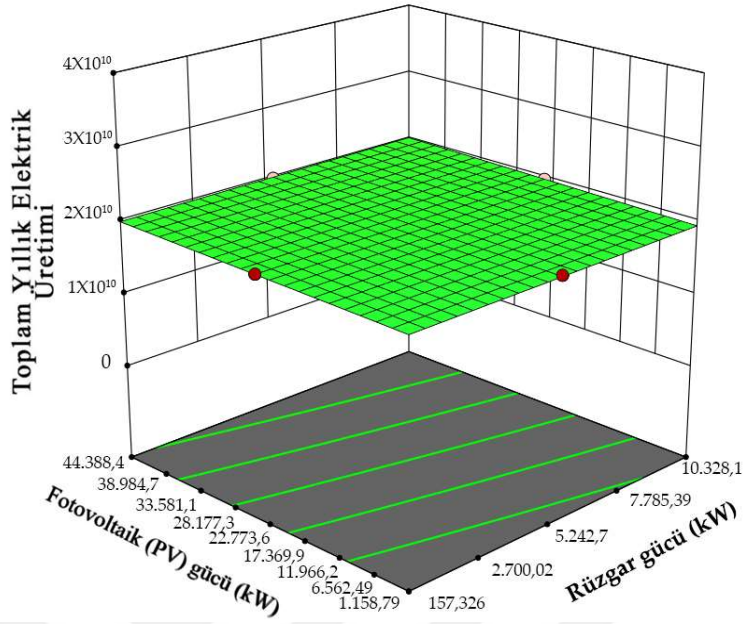
Tablo 4.18 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	3,622x10 ¹⁰	2,587x10 ⁹	35.819,00	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	1,547x10 ⁵	1,547x10 ⁵	2,14	0,1640
B-Fotovoltaik (PV) gücü	4,478x10 ⁵	4,478x10 ⁵	6,20	0,0250
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	3,548x10 ⁷	3,548x10 ⁷	491,29	< 0.0001
D-Dalga gücü	3,493x10 ¹⁰	3,493x10 ¹⁰	4,837x10 ⁵	< 0.0001
AB	16,04	16,04	0,0002	0,9883
AC	1.164,05	1.164,05	0,0161	0,9007
AD	66.166,00	66.166,00	0,9162	0,3537
BC	3.367,87	3.367,87	0,0466	0,8319
BD	1,916x10 ⁵	1,916x10 ⁵	2,65	0,1242
CD	1,502x10 ⁷	1,502x10 ⁷	207,97	< 0.0001
A ²	788,06	788,06	0,0109	0,9182
B ²	790,43	790,43	0,0109	0,9181
C ²	1.102,98	1.102,98	0,0153	0,9033
D ²	4,406x10 ⁸	4,406x10 ⁸	6.100,88	< 0.0001
Standart Sapma	268,74			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	0,9999			
Tahmin Edilen R ²	0,9999			
Yeterli Hassasiyet	481,0676			

Dalga, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü güç faktörlerinin yanıtlar üzerindeki bütünleşik etkisi; üç boyutlu grafiklerde yıllık toplam elektrik üretimi için Şekil (4.13-4.18)'de, toplam ev sayısı için Şekil (4.19-4.24)'de ve toplam maliyet için ise Şekil (4.25-4.30)'de gösterilmektedir. Şekiller (4.13-4.30) incelendiğinde, dalga gücünün tüm yanıtlar üzerindeki etkisinin diğer faktörlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, dalga gücü hesaplamalarında kullanılan denklemler Eşitlik'te (3.42-3.51) analiz edildiğinde dalga yüksekliği, dalga boyu ve rüzgar hızının elektrik üretimini daha fazla etkilemesi olabilir. Dalga enerji sisteminden (Tapchan) üretilen güç, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksektir. Toplam maksimum elektrik üretimi ve minimum maliyetli ev sayısı açısından, dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksek etkiye sahiptir.

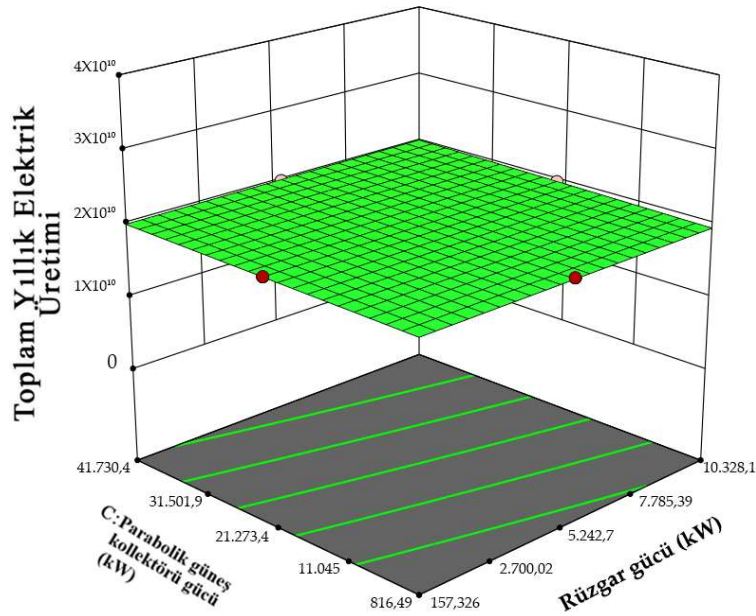
Şekiller (4.25-4.30) incelendiğinde dalga, rüzgar ve güneş enerjisinin bütünleşik halde elektrik üretimini etkileyen tasarım parametrelerinin değişimleri üç boyutlu grafikler halinde gösterilmiş olup bu parametrelerin optimize edilmesindeki amaç elektrik üretimini maksimize etmek ve verimliliği arttırmaktır. Bu sistemin ana hedefi, sürdürülebilir bir gelecek için karbon emisyonlarını (iklim değişikliği, sera gazları vb.) ve çevre kirliliğini azaltarak temiz enerji üretmektir. Bu nedenle, bu sistemin optimize edilmesi, en az maliyetle temiz elektrik üretim miktarının artırılmasına yardımcı olmaktır. Sonuçlar incelendiğinde, dalga enerjisi girdisinin elektrik üretimi için en etkili tasarım parametreleri arasında olduğu ve bu parametredeki değişikliklerin sistemin genel elektrik üretim oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği görülmektedir. Buna karşılık, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü enerjisinin toplam elektrik üretimini artırmada sınırlı bir etkisi olabildiği de görülmektedir. Bu parametrelerdeki değişiklikler tüm sistemin maliyetini önemli ölçüde artırabilir. Rüzgar, dalga, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörlerinden entegre biçimde elektrik üretmek için ortalama toplam kurulum maliyetleri rüzgar 1498,6 USD/kW [48], dalga 2881 USD/kW [99,100,101], fotovoltaik 600 USD/kW [41] ve parabolik güneş kolektörleri 5690,22 USD/kW [48] alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



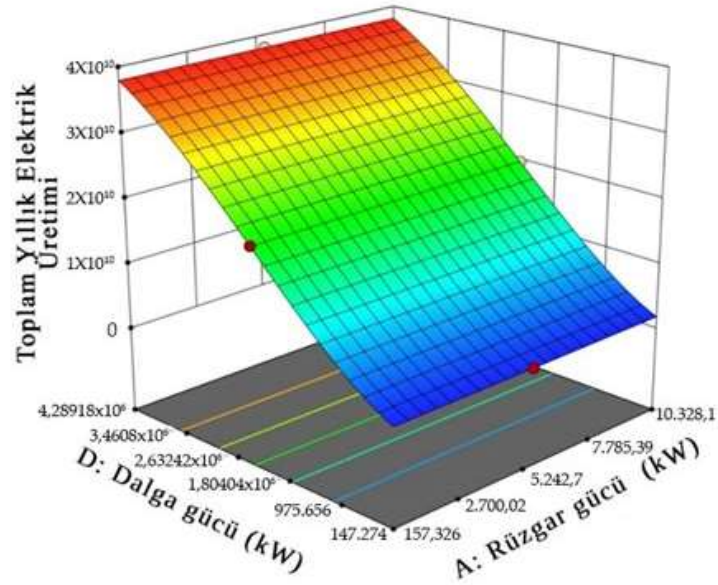
Şekil 4.13 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



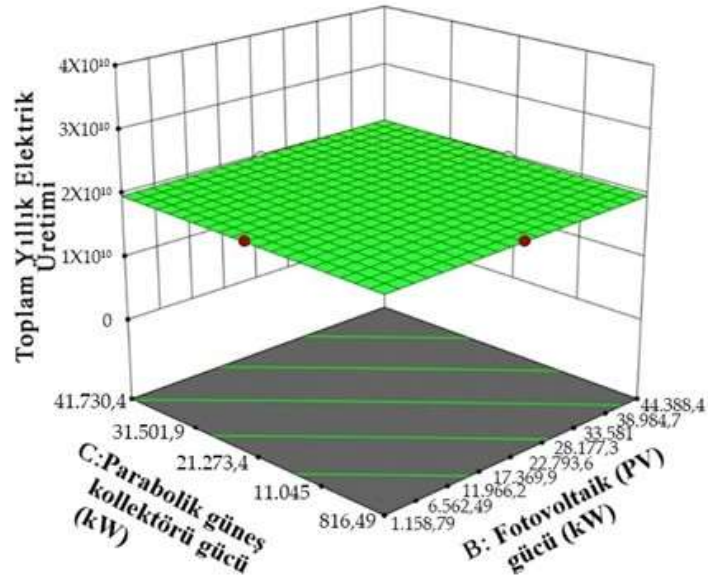
Şekil 4.14 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



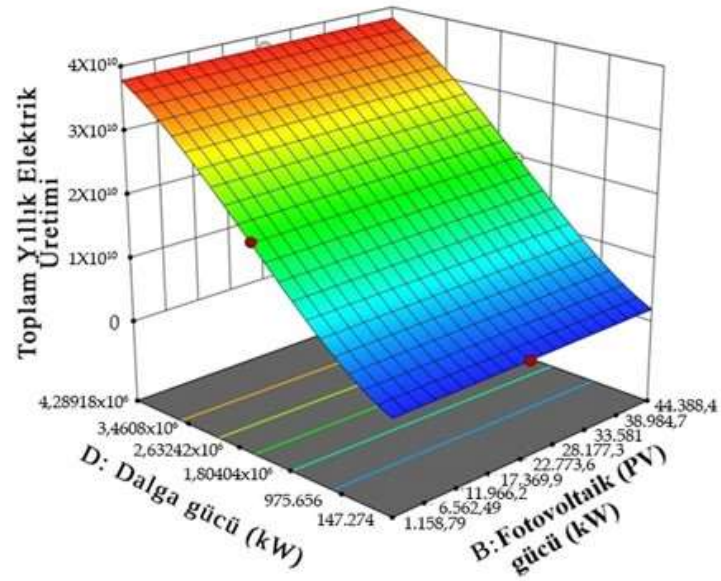
Şekil 4.15 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



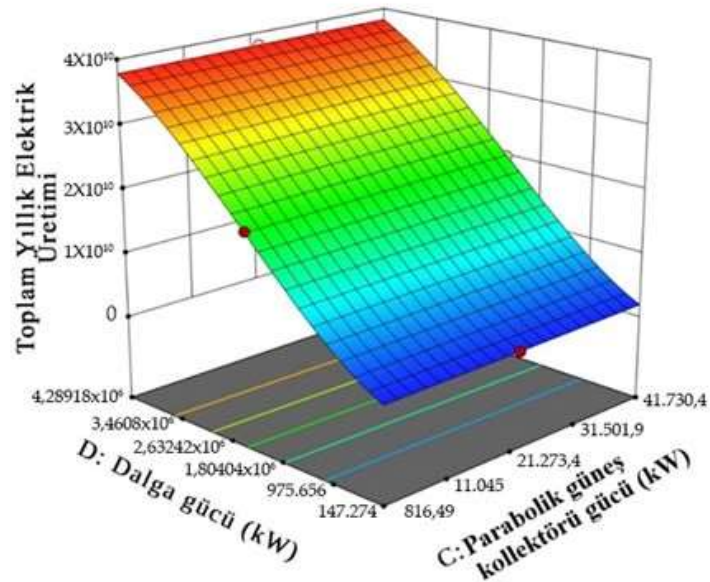
Şekil 4.16 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



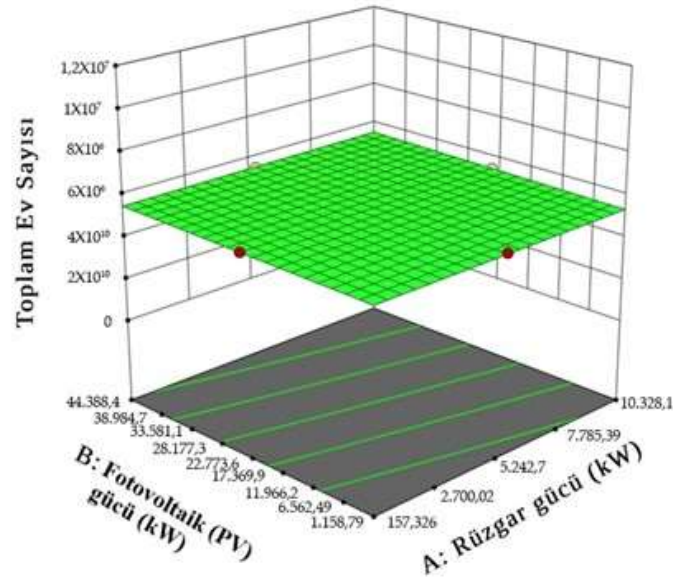
Şekil 4.17 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



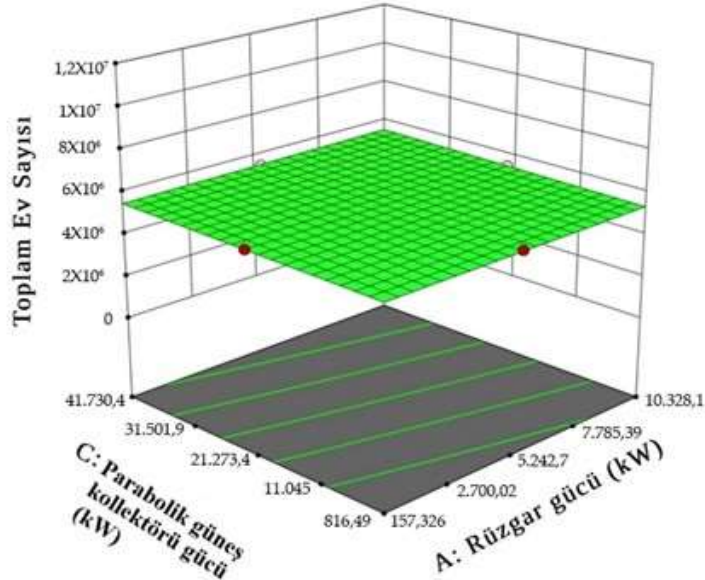
Şekil 4.18 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



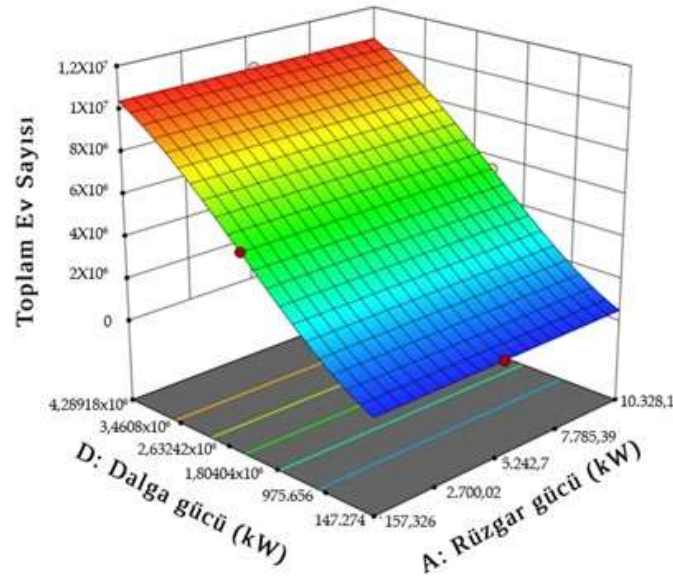
Şekil 4.19 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



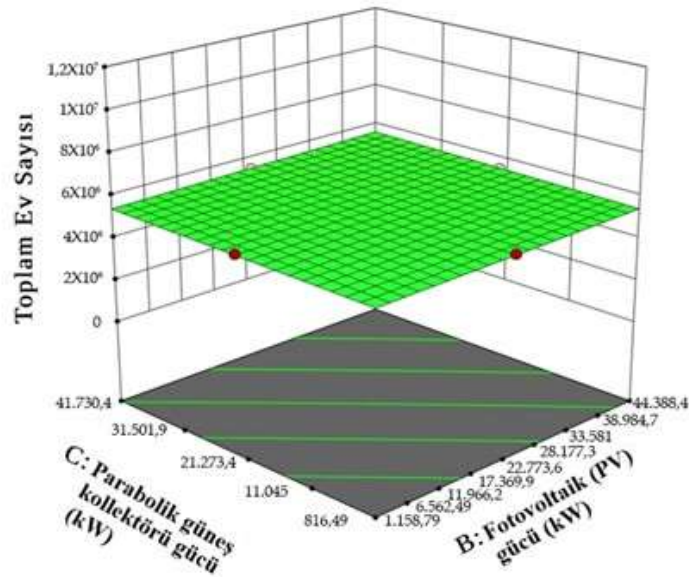
Şekil 4.20 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



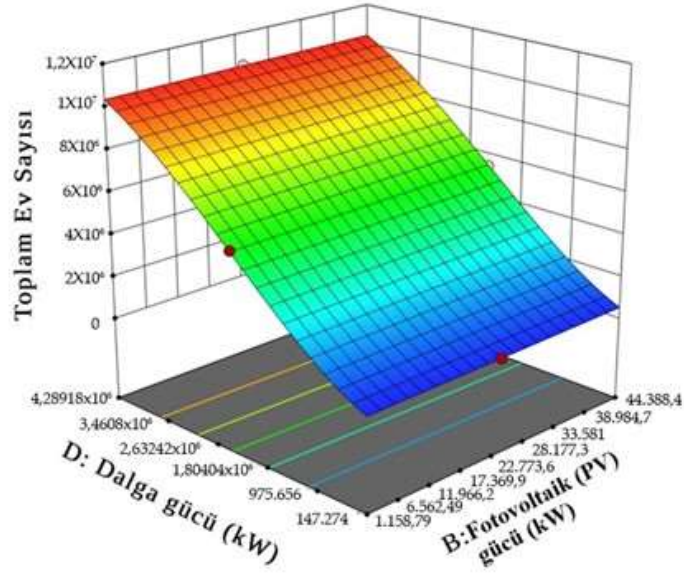
Şekil 4.21 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



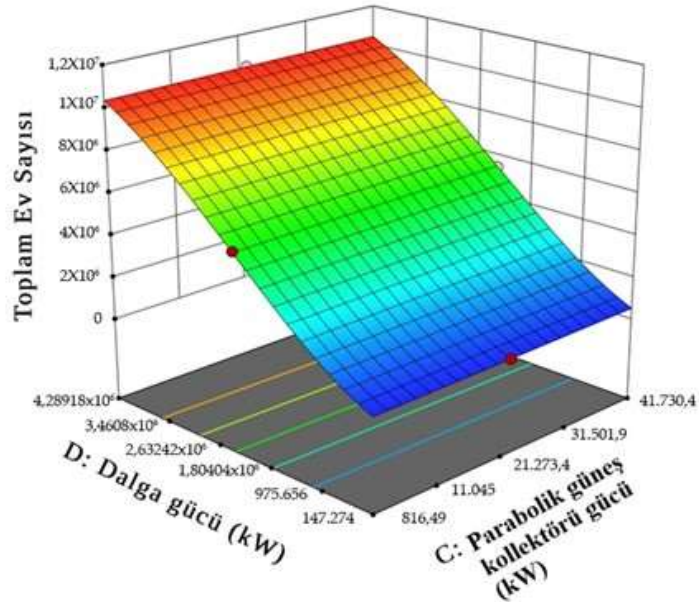
Şekil 4.22 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



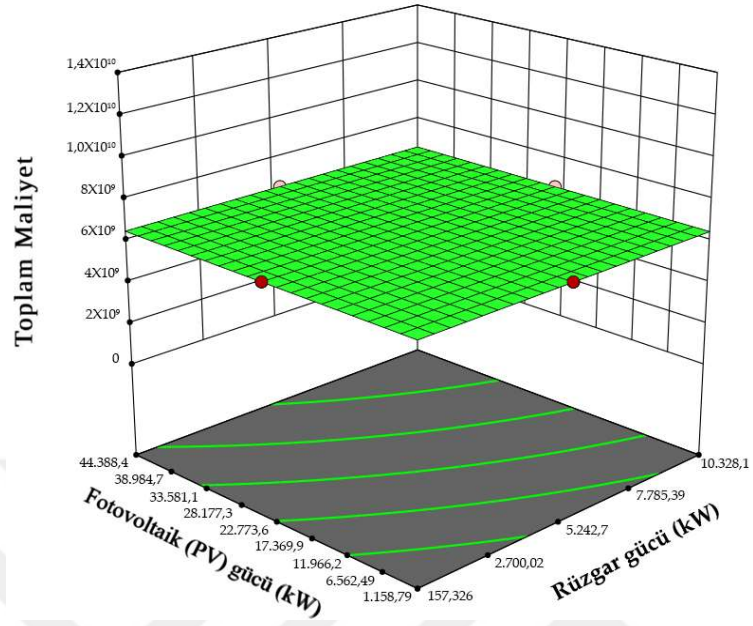
Şekil 4.23 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



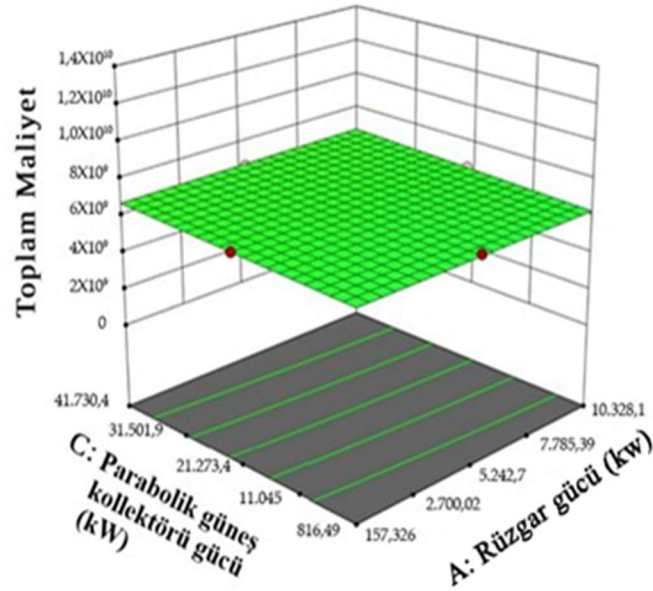
Şekil 4.24 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



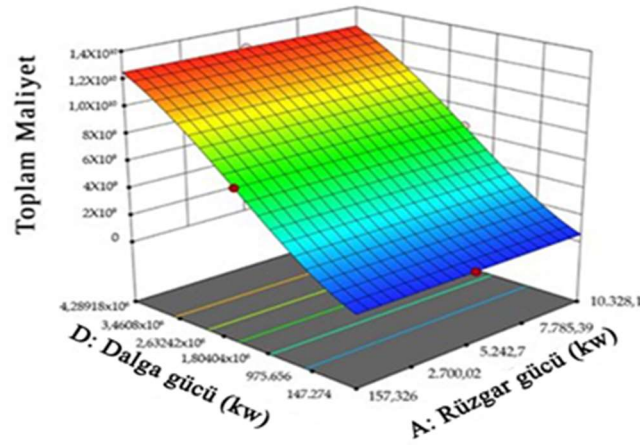
Şekil 4.25 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



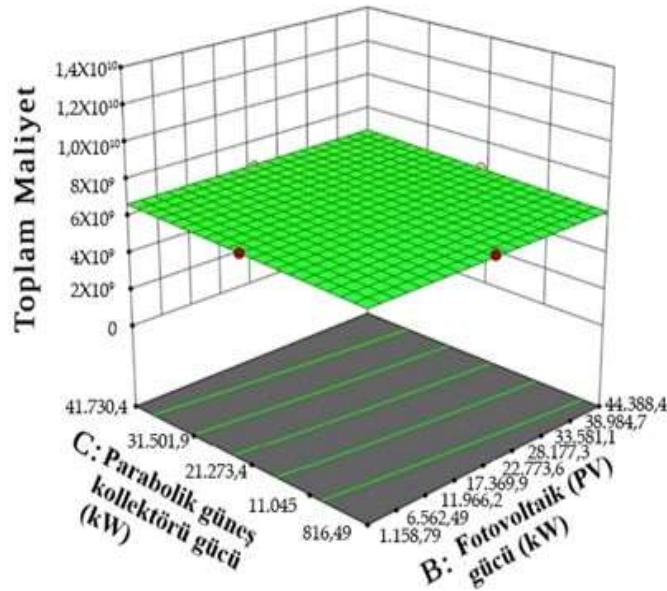
Şekil 4.26 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



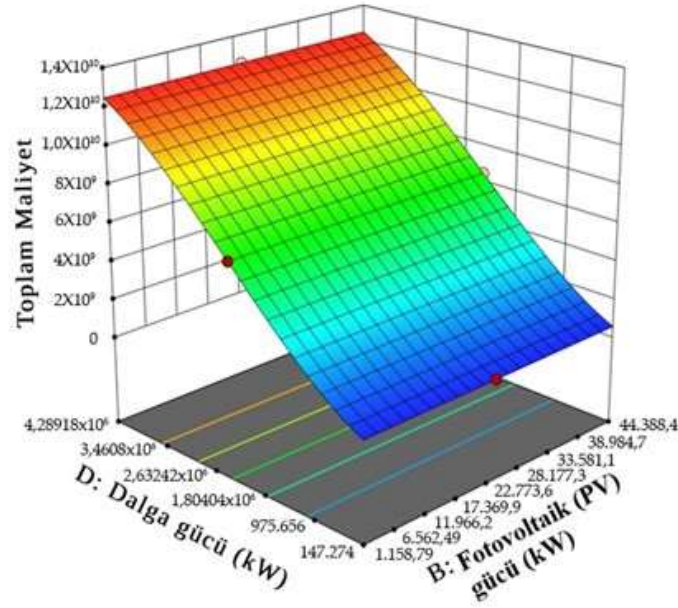
Şekil 4.27 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



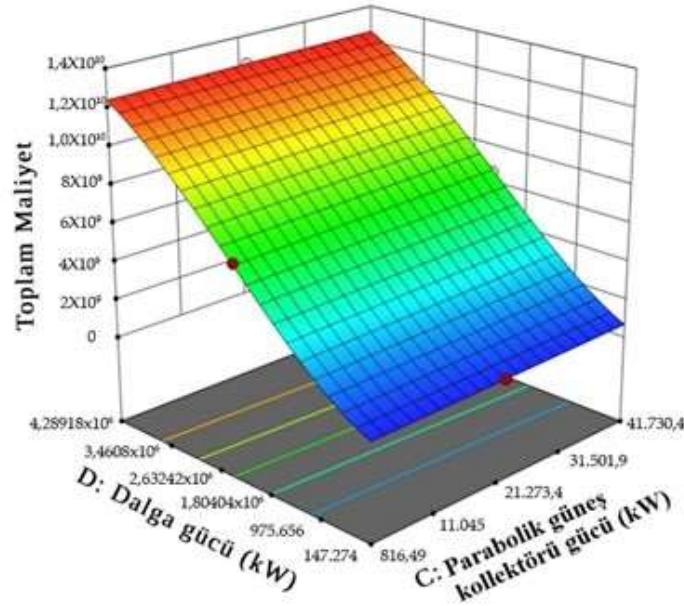
Şekil 4.28 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



Şekil 4.30 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Tablo 4.19, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) hesaplamalarından elde edilen optimum çözümü göstermektedir. Bu yanıtları elde etmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Rüzgar gücü, PV gücü, parabolik güç ve dalga gücü için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 10.327,031, 44.376,783, 816,767 ve 2.278.167,161'dır. Bu optimum değerler için istenirlik fonksiyonu hesaplanmış olup 0 ile 1 arasında bulunmaktadır. İstenirliğin 1 değerine yakın olması amaçlanan tüm şartların eş zamanda sağlandığını göstererek, optimizasyonun başarı ölçütü olarak değerlendirilir. Bu çalışmada, en yüksek istenirlik değerine sahip çözümün istenirlik değeri 0,537 bulunmuş olup RSM'nin hassasiyetini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.19 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları

Faktörler	Amaç	Alt Limit	Üst Limit
A-Rüzgar gücü (kW)	aralıkta	157,326	10.328,1
B-Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	aralıkta	1.158,79	44.388,4
C-Parabolik güneş kolektörü gücü (kW)	aralıkta	816,49	41.730,4
D-Dalga gücü (kW)	aralıkta	147.274	4.289.180,0
Cevaplar			
Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	maksimize	1.308.800.000	38.418.100.000
Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	maksimize	358.576	10.525.500
Toplam Maliyet (\$)	minimize	429.873.000	12.636.700.000

Tablo 4.20, maksimum elektrik üretimi ve ev sayısı ile minimum maliyete dayalı olarak kurulacak sistem için 100 üzerinden en iyi 10 sonucu sunmaktadır. Optimum faktörler, 20.600,053 (GWh/yıl) toplam elektrik üretim oranına, 5.643.850 (adet/yıl) toplam ev sayısına ve 6.550.944.954 (\$) toplam maliyete ulaşmayı hedeflemektedir. Optimize edilen faktörler, önerilen entegre enerji sisteminin genel maliyetine ve fizibilitesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Seçilen faktörlerin optimizasyonu, amaç fonksiyonları için optimum değerleri belirleyen RSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm yanıtları optimize etmek için istatistiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Yanıt çıktıları, maksimum elektrik üretimi

ve ev sayısının yanı sıra minimum maliyet açısından elde edilmiştir. Bu analize dayanarak, rüzgar ve fotovoltaik enerji gücü sonuçları maksimum üst limitlerine, parabolik güneş kolektörü alt limite ve dalga enerjisi girdileri ise aralıkta bir değere yakın bulunarak optimize edilmiştir. Bu durum, rüzgar ve fotovoltaik enerji üretiminin toplam maliyeti artırmada daha düşük, parabolik güneş kolektörünün yüksek ve dalga enerjisinin ise orta değerde bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.20 Faktörlerin optimum değerleri

Sayı	Rüzgar Gücü (kW)	Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Parabolik Güneş Kolektörü Gücü (kW)	Dalga Gücü (kW)	Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Toplam Maliyet (\$)	İstenilen Hedefe Ulaşma	
1	10.327,031	44.376,783	816,767	2.278.167,161	20.600,053	5.643.850	6.550.944.954	0,537	Seçilen
2	10.324,623	44.387,661	824,496	2.260.721,704	20.418,421	5.594.088	6.490.898.152	0,537	
3	10.041,758	44.386,890	819,485	2.277.256,221	20.586,438	5.640.120	6.547.259.856	0,537	
4	10.099,227	44.388,352	860,368	2.276.253,070	20.577,557	5.637.687	6.544.374.245	0,537	
5	10.325,869	44.188,797	818,246	2.278.200,850	20.597,182	5.643.064	6.550.887.350	0,537	
6	10.319,466	44.386,237	964,245	2.285.657,815	20.680,605	5.665.919	6.578.379.980	0,537	
7	9.861,533	44.385,674	817,953	2.276.985,092	20.580,809	5.638.578	6.545.928.151	0,537	
8	9.932,066	44.341,411	819,975	2.276.702,413	20.578,214	5.637.867	6.545.081.137	0,537	
9	9.718,670	44.384,919	816,523	2.279.942,111	20.609,406	5.646.413	6.555.798.392	0,537	
10	9.573,699	44.385,454	820,562	2.279.007,362	20.597,505	5.643.152	6.552.307.236	0,537	

Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjisi sisteminin optimizasyon sonuçlarına dayanarak, sistemin en uygun şehir olan Muğla/Datça bölgesinde kurulmasının bölgenin elektrik talebinin önemli bir kısmını karşılayacağı beklenmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre [102], Muğla ili için 2022 yılı tüketim miktarı 3.881,48453 GWh olarak bildirilmiştir. Dolayısıyla, kurulması önerilen sistem, bu çalışmada hesaplandığı üzere (20.600,053 GWh) Muğla ilinin bildirilen elektrik talebinin tamamından fazlasını karşılayabilecek potansiyele sahiptir.

Senaryo 1'e göre seçilen lokasyonlar için optimizasyon yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgar, fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş enerjisine göre en yüksektir.
- Toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en fazla etki dalga enerjisinden kaynaklanmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları dalga enerjisinde göre dahaz az etki etmektedir.
- Optimizasyon sonuçlarına göre, toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en optimum şehir olarak Muğla/Datça bulunmuş olup istenirlik değeri 0,537'dir.
- Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjileri dikkate alındığında, Muğla/Datça bölgesinde entegre sistemin kurulmasının bölgenin elektrik ihtiyacının tamamından fazlasını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu hesaplanmıştır.

4.2.2 Senaryo 2

Optimizasyonu yanıt yüzey yöntemi ile yapılan entegre sistemin Senaryo 2'ye göre sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 4.21, toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 3.860,81'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin 0,9979, hem de düzeltilmiş R² değerinin 0,9995 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini

optimize etmeye uygunluğu, 164,4617 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.21 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	5,117x10 ¹⁰	3,655x10 ⁹	3.860,81	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	4,928x10 ⁶	4,928x10 ⁶	5,20	0,0375
B-Fotovoltaik (PV) gücü	3,423x10 ⁷	3,423x10 ⁷	36,16	< 0.0001
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	6,470x10 ⁷	6,470x10 ⁷	68,33	< 0.0001
D-Dalga gücü	4,949x10 ¹⁰	4,949x10 ¹⁰	52.276,94	< 0.0001
AB	1,233x10 ⁶	1,233x10 ⁶	1,30	0,2717
AC	2,572x10 ⁶	2,572x10 ⁶	2,72	0,1201
AD	6,263x10 ⁵	6,263x10 ⁵	0,6615	0,4288
BC	3,390x10 ⁶	3,390x10 ⁶	3,58	0,0779
BD	9,052x10 ⁶	9,052x10 ⁶	9,56	0,0074
CD	3,031x10 ⁷	3,031x10 ⁷	32,01	< 0.0001
A ²	13.457,78	13.457,78	0,0142	0,9067
B ²	12.249,21	12.249,21	0,0129	0,9109
C ²	12.411,46	12.411,46	0,0131	0,9104
D ²	5,616x10 ⁸	5,616x10 ⁸	593,21	< 0.0001
Standart Sapma	973,02			
R ²	0,9997			
Düzeltilmiş R ²	0,9995			
Tahmin Edilen R ²	0,9979			
Yeterli Hassasiyet	164,4617			

Tablo 4.22, toplam ev sayısı için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 3.860,81'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşliğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin 0,9979, hem

de düzeltilmiş R^2 değerinin 0,9995 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 164,4617 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.22 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	1,402x10 ⁷	1,001x10 ⁶	3.860,81	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	1.350,09	1.350,09	5,20	0,0375
B-Fotovoltaik (PV) gücü	9.378,56	9.378,56	36,16	< 0.0001
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	17.724,99	17.724,99	68,33	< 0.0001
D-Dalga gücü	1,356x10 ⁷	1,356x10 ⁷	52.276,94	< 0.0001
AB	337,81	337,81	1,30	0,2717
AC	704,65	704,65	2,72	0,1201
AD	171,58	171,58	0,6615	0,4288
BC	928,80	928,80	3,58	0,0779
BD	2.479,93	2.479,93	9,56	0,0074
CD	8.304,19	8.304,19	32,01	< 0.0001
A ²	3,69	3,69	0,0142	0,9067
B ²	3,36	3,36	0,0129	0,9109
C ²	3,40	3,40	0,0131	0,9104
D ²	1,539x10 ⁵	1,539x10 ⁵	593,21	< 0.0001
Standart Sapma	16,11			
R ²	0,9997			
Düzeltilmiş R ²	0,9995			
Tahmin Edilen R ²	0,9979			
Yeterli Hassasiyet	164,4617			

Tablo 4.23, toplam maliyet için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 11.622,45'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir.

A, B, C, D, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin 0,9996, hem de düzeltilmiş R² değerinin 0,9998 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 283,7639 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

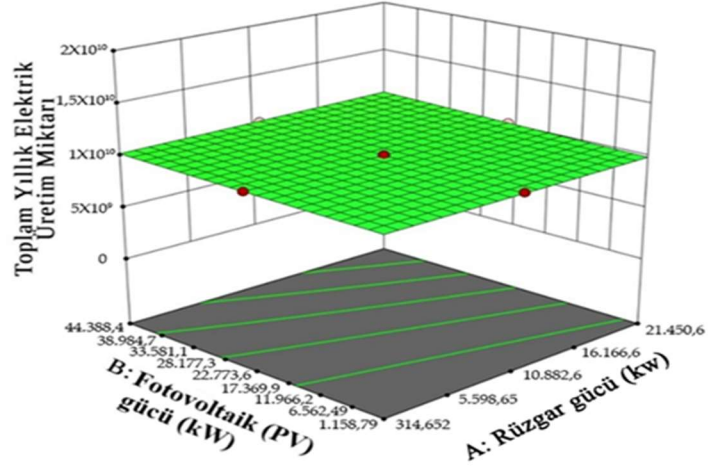
Tablo 4.23 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	1,722x10 ¹⁰	1,230x10 ⁹	11.622,45	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	1,143x10 ⁶	1,143x10 ⁶	10,80	0,0050
B-Fotovoltaik (PV) gücü	7,670x10 ⁵	7,670x10 ⁵	7,25	0,0167
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	5,926x10 ⁷	5,926x10 ⁷	559,95	< 0.0001
D-Dalga gücü	1,660x10 ¹⁰	1,660x10 ¹⁰	1,568x10 ⁵	< 0.0001
AB	338,64	338,64	0,0032	0,9556
AC	21.013,91	21.013,91	0,1985	0,6623
AD	4,456x10 ⁵	4,456x10 ⁵	4,21	0,0581
BC	14.118,63	14.118,63	0,1334	0,7200
BD	2,990x10 ⁵	2,990x10 ⁵	2,8200	0,1135
CD	2,243x10 ⁷	2,243x10 ⁷	211,90	< 0.0001
A ²	3.161,44	3.161,44	0,0299	0,8651
B ²	3.151,86	3.151,86	0,0298	0,8653
C ²	4.907,28	4.907,28	0,0464	0,8324
D ²	1,905x10 ⁸	1,905x10 ⁸	1.799,89	< 0.0001
Standart Sapma	325,33			
R ²	0,9999			
Düzeltilmiş R ²	0,9998			
Tahmin Edilen R ²	0,9996			
Yeterli Hassasiyet	283,7639			

Dalga, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü güç faktörlerinin yanıtlar üzerindeki bütünleşik etkisi; üç boyutlu grafiklerde yıllık toplam elektrik üretimi için Şekil (4.31-4.36)'de, toplam ev sayısı için Şekil (4.37-4.42)'de ve toplam maliyet için ise Şekil (4.43-4.48)'de gösterilmektedir. Şekiller (4.31-4.48) incelendiğinde, dalga gücünün tüm yanıtlar üzerindeki etkisinin diğer faktörlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, dalga gücü hesaplamalarında kullanılan denklemler Eşitlik (3.42-3.51)'te analiz edildiğinde dalga yüksekliği, dalga boyu ve rüzgar hızının elektrik üretimini daha fazla etkilemesi olabilir. Dalga enerji sisteminden (Tapchan) üretilen güç, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksektir. Toplam maksimum elektrik üretimi ve minimum maliyetli ev sayısı açısından, dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksek etkiye sahiptir.

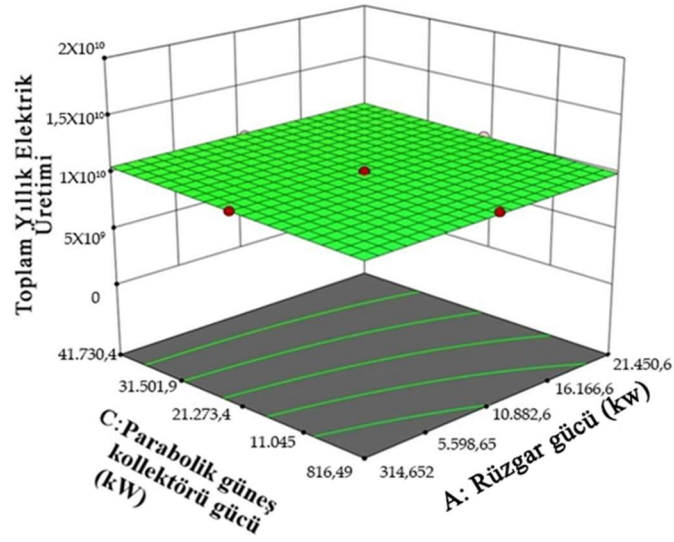
Şekiller (4.43-4.48) incelendiğinde dalga, rüzgar ve güneş enerjisinin bütünleşik halde elektrik üretimini etkileyen tasarım parametrelerinin değişimleri üç boyutlu grafikler halinde gösterilmiş olup bu parametrelerin optimize edilmesindeki amaç elektrik üretimini maksimize etmek ve verimliliği arttırmaktır. Bu sistemin ana hedefi, sürdürülebilir bir gelecek için karbon emisyonlarını (iklim değişikliği, sera gazları vb.) ve çevre kirliliğini azaltarak temiz enerji üretmektir. Bu nedenle, bu sistemin optimize edilmesi, en az maliyetle temiz elektrik üretim miktarının artırılmasına yardımcı olmaktır. Sonuçlar incelendiğinde, dalga enerjisi girdisinin elektrik üretimi için en etkili tasarım parametreleri arasında olduğu ve bu parametredeki değişikliklerin sistemin genel elektrik üretim oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği görülmektedir. Buna karşılık, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü enerjisinin toplam elektrik üretimini artırmada sınırlı bir etkisi olabildiği de görülmektedir. Bu parametrelerdeki değişiklikler tüm sistemin maliyetini önemli ölçüde artırabilir. Rüzgar, dalga, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörlerinden entegre biçimde elektrik üretmek için ortalama toplam kurulum maliyetleri Senaryo 1'de alınan veriler ile aynı olup bu doğrultuda hesaplamalar yapılmıştır.

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



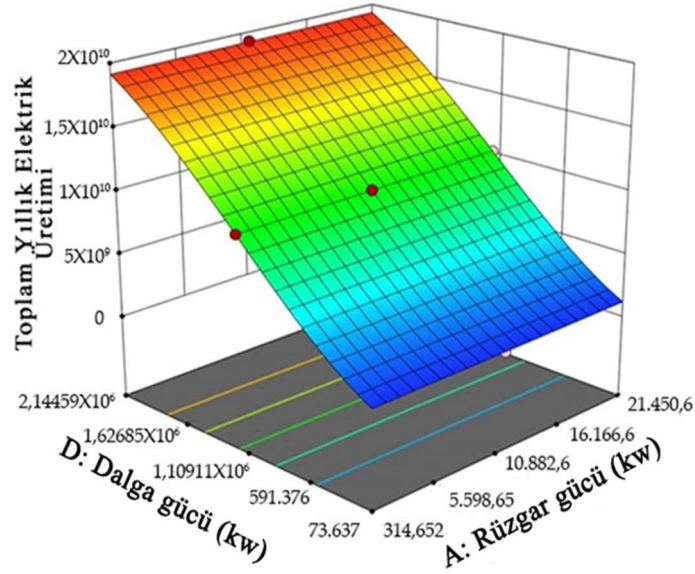
Şekil 4.31 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



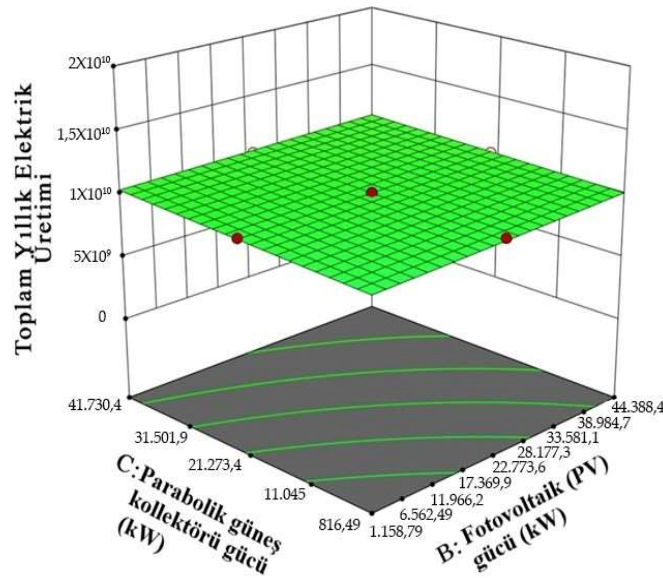
Şekil 4.32 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



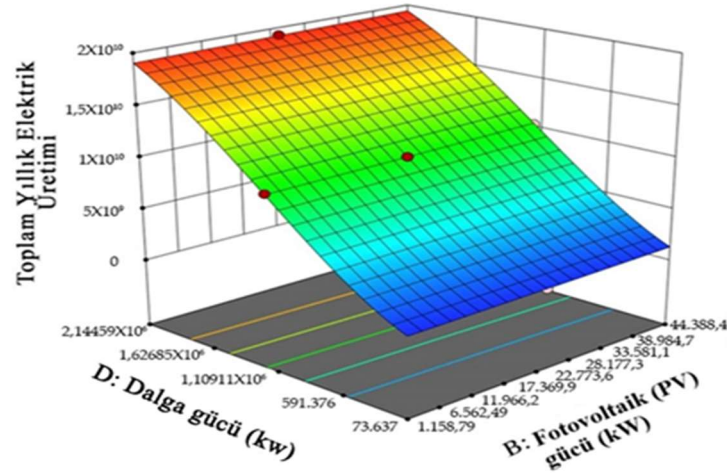
Şekil 4.33 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.34’de gösterilmiştir.



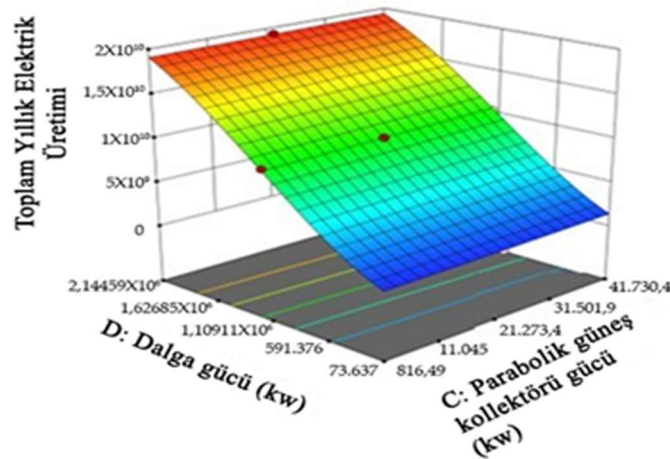
Şekil 4.34 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.35’de gösterilmiştir.



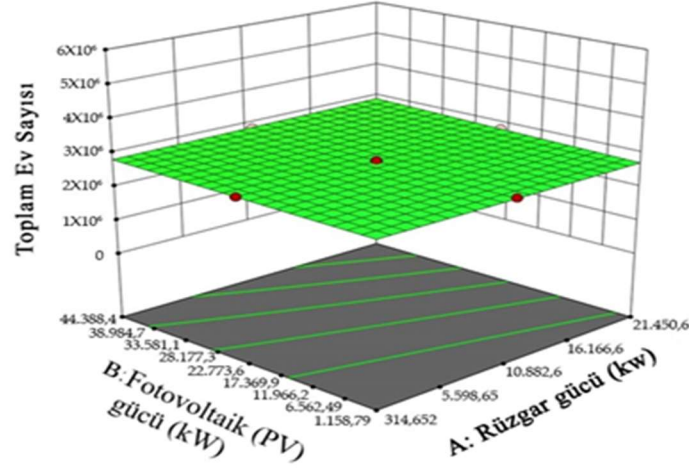
Şekil 4.35 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.36’da gösterilmiştir.



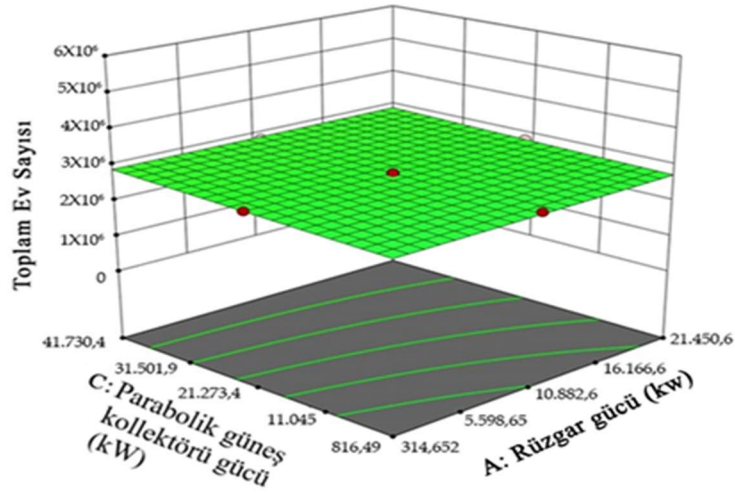
Şekil 4.36 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



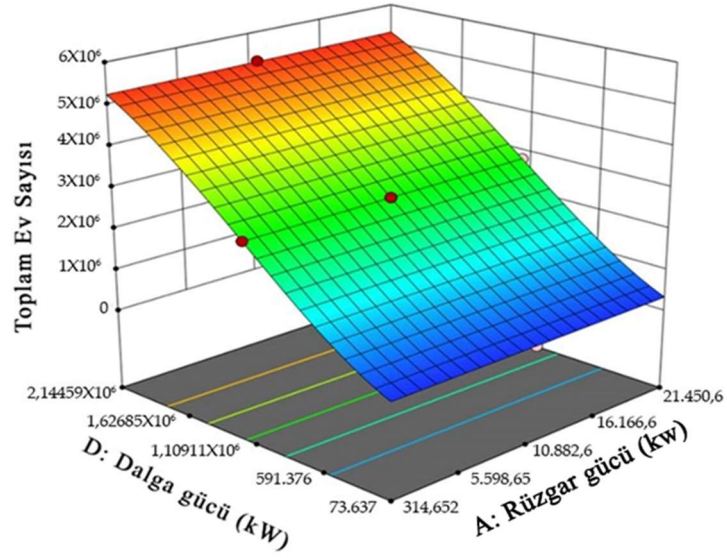
Şekil 4.37 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



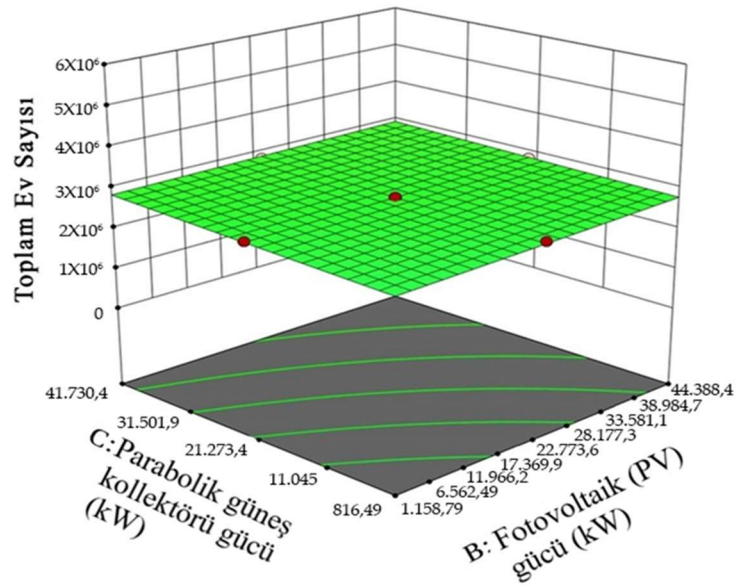
Şekil 4.38 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



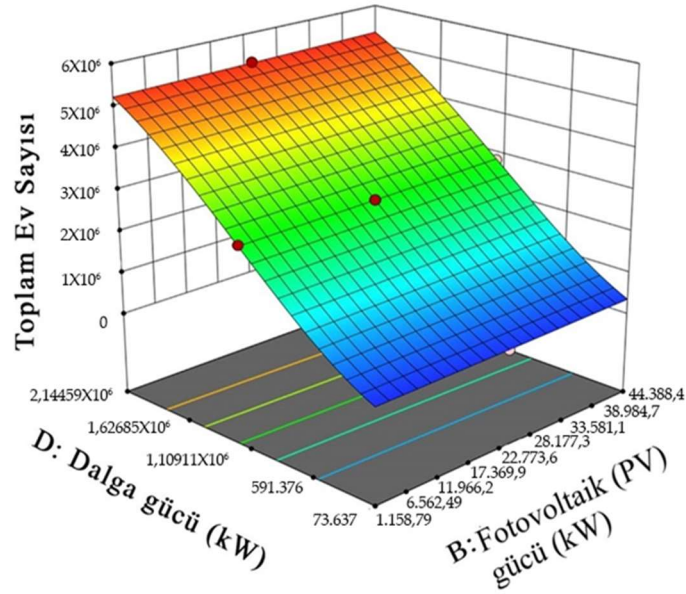
Şekil 4.39 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.40’da gösterilmiştir.



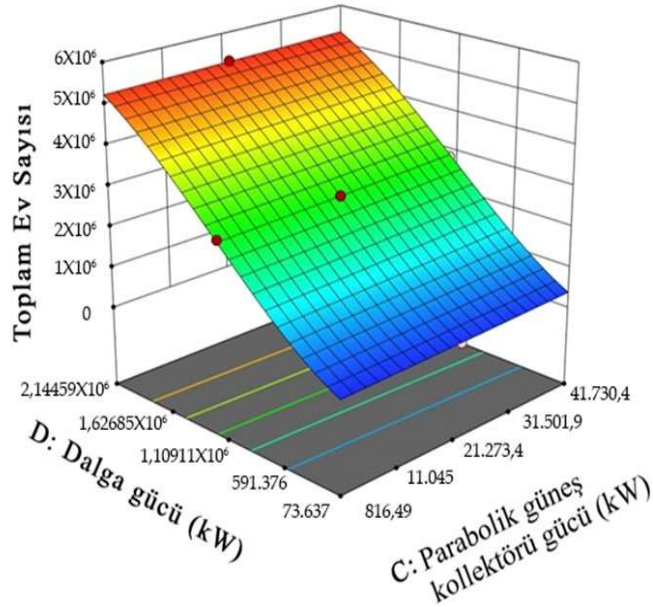
Şekil 4.40 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



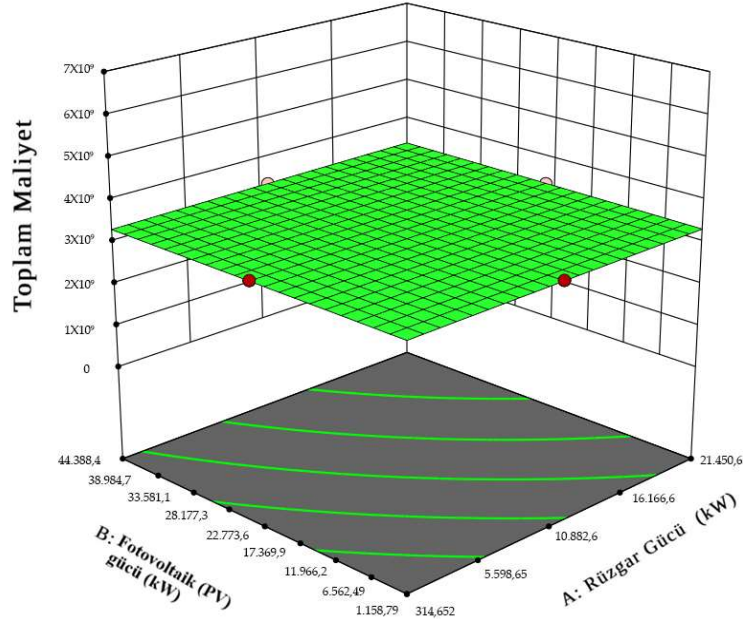
Şekil 4.41 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



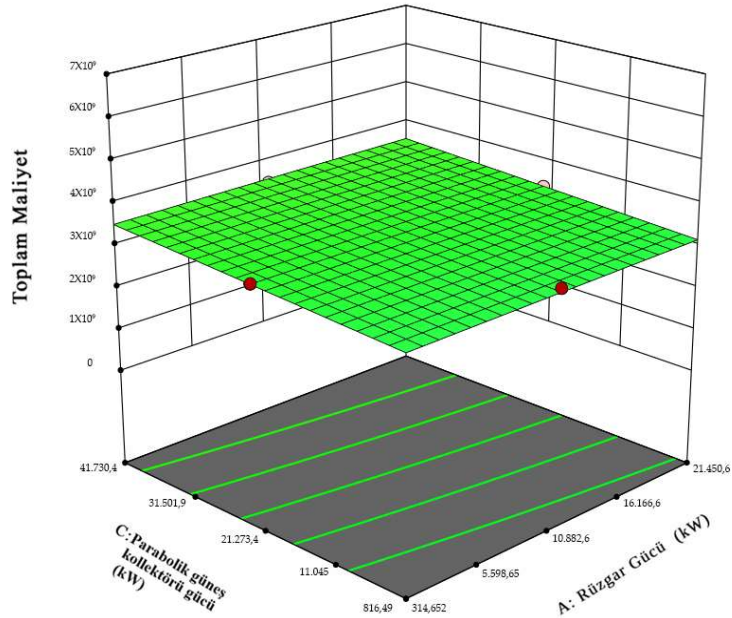
Şekil 4.42 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.43’de gösterilmiştir.



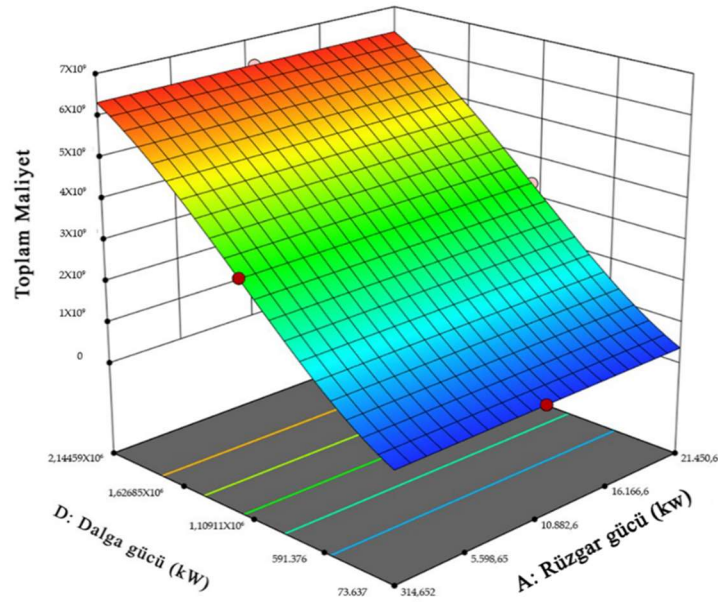
Şekil 4.43 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.44’de gösterilmiştir.



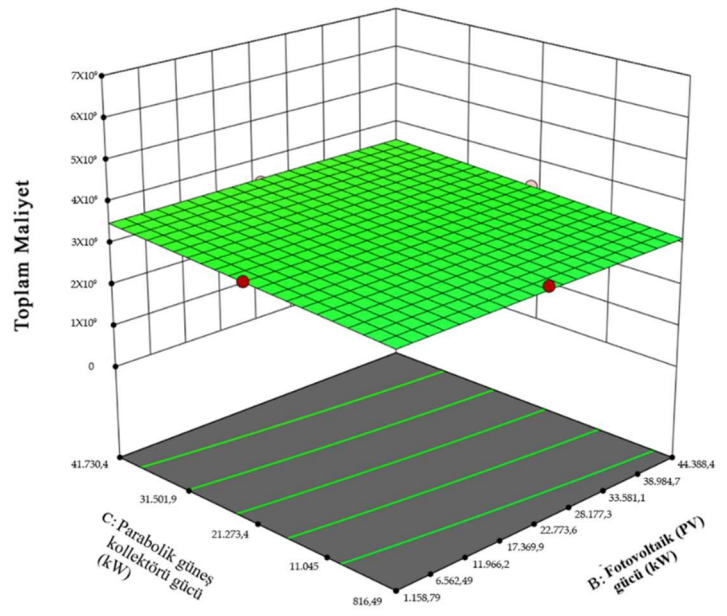
Şekil 4.44 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.45’de gösterilmiştir.



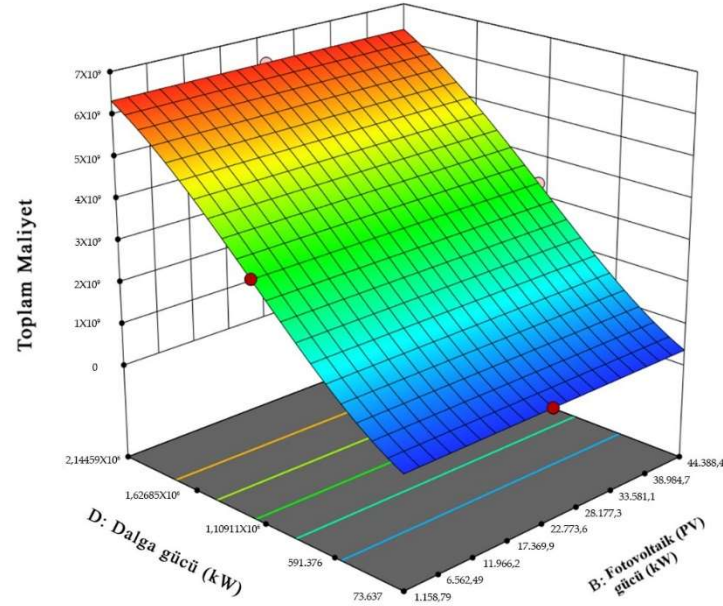
Şekil 4.45 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.46’da gösterilmiştir.



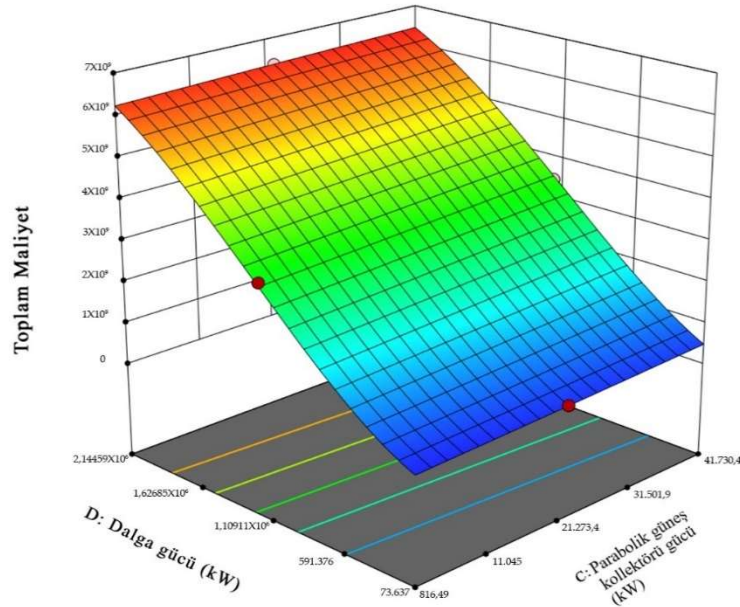
Şekil 4.46 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.47’de gösterilmiştir.



Şekil 4.47 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.48’de gösterilmiştir.



Şekil 4.48 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Tablo 4.24, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) hesaplamalarından elde edilen optimum çözümü göstermektedir. Bu yanıtları elde etmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Rüzgar gücü, PV gücü, parabolik güç ve dalga gücü için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 21.449,891, 44.377,985, 816,971 ve 1.141.363,260'dır Bu optimum değerler için istenirlik fonksiyonu hesaplanmış olup 0 ile 1 arasında bulunmaktadır. İstenirliğin 1 değerine yakın olması amaçlanan tüm şartların eş zamanda sağlandığını göstererek, optimizasyonun başarı ölçütü olarak değerlendirilir. Bu çalışmada, en yüksek istenirlik değerine sahip çözümün istenirlik değeri 0,546 bulunmuş olup RSM'nin hassasiyetini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.24 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları

Faktörler	Amaç	Alt Limit	Üst Limit
A-Rüzgar gücü (kW)	aralıkta	314,652	21.450,6
B-Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	aralıkta	1.158,79	44.388,4
C-Parabolik güneş kolektörü gücü (kW)	aralıkta	816,49	41.730,4
D-Dalga gücü (kW)	aralıkta	73.637	2.144.590
Cevaplar			
Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	maksimize	665.120.000	19.728.900.000
Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	maksimize	182.225	5.405.190
Toplam Maliyet (\$)	minimize	217.961.000	6.474.800.000

Tablo 4.25, maksimum elektrik üretimi ve ev sayısı ile minimum maliyete dayalı olarak kurulacak sistem için 100 üzerinden en iyi 10 sonucu sunmaktadır. Optimum faktörler, 10.794,208 (GWh/yıl) toplam elektrik üretim oranına, 2.957.317 (adet/yıl) toplam konut sayısına ve 3.297.381.866 (\$) toplam maliyete ulaşmayı hedeflemektedir. Optimize edilen faktörler, önerilen entegre enerji sisteminin genel maliyetine ve fizibilitesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Seçilen faktörlerin optimizasyonu, amaç fonksiyonları için optimum değerleri belirleyen RSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm yanıtları optimize etmek için istatistiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Yanıt çıktıları, maksimum elektrik üretimi

ve ev sayısının yanı sıra minimum maliyet açısından elde edilmiştir. Bu analize dayanarak, rüzgar ve fotovoltaik enerji gücü sonuçları maksimum üst limitlerine, parabolik güneş kolektörü alt limite ve dalga enerjisi girdileri ise aralıkta bir değere yakın bulunarak optimize edilmiştir. Bu durum, rüzgar ve fotovoltaik enerji üretiminin toplam maliyeti artırmada daha düşük, parabolik güneş kolektörünün yüksek ve dalga enerjisinin ise orta değerde bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.25 Faktörlerin optimum değerleri

Sayı	Rüzgar Gücü (kW)	Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Parabolik Güneş Kolektörü Gücü (kW)	Dalga Gücü (kW)	Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Toplam Maliyet (\$)	İstenilen Hedefe Ulaşma	
1	21.449,891	44.377,985	816,971	1.141.363,260	10.794,208	2.957.317	3.297.381.866	0,546	Seçilen
2	21.449,153	44.386,956	816,935	1.148.783,848	10.871,712	2.978.551	3.322.661.441	0,546	
3	21.450,259	44.346,663	816,702	1.133.245,830	10.708,908	2.933.947	3.269.701.316	0,546	
4	21.443,874	44.387,917	817,437	1.117.084,816	10.541,014	2.887.949	3.214.666.558	0,546	
5	21.158,283	44.388,221	818,608	1.140.709,710	10.779,962	2.953.414	3.294.516.576	0,546	
6	21.449,822	44.387,803	818,043	1.164.822,127	11.038,754	3.024.316	3.377.280.219	0,546	
7	21.256,902	44.387,166	968,424	1.138.271,116	10.758,426	2.947.514	3.287.947.665	0,546	
8	21.449,803	44.092,475	816,793	1.153.693,557	10.916,548	2.990.835	3.339.134.554	0,546	
9	21.081,364	44.387,490	816,686	1.147.045,021	10.843,918	2.970.936	3.315.900.062	0,546	
10	21.444,345	43.919,103	816,523	1.140.217,640	10.772,286	2.951.311	3.293.076.372	0,546	

Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjisi sisteminin optimizasyon sonuçlarına dayanarak, sistemin en uygun şehir olan Muğla/Datça bölgesinde kurulmasının bölgenin elektrik talebinin önemli bir kısmını karşılayacağı beklenmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre [103], Muğla ili için 2022 yılı tüketim miktarı 3.881,48453 GWh olarak bildirilmiştir. Dolayısıyla, kurulması önerilen sistem, bu çalışmada hesaplandığı üzere (10.794,208 GWh) Muğla ilinin bildirilen elektrik talebinin tamamını karşılayabilecek potansiyele sahiptir.

Senaryo 2'ye göre seçilen lokasyonlar için optimizasyon yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgar, fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş enerjisine göre en yüksektir.
- Toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en fazla etki dalga enerjisinden kaynaklanmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları dalga enerjisinde göre dahaz az etki etmektedir.
- Optimizasyon sonuçlarına göre, toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en optimum şehir olarak Muğla/Datça bulunmuş olup istenirlik değeri 0,546'dır.
- Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjileri dikkate alındığında, Muğla/Datça bölgesinde entegre sistemin kurulmasının bölgenin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu hesaplanmıştır.

4.2.3 Senaryo 3

Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonu yapılan entegre sistemin Senaryo 3'e göre sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Tablo 4.26, toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, $3,439 \times 10^7$ 'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele model olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, AD, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin hem de düzeltilmiş R² değerinin tam olarak 1 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini

optimize etmeye uygunluğu, 15.172,6977 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.26 Toplam yıllık elektrik üretimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	6,133x10 ⁸	4,381x10 ⁷	3,439x10 ⁷	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	12.578,58	12.578,58	9.875,28	< 0.0001
B-Fotovoltaik (PV) gücü	88.047,36	88.047,36	69.124,88	< 0.0001
C-Parabolik güneş kollektörü gücü	2,892x10 ⁵	2,892x10 ⁵	2,270x10 ⁵	< 0.0001
D-Dalga gücü	6,120x10 ⁸	6,120x10 ⁸	4,805x10 ⁸	< 0.0001
AB	0,0272	0,0272	0,0214	0,8857
AC	0,0894	0,0894	0,0702	0,7947
AD	167,41	167,41	131,43	< 0.0001
BC	0,6257	0,6257	0,4912	0,4941
BD	1.171,84	1.171,84	920,00	< 0.0001
CD	3.848,21	3.848,21	3.021,18	< 0.0001
A ²	0,0005	0,0005	0,0004	0,9842
B ²	0,0081	0,0081	0,0064	0,9375
C ²	0,0727	0,0727	0,0571	0,8144
D ²	3,257x10 ⁵	3,257x10 ⁵	2,557x10 ⁵	< 0.0001
Standart Sapma	1,13			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	1,0000			
Tahmin Edilen R ²	1,0000			
Yeterli Hassasiyet	15.172,6977			

Tablo 4.27, toplam ev sayısı için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 3,439x10⁷'lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele bir olay olmadığını göstermektedir. A, B, C, D, AD, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşliğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin

hem de düzeltilmiş R^2 değerinin tam olarak 1 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 15.172,6977 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.27 Toplam ev sayısı için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	1,680x10 ⁵	12.002,63	3,439x10 ⁷	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	3,45	3,45	9.875,28	< 0.0001
B-Fotovoltaik (PV) gücü	24,12	24,12	69.124,88	< 0.0001
C-Parabolik güneş kollektörü gücü	79,22	79,22	2,270x10 ⁵	< 0.0001
D-Dalga gücü	1,677x10 ⁵	1,677x10 ⁵	4,805x10 ⁸	< 0.0001
AB	7,458x10 ⁻⁶	7,458x10 ⁻⁶	0,0214	0,8857
AC	0,0000	0,0000	0,0702	0,7947
AD	0,0459	0,0459	131,43	< 0.0001
BC	0,0002	0,0002	0,4912	0,4941
BD	0,3211	0,3211	920	< 0.0001
CD	1,05	1,05	3021,18	< 0.0001
A ²	1,410x10 ⁻⁷	1,410x10 ⁻⁷	0,0004	0,9842
B ²	2,222x10 ⁻⁶	2,222x10 ⁻⁶	0,0064	0,9375
C ²	0,0000	0,0000	0,0571	0,8144
D ²	89,23	89,23	2,557x10 ⁵	< 0.0001
Standart Sapma	0,0187			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	1,0000			
Tahmin Edilen R ²	1,0000			
Yeterli Hassasiyet	15.172,6977			

Tablo 4.28, toplam maliyet için varyans analizinden (ANOVA) elde edilen istatistiksel sonuçları göstermektedir. Toplam yıllık elektrik üretimi, 1,190x10⁷lik önemli bir model F-değerinin de gösterdiği gibi, istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu değer bunun rastgele bir olay olmadığını göstermektedir.

A, B, C, D, AD, BD, CD ve D² gibi kodlanmış faktörler Prob>F değerlerinin kabul edilen 0,05 risk eşiğinin altında kalması nedeniyle önemli model parametreleri olarak tanımlanmıştır. Doğru yanıt değeri tahmini için Tahmin Edilen R-kare (Pred R-squared) ile Düzeltilmiş R-kare (Adj R-squared) arasında makul bir uyum ve 1'e yakın olması modelin doğruluğunu ifade etmektedir. Dikkat çekici bir şekilde hem tahmini R² değerinin hem de düzeltilmiş R² değerinin tam olarak 1 olması modelin uyumluluğunun bir diğer önemli göstergesidir.

Ayrıca, istatistik modelin bulgularla ne kadar uyumlu olup olmadığını gösteren yeterli hassasiyet (Adeq. Precision) değeri de önemlidir. Yeterli hassasiyet değeri sinyal/gürültü oranını ifade eder ve modelin uyumlu olması için 4'ten büyük olması istenmektedir. Bulgulara bakıldığında, modelin yıllık toplam elektrik üretimini optimize etmeye uygunluğu, 9.002,2450 olarak ölçülen yeterli hassasiyet ve 4'ü aşan bir sinyal-gürültü oranı ile gösterilmektedir. Bundan dolayı bulunan bu değer modelin toplam yıllık elektrik üretimini optimize etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

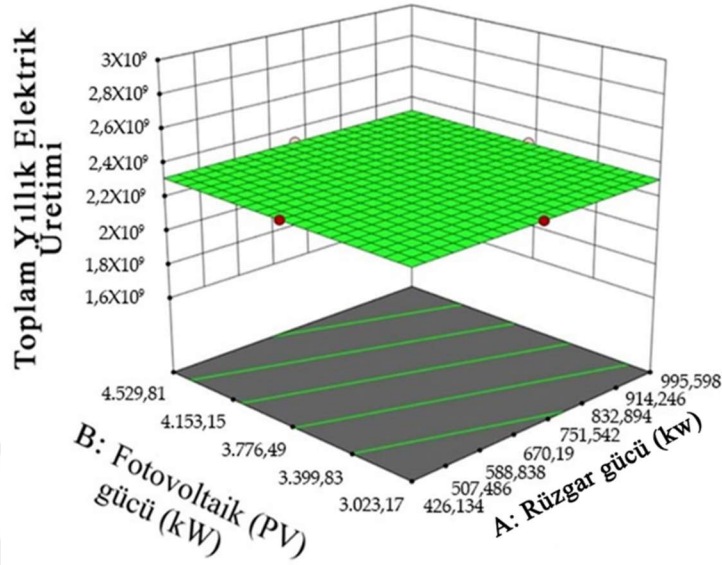
Tablo 4.28 Toplam maliyet için varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
Model	2,018x10 ⁸	1,441x10 ⁷	1,190x10 ⁷	< 0.0001
A-Rüzgar gücü	1.118,44	1.118,44	923,57	< 0.0001
B-Fotovoltaik (PV) gücü	1.254,96	1.254,96	1.036,30	< 0.0001
C-Parabolik güneş kolektörü gücü	3,707x10 ⁵	3,707x10 ⁵	3,061x10 ⁵	< 0.0001
D-Dalga gücü	2,011x10 ⁸	2,011x10 ⁸	1,661x10 ⁸	< 0.0001
AB	0,0001	0,0001	0,0001	0,9927
AC	0,0309	0,0309	0,0256	0,8751
AD	14,87	14,87	12,28	0,0032
BC	0,0347	0,0347	0,0287	0,8678
BD	16,68	16,68	13,77	0,0021
CD	4.925,19	4.925,19	4.067,05	< 0.0001
A ²	0,0004	0,0004	0,0004	0,9851
B ²	0,0004	0,0004	0,0004	0,9850
C ²	0,3561	0,3561	0,2940	0,5956
D ²	1,069x10 ⁵	1,069x10 ⁵	88.243,38	< 0.0001
Standart Sapma	1,10			
R ²	1,0000			
Düzeltilmiş R ²	1,0000			
Tahmin Edilen R ²	1,0000			
Yeterli Hassasiyet	9.002,2450			

Dalga, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü güç faktörlerinin yanıtlar üzerindeki bütünleşik etkisi; üç boyutlu grafiklerde yıllık toplam elektrik üretimi için Şekil (4.49-4.54)'de, toplam ev sayısı için Şekil (4.55-4.60)'de ve toplam maliyet için ise Şekil (4.61-4.66)'de gösterilmektedir. Şekiller (4.49-4.66) incelendiğinde, dalga gücünün tüm yanıtlar üzerindeki etkisinin diğer faktörlere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, dalga gücü hesaplamalarında kullanılan denklemler Eşitlik (3.42-3.51)'te analiz edildiğinde dalga yüksekliği, dalga boyu ve rüzgar hızının elektrik üretimini daha fazla etkilemesi olabilir. Dalga enerji sisteminden (Tapchan) üretilen güç, rüzgar, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörü enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksektir. Toplam maksimum elektrik üretimi ve minimum maliyetli ev sayısı açısından, dalga enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla en yüksek etkiye sahiptir.

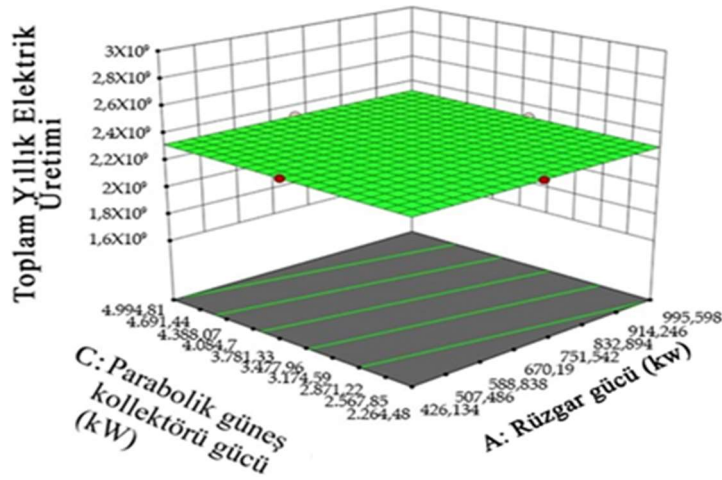
Şekil (4.61-4.66) incelendiğinde dalga, rüzgar ve güneş enerjisinin bütünleşik halde elektrik üretimini etkileyen tasarım parametrelerinin değişimleri üç boyutlu grafikler halinde gösterilmiş olup bu parametrelerin optimize edilmesindeki amaç elektrik üretimini maksimize etmek ve verimliliği arttırmaktır. Bu sistemin ana hedefi, sürdürülebilir bir gelecek için karbon emisyonlarını (iklim değişikliği, sera gazları vb.) ve çevre kirliliğini azaltarak temiz enerji üretmektir. Bu nedenle, bu sistemin optimize edilmesi, en az maliyetle temiz elektrik üretim miktarının artırılmasına yardımcı olmaktır. Sonuçlar incelendiğinde, dalga ve parabolik güneş kolektörü enerjileri girdisinin elektrik üretimi için en etkili tasarım parametreleri arasında olduğu ve bu parametredeki değişikliklerin sistemin genel elektrik üretim oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabileceği görülmektedir. Buna karşılık, rüzgar ve fotovoltaik enerjinin toplam elektrik üretimini artırmada sınırlı bir etkisi olabildiği de görülmektedir. Rüzgar, dalga, fotovoltaik ve parabolik güneş kolektörlerinden entegre biçimde elektrik üretmek için ortalama toplam kurulum maliyetleri Senaryo 1'de alınan veriler ile aynı olup bu doğrultuda hesaplamalar yapılmıştır.

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



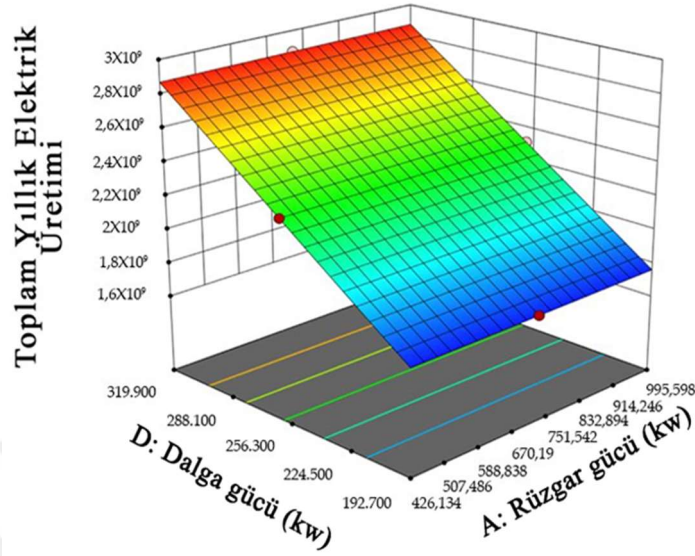
Şekil 4.49 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



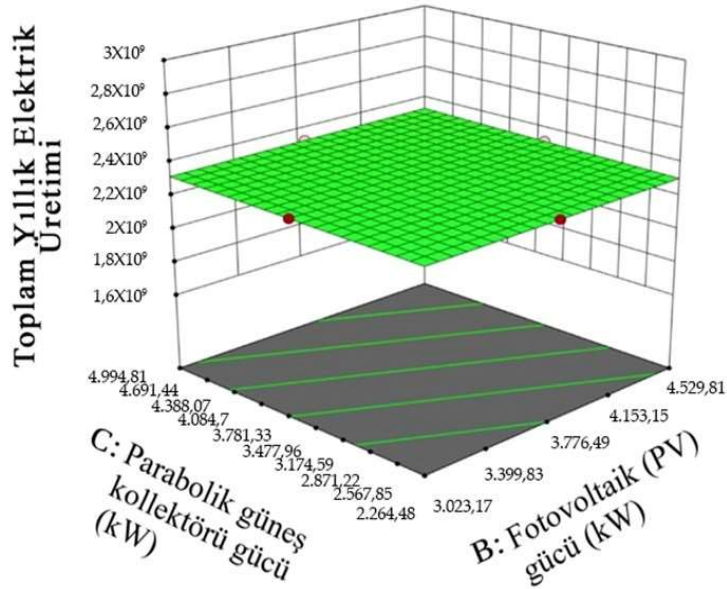
Şekil 4.50 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.51’de gösterilmiştir.



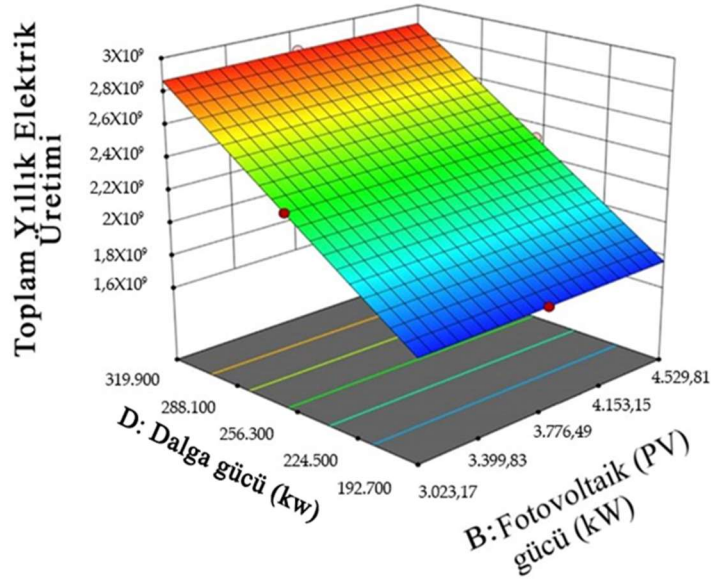
Şekil 4.51 Rüzgar ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.52’de gösterilmiştir.



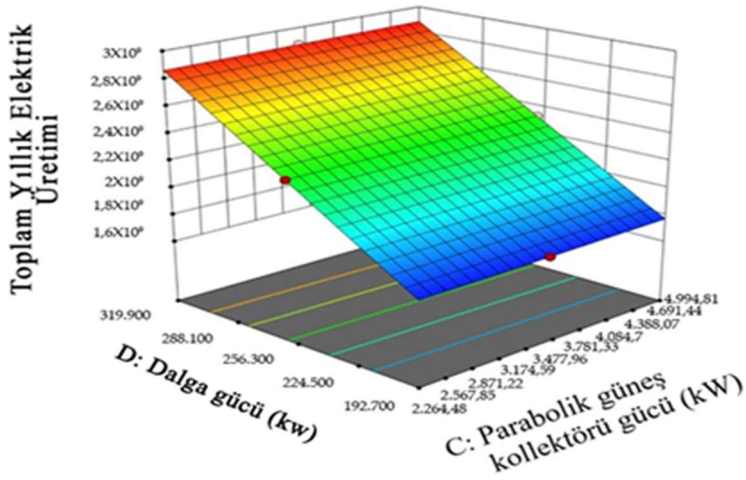
Şekil 4.52 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.53’de gösterilmiştir.



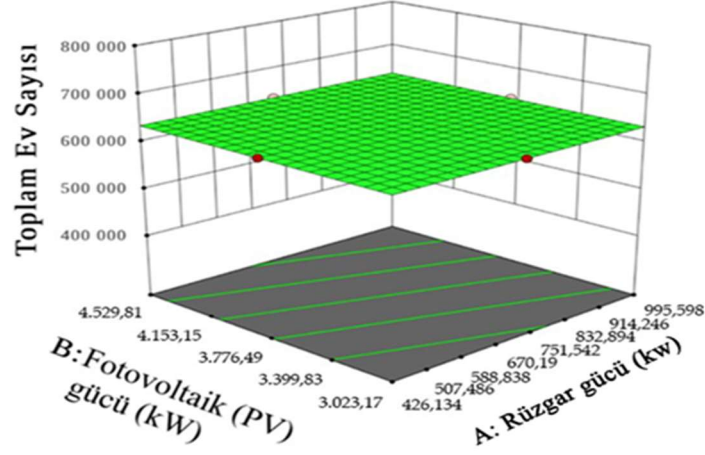
Şekil 4.53 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine olan etkisi Şekil 4.54’de gösterilmiştir.



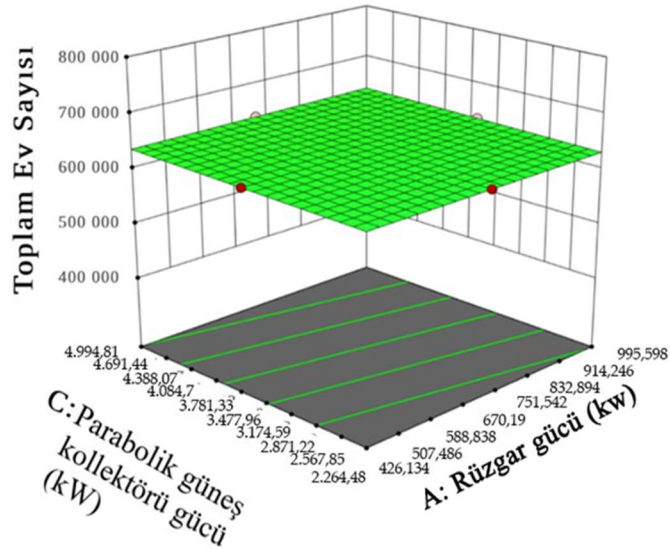
Şekil 4.54 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün yıllık elektrik üretimine etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.55’de gösterilmiştir.



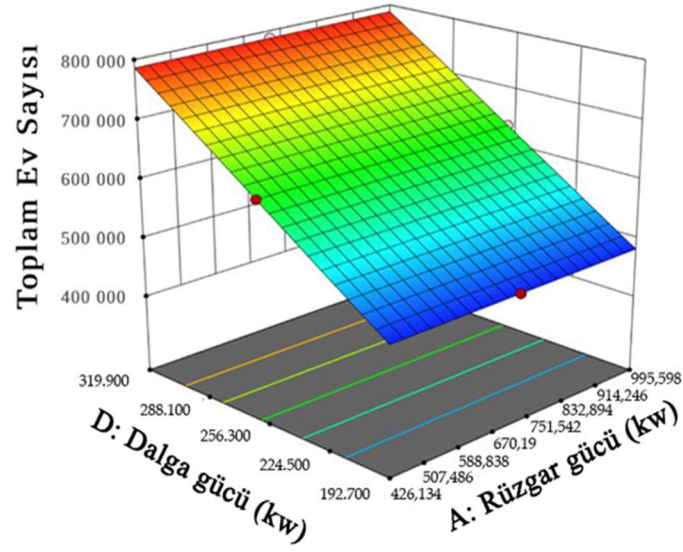
Şekil 4.55 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.56’da gösterilmiştir.



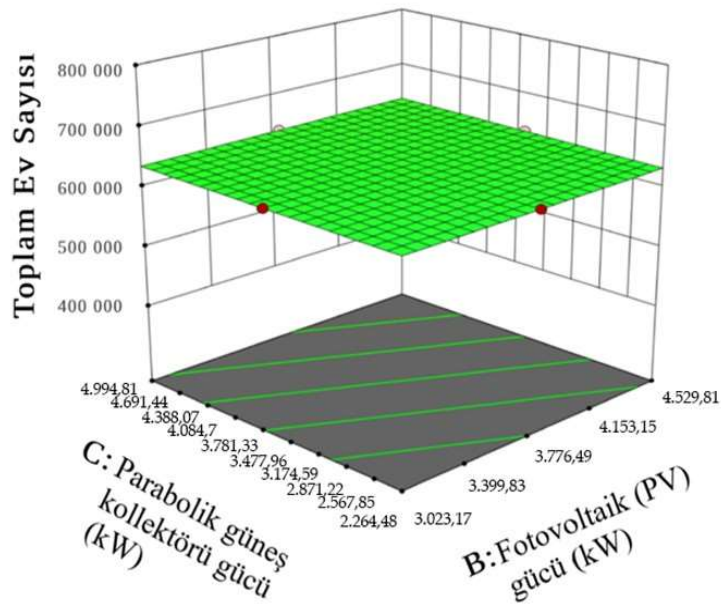
Şekil 4.56 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.57’de gösterilmiştir.



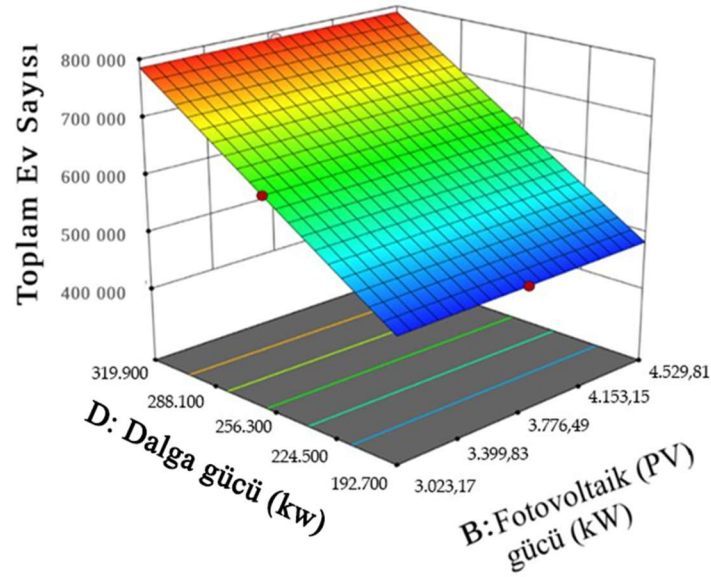
Şekil 4.57 Rüzgar ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.58’de gösterilmiştir.



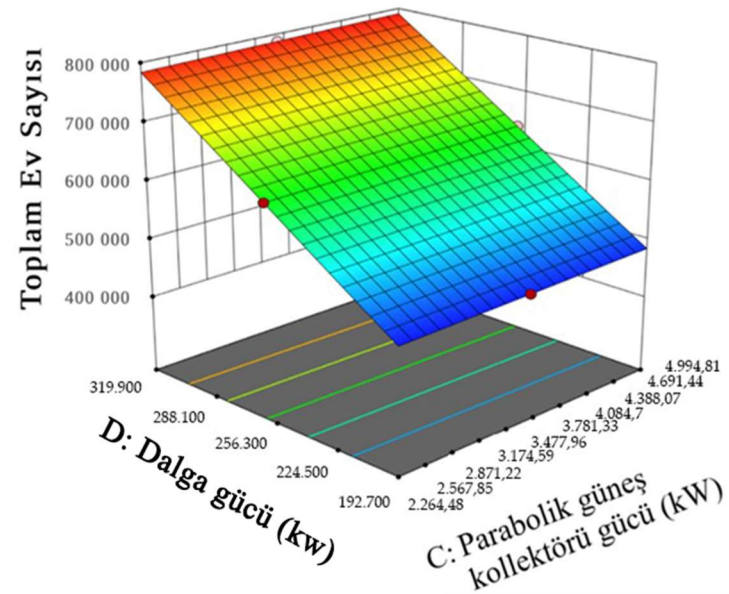
Şekil 4.58 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam ev sayısına etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.59’da gösterilmiştir.



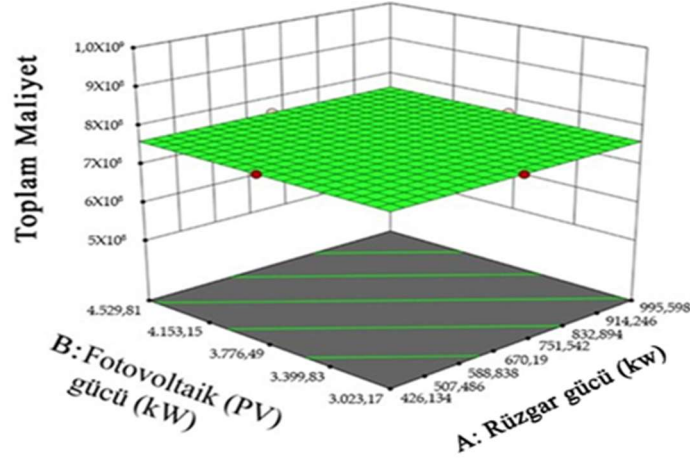
Şekil 4.59 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına olan etkisi Şekil 4.60’da gösterilmiştir.



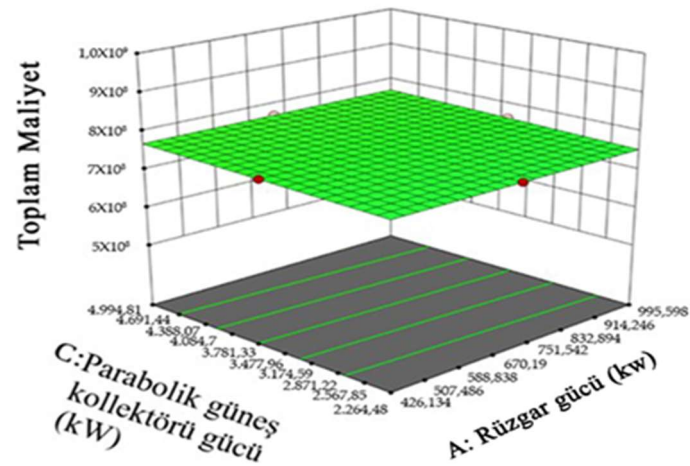
Şekil 4.60 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam ev sayısına etkisi

Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.61’de gösterilmiştir.



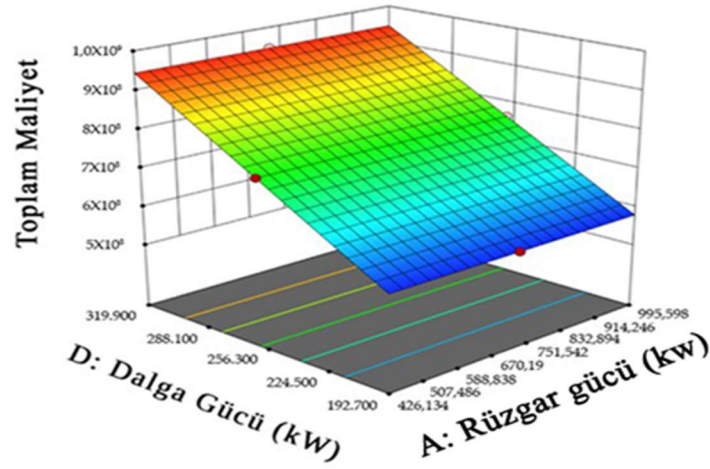
Şekil 4.61 Rüzgar ve fotovoltaik (PV) gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.62’de gösterilmiştir.



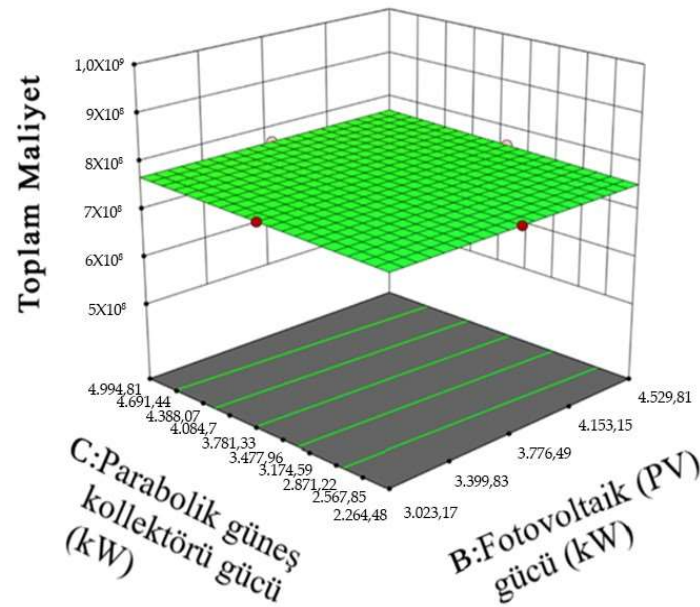
Şekil 4.62 Rüzgar ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.63’de gösterilmiştir.



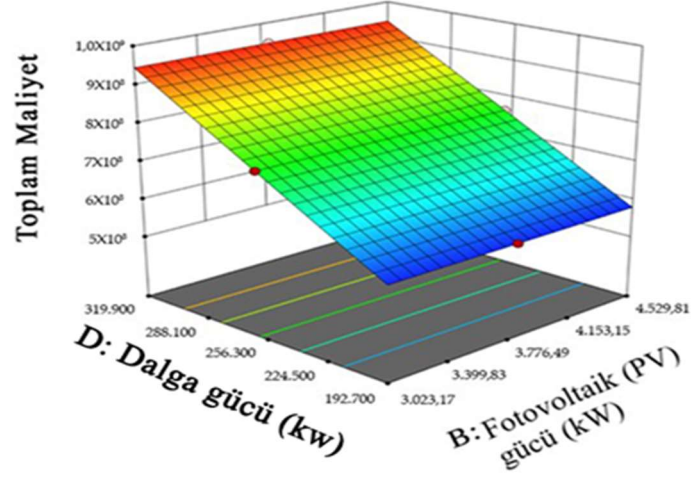
Şekil 4.63 Rüzgar ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.64’de gösterilmiştir.



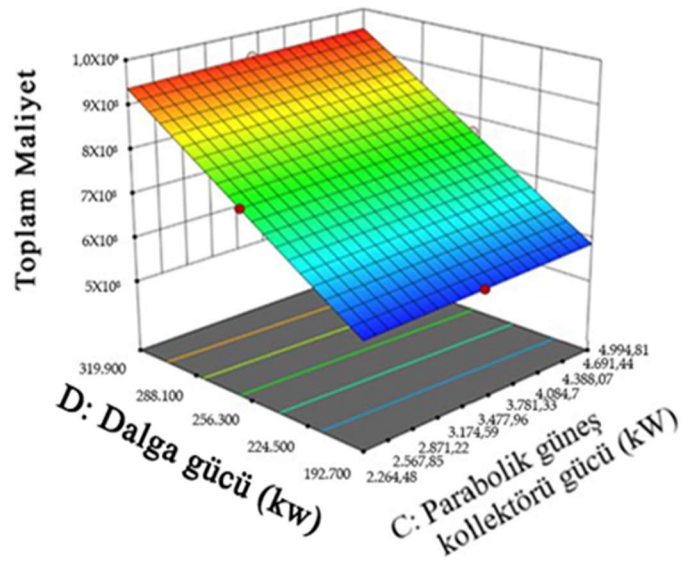
Şekil 4.64 Fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş kolektörü gücünün toplam maliyete etkisi

Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.65’de gösterilmiştir.



Şekil 4.65 Fotovoltaik (PV) ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete olan etkisi Şekil 4.66’da gösterilmiştir.



Şekil 4.66 Parabolik güneş kolektörü ve dalga gücünün toplam maliyete etkisi

Tablo 4.29, karar değişkenleri ve amaç fonksiyonları için yanıt yüzeyi metodolojisi (RSM) hesaplamalarından elde edilen optimum çözümü göstermektedir. Bu yanıtları elde etmek için çok amaçlı optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Rüzgar gücü, PV gücü, parabolik güç ve dalga gücü için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 995,278, 4.529,743, 2.264,546 ve 276.495,094'dür. Bu optimum değerler için istenirlik fonksiyonu hesaplanmış olup 0 ile 1 arasında bulunmaktadır. İstenirliğin 1 değerine yakın olması amaçlanan tüm şartların eş zamanda sağlandığını göstererek, optimizasyonun başarı ölçütü olarak değerlendirilir. Bu çalışmada, en yüksek istenirlik değerine sahip çözümün istenirlik değeri 0,538 bulunmuş olup RSM'nin hassasiyetini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.29 Optimizasyon değişkenleri ve aralıkları

Faktörler	Amaç	Alt Limit	Üst Limit
A-Rüzgar gücü (kW)	aralıkta	426,134	995,598
B-Fotovoltaik (PV) gücü (kW)	aralıkta	3.023,17	4.529,81
C-Parabolik güneş kolektörü gücü (kW)	aralıkta	2.264,48	4.994,81
D-Dalga gücü (kW)	aralıkta	192.700	319.900
Cevaplar			
Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)	maksimize	1.738.100.000	2.894.480.000
Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	maksimize	476.193	793.009
Toplam Maliyet (\$)	minimize	570.507.000	954.263.000

Tablo 4.30, maksimum elektrik üretimi ve ev sayısı ile minimum maliyete dayalı olarak kurulacak sistem için 100 üzerinden en iyi 10 sonucu sunmaktadır. Optimum faktörler, 2.491,455 (GWh/yıl) toplam elektrik üretim oranına, 682.591 (adet/yıl) toplam ev sayısına ve 813.940.876,39 (\$) toplam maliyete ulaşmayı hedeflemektedir. Optimize edilen faktörler, önerilen entegre enerji sisteminin genel maliyetine ve fizibilitesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Seçilen faktörlerin optimizasyonu, amaç fonksiyonları için optimum değerleri belirleyen RSM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm yanıtları optimize etmek için istatistiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Yanıt çıktıları, maksimum elektrik üretimi

ve ev sayısının yanı sıra minimum maliyet açısından elde edilmiştir. Bu analize dayanarak, rüzgar ve fotovoltaik enerji gücü sonuçları maksimum üst limitlerine, parabolik güneş kolektörü ve dalga enerjisi girdileri ise aralıkta bir değere yakın bulunarak optimize edilmiştir. Bu durum, rüzgar ve fotovoltaik enerji üretiminin toplam maliyeti artırmada daha düşük, parabolik güneş kolektörünün yüksek ve dalga enerjisinin ise orta değerde bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4.30 Faktörlerin optimum değerleri

Sayı	Rüzgar Gücü (kW)	Fotovoltaik (PV) Gücü (kW)	Parabolik Güneş Kolektörü Gücü (kW)	Dalga Gücü (kW)	Toplam Yıllık Elektrik Üretimi (GWh/yıl)	Toplam Ev Sayısı (adet/yıl)	Toplam Maliyet (\$)	İstenilen Hedefe Ulaşma	
1	995,278	4.529,743	2.264,546	276.495,094	2.491,455	682.591	813.940.876,39	0,538	Seçilen
2	988,382	4.527,106	2.264,504	276.605,314	2.492,341	682.833	814.247.864,13	0,538	
3	995,588	4.529,704	2.265,363	275.636,368	2.483,903	680.521	811.457.916,43	0,538	
4	967,978	4.529,759	2.264,556	276.605,752	2.492,187	682.791	814.220.005,73	0,538	
5	995,131	4.515,682	2.264,520	275.938,008	2.486,423	681.212	812.317.837,49	0,538	
6	995,573	4.510,707	2.264,681	276.480,835	2.491,164	682.511	813.889.197,85	0,538	
7	952,892	4.529,570	2.264,501	276.476,316	2.490,911	682.441	813.821.608,08	0,538	
8	995,560	4.503,995	2.264,598	276.259,522	2.489,155	681.960	813.243.396,52	0,538	
9	995,545	4.529,564	2.286,286	276.434,873	2.491,120	682.499	813.892.624,03	0,538	
10	942,888	4.529,730	2.264,635	276.436,178	2.490,471	682.321	813.690.955,03	0,538	

Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjisi sisteminin optimizasyon sonuçlarına dayanarak, sistemin en uygun şehir olan Kırklareli/Demirköy bölgesinde kurulmasının bölgenin elektrik talebinin önemli bir kısmını karşılayacağı beklenmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre [103], Kırklareli ili için 2022 yılı tüketim miktarı 2.328,74456 MWh olarak bildirilmiştir. Dolayısıyla, kurulması önerilen sistem, bu çalışmada hesaplandığı üzere (2.491,455 GWh) Kırklareli ilinin bildirilen elektrik talebinin tamamını karşılayabilecek potansiyele sahiptir.

Senaryo 3'e göre seçilen lokasyonlar için optimizasyon yapıldığında yukarıdaki tablo ve grafik sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana bulguları aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Dalga enerji sisteminden (Tapchan) elde edilen güç diğer yenilenebilir enerji kaynakları olan rüzgar, fotovoltaik (PV) ve parabolik güneş enerjisine göre en yüksektir. Toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en fazla etki dalga enerjisinden kaynaklanmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları dalga enerjisinde göre dahaz az etki etmektedir.
- Optimizasyon sonuçlarına göre, toplam maksimum elektrik üretimi, ev sayısı ve minimum maliyet açısından değerlendirildiğinde en optimum şehir olarak Kırklareli/Demirköy bulunmuş olup istenirlik değeri 0,538'dir.
- Dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjileri dikkate alındığında, Kırklareli/Demirköy bölgesinde entegre sistemin kurulmasının bölgenin elektrik ihtiyacının tamamını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu hesaplanmıştır.

4.3. Sistemin Sosyoekonomik ve Politik Yönleri

Türkiye'de önerilen sistem dönüşümünün sosyoekonomik etkileri, istihdam, ekonomik faydalar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilen bölgelerde yaygın olarak benimsenmesi açısından analiz edilmiştir. IRENA'ya göre, 2012'de 7,3 milyon olan yenilenebilir enerji sektöründe 2018'de dünya çapında yaklaşık 11 milyon kişi istihdam edilmiştir. Bu artışta en büyük pay, 2018 yılında 3,6 milyona ulaşan değer ile güneş enerjisi kaynaklarından PV'ye aittir. 2050 yılına kadar yenilenebilir enerji alanındaki toplam istihdamın dünya genelinde 42 milyona ulaşması beklenmektedir. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin Türkiye'de istihdam oluşturma üzerinde olumlu bir etkisi olacağı açıktır. Yenilenebilir enerji alanındaki yeni yatırımlar 2023-2030 yılları arasında iş fırsatları oluşturabilir. Yenilenebilir enerji alanındaki yeni işlerin büyük çoğunluğu yatırım aşamasında yaratılacaktır. Yenilenebilir enerjinin artan kullanımının üç kategoriye ayrılacak istihdam etkileri olup imalat, inşaat ve kurulum ile işletme ve bakımdır. Başlangıçta, istihdam fırsatlarının çoğunluğu imalat, inşaat ve kurulumdan gelecektir. Ancak zaman geçtikçe, devam eden işletme ve bakım hizmetlerinde çalışanların sayısı artacaktır. 2030 yılına kadar Türkiye'de güneş ve rüzgar enerjisinin hızla yaygınlaşmasının imalat 718.000, inşaat ve kurulumda ise 1,7 milyon iş-yılı istihdam oluşturacağı öngörülmektedir. İmalat aşaması öncelikle

metal, makine ve elektrikli ekipman sektörlerini kapsayacaktır. Ayrıca, elektrik üretimi için yenilenebilir kaynakların kullanılması, bu ülkelerin enerji ithalat maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olabilir. Buna ek olarak, temiz enerji sektörü genel enerji arzının daha büyük bir kısmını sağlayabilir ve yenilenebilir enerji ekipmanlarının yerli üretiminde ilerleme kaydedilebilir. Bu da ithal ikamesi ve yerli üretim yoluyla daha fazla istihdam oluşturarak ekonomiye katkıda bulunabilir [103].

Türkiye'nin 2023 ve 2053 enerji planları göz önünde bulundurulduğunda, elektrik üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması karbon emisyonları, sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin hafifletilmesine yardımcı olabilir. Dünya genelinde sera gazı emisyonlarındaki artışın başlıca nedeni enerji tüketimindeki artış olup, bu durum karbonsuzlaştırma ve enerji sistemi dönüşümünü iklim değişikliğiyle mücadelede kritik hale getirmektedir. Bununla birlikte devam eden enerji krizi, tedarik zincirini ve birincil enerji kaynaklarına erişimi kesintiye uğratmıştır. Bu durum, 2022 yılında enerji fiyatlarında benzeri görülmemiş bir artışa yol açmış ve enerji arz güvenliği sorunlarını gündeme getirmiştir. Bu gelişmeler, başta yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji verimliliği olmak üzere enerji dönüşümünün tüm unsurlarını yeniden odak noktası haline getirmiştir. Türkiye, birçok ülke tarafından kabul edilen Kyoto Protokolü ve Paris İklim Anlaşması gibi anlaşmaları onaylayarak karbon ayak izini azaltmayı hedeflemektedir. Bu durum, sera gazı emisyonlarını kontrol altına alarak iklim değişikliği ve küresel ısınma üzerinde olumlu bir etki oluşturacaktır. Ayrıca, bu alandaki son politika gelişmeleri arasında enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan yeni yasal düzenlemeler de yer almaktadır. Türkiye, artan enerji talebini karşılamak için 2053 net sıfır emisyon hedefine ulaşmaya kararlıdır. Bu hedefe ulaşmak için yenilenebilir enerji alanlarına odaklanmakta, enerji verimliliğini vurgulamakta ve 30 yıl içinde karbonsuzlaşmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, T.C. Cumhurbaşkanlığı tarafından yayınlanan on birinci kalkınma planı yenilenebilir enerjinin önemini vurgulamaktadır. Kalkınma planında, yenilenebilir enerji kullanımı yoluyla sürdürülebilir ve temiz bir çevre elde edilmesine ilişkin bir bölüm yer almaktadır. Bu nedenle, entegre enerji sisteminin uygulanması ve iyileştirilmesi önünde potansiyel bir engel bulunmamaktadır [31].

Bu çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerindeki yedi ilin seçilen ilçelerinde (Antalya (Kaş), Çanakkale (Ayvacık), İstanbul (Şile), İzmir (Urla), Kastamonu (Doğanyurt), Kırklareli (Demirköy) ve Muğla (Datça)) belirlenen bölgelerde hesaba esas alınan kıyı uzunlukları dikkate alınarak; rüzgar, dalga ve güneş enerjisinden üretilebilecek yıllık toplam elektrik gücü hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kıyı uzunluğu parametresinin değiştirilmesi ile enerji kaynaklarından üretilebilecek elektrik gücü potansiyeli özellikle dalga enerjisine göre analiz edilmiştir. Bu analizler çerçevesinde seçilen bölgelerde elektrik ihtiyacını karşılayabilecek ev sayıları ve maliyetler hesaplanarak optimizasyon yapılmış olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilecek enerji miktarının, seçilen bölgelerin dalga boyu, dalga yüksekliği, rüzgar hızı, güneşlenme süresi ve global radyasyon değerleri gibi karakteristik özelliklerinin yanı sıra uygulanabilir kıyı uzunluğu ile de doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Seçilen şehirlerin uygulanabilir kıyı uzunluğu değiştiğinde, üretilebilecek enerji miktarının da değişebileceği görülmektedir.
- İncelenen entegre sistem göz önüne alındığında, dalga enerjisi ile elde edilen güç diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha yüksektir. Seçilen tüm lokasyonlarda parabolik güneş kolektörü, fotovoltaiik enerji ve rüzgar enerjisi dalga enerjisini takip etmektedir.
- 1. ve 2. senaryoya göre yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen güç kıyı uzunluğunun fazla olması sebebiyle diğer lokasyonlara göre Muğla/Datça ilinde en yüksek seviyededir. Muğla şehrini İzmir, Antalya, Çanakkale, İstanbul, Kırklareli ve Kastamonu izlemektedir. 3. Senaryoya göre ise yenilenebilir enerji sistemlerinden elde edilen güç kıyı uzunluğunun her şehirde aynı seçilmesi sebebiyle diğer lokasyonlara göre Kırklareli/Demirköy ilinde en yüksek seviyededir. Kırklareli şehrini İstanbul, Antalya, İzmir, Muğla ve Çanakkale izlemektedir.
- Elektrik tüketiminin entegre sistemden karşılanabileceği ev sayıları dikkate alındığında; 1. senaryoya göre, Muğla/Datça'da 10.525.514 ev,

Kastamonu/Doğanyurt'ta ise 358.576 ev öne çıkmaktadır. 2.senaryoya göre, elektrik tüketiminin entegre sistemden karşılanması açısından; Muğla/Datça'da 5.405.187 evin, Kastamonu/Doğanyurt'ta ise 358.576 evin elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir. 3. senaryoya göre ise, elektrik tüketiminin entegre sistemden karşılanması açısından; Kırklareli/Demirköy'de 782.298 evin, Çanakkale/Ayvacak'ta ise 481.870 evin elektrik ihtiyacı karşılanabilmektedir.

- Hesaplanan veriler göz önüne alındığında, güneş enerjisi için Antalya, rüzgar enerjisi için İzmir ve dalga enerjisi potansiyeli için ise Kırklareli şehri en potansiyeli yüksek şehirler olarak belirlenmiştir.
- Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak 1. senaryoya göre; rüzgar, PV, parabolik ve dalga güçleri için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 10.327,031, 44.376,783, 816,767 ve 2.278.167,161'dir. 1. senaryoya göre optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 20.600,053 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 5.643.850 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 6.550.944.954 (\$) olmasını hedeflemektedir.
- Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak 2. senaryoya göre; rüzgar, PV, parabolik ve dalga güçleri için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 21.449,891, 44.377,985, 816,971 ve 1.141.363,260'dır. 2. senaryoya göre optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 10.794,208 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 2.957.317 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 3.297.384.866 (\$) olmasını hedeflemektedir.
- Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak 3. senaryoya göre; rüzgar, PV, parabolik ve dalga güçleri için istatistiksel olarak optimize edilen faktörler sırasıyla 995,278, 4.529,743, 2.264,546 ve 276.495,091'dir. 3. senaryoya göre ise optimum faktörler, toplam elektrik üretim oranının 2.491,455 (GWh/yıl), toplam ev sayısının 682.591 (adet/yıl) ve toplam maliyetin 813.940.876 (\$) olmasını hedeflemektedir.
- 1. ve 2. senaryoya göre dalga ve dalgaya entegre rüzgar ve güneş enerjileri dikkate alındığında, Muğla/Datça bölgesinde ve 3. Senaryoya göre ise Kırklareli/Demirköy bölgesinde entegre sistemin kurulmasının bölgenin elektrik ihtiyacının önemli bir kısmını karşılayacağı hesaplanmıştır. Eğer

farklı varsayımlar yapılırsa, elde edilen güç verileri farklılık göstereceğinden seçilen iller de değişecektir.

- Tüm senaryolarda, EPDK verilerine göre, belirlenen en yüksek enerji üretim kapasitesine sahip şehirlerin bildirilen elektrik talebinin tamamını karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin Türkiye’de istihdam oluşturma üzerinde olumlu bir etkisi olacağı açıktır. Ayrıca, elektrik üretimi için yenilenebilir kaynakların kullanılması, bu ülkelerin enerji ithalat maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olabilir. Buna ek olarak, temiz enerji sektörü genel enerji arzının daha büyük bir kısmını sağlayabilir ve yerli üretiminde ilerleme kaydedilebilir. Bu da ithal ikamesi ve yerli üretim yoluyla daha fazla istihdam oluşturarak ekonomiye katkıda bulunabilir. Türkiye’nin 2023 ve 2053 enerji planları göz önünde bulundurulduğunda, elektrik üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması karbon emisyonları, sera gazları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabileceği görülmektedir.

Sonuç olarak; Türkiye’nin sınırlı olan enerji kaynakları, gelişen teknoloji ve artan nüfusla paralel olarak önümüzdeki yıllarda karşı karşıya kalabileceği ve enerjide dışa bağımlılığı azaltacak enerji darboğazından kurtulmak için yerli ve yenilenebilir enerji yatırımlarına ivedilikle başlanmalı ve yeni enerji kaynaklarına mal olacak yeni üretim teknolojileri olan rüzgar, güneş ve özellikle dalga enerjisi geliştirilmelidir. Bu çalışmanın benzersiz özelliği, entegre bir yenilenebilir enerji sisteminin araştırılmasına odaklanarak literatüre katkıda bulunacak olmasıdır. Bu nedenle çalışmanın, iş dünyasındaki profesyoneller ve yeni araştırma alanlarını keşfetmek isteyen araştırmacılar için öngörü sağlaması beklenmektedir. Ayrıca, bu çalışma ile etkili, verimli, ucuz, çevreye zararsız ve sürdürülebilir bir şekilde elektrik üretmek; hem enerji verimliliği, enerji ekonomisi hem de iklim değişikliği ile mücadele açısından ülkemize ciddi katkılar sağlayacaktır.

- [1] İ. Dincer, M. A. Ezan, "TÜBA Enerji Depolama Teknolojileri Raporu," Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No:35, Ankara, Türkiye, 2020; pp. 11-12.
- [2] IEA World Energy Balances, <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>, 11.11.2023.
- [3] M. W. Ayub, A. Hamza, G. A. Aggidis, X. Ma, "A Review of power co-generation technologies from hybrid offshore wind and wave energy," *Energies*, 16, 550, 2023.
- [4] A. Raihan, "An overview of the energy segment of Indonesia: present situation, prospects, and forthcoming advancements in renewable energy technology," *Journal of Technology Innovations and Energy*, 2957-8809, 2023.
- [5] F. Yilmaz, M. Ozturk, R. Selbas, "Design and thermodynamic modeling of a renewable energy based plant for hydrogen production and compression," *International Journal of Hydrogen Energy*, 12, 133, 2019.
- [6] H. Hou, W. Lu, B. Liu, Z. Hassanein, H. Mahmood, S. Khalid, "Exploring the role of fossil fuels and renewable energy in determining environmental sustainability," *Evidence from OECD Countries. Sustainability*, 15, 2048, 2023.
- [7] A. Raihan, "Nexus between emission reduction factors and anthropogenic carbon emissions in India," *Anthropocene Science*, 2022.
- [8] M. Ozturk, "Experimental and theoretical investigation of renewable hydrogen production and blending into natural gas for applications, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Enerji Doktora Programı, 2023.
- [9] M. H. Alma, "TÜBA Biyokütle Enerjisi Raporu," Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, TÜBA Raporları No:46, Ankara, Türkiye, pp. 19-20.
- [10] Avrupa Birliği Türkiye Delegasyonu, <https://www.iklimin.org/wp-content/uploads/2016/12/paris-iklim-anla%C5%9Fmas%C4%B1-EUD-Brochure.pdf>, 02.12.2023.
- [11] Minister of Environment, Urbanisation and Climate Change, <https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34>, 02.12.2023.
- [12] V.A. Trinh, C. K. Chung, "Renewable energy for SDG-7 and sustainable electrical production, integration, industrial application, and globalization," *Review. Cleaner Engineering and Technology*, vol. 15, 100657, 2023.
- [13] B. Modu, Md. P. Abdullah, A. L. Bukar, B. F. Hamza, "A systematic review of hybrid renewable energy systems with hy-drogen storage," *Sizing, optimization, and energy management strategy. International Journal of Hydrogen Energy* 2023.
- [14] I. Dincer, C. Acar, "Innovation in hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, 22, 14843-14864, 2017.

- [15] M. Z. Ibrahim, M. D. Lafsah, A. Albani, "WWS (Wave.Wind.Solar) hybrid tri-renewable power system to generate electricity," *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 21(12), 3632-3634, 2015.
- [16] F. Mahnamfar, "Design and optimization of onshore wave energy conversion systems," *Doctoral Thesis*, Istanbul Technical University, Istanbul, 2017.
- [17] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Innovation outlook: Ocean energy technologies*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
- [18] A. Roy, F. Auger, F. Dupriez-Robin, S. Bourget, Q. T. Tran, "Electrical power supply of remote maritime areas: A review of hybrid systems based on marine renewable energies," *Energies*, 11, 1904, 2018.
- [19] M. Talaat, M.A. Farahat, M.H. Elkholy, "Renewable power integration: Experimental and simulation study to investigate the ability of integrating wave, solar and wind energies," *Energy*, 170, 668-662, 2019.
- [20] S. H. A. Kaboli, J. Selvaraj, N. Rahim, "A.Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm," *Energy*, 115, 857–871, 2016.
- [21] S. H. A. Kaboli, A. Fallahpour, J. Selvaraj, N. A. Rahim, "Long-term electrical energy consumption formulating and forecasting via optimized gene expression programming," *Energy*, 126, 144–164, 2017.
- [22] A. Karapekmez, I. Dincer, "Development of a multigenerational energy system for clean hydrogen generation," *Journal of Cleaner Production*, 299, 126909, 2021.
- [23] Y. Uraltas, "İstanbul adalar ilçesinde yenilenebilir enerji kaynakları potansiyellerinin ve enerji üretiminin analizi," *Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Doktora Programı*, 2022.
- [24] B. Ş. Günay, E. Merdan. "Türkiye yenilenebilir enerji görünümü," *Sabancı Üniversitesi IIcec*, 2022.
- [25] E. Cihan, "Yenilenebilir enerji ve Türkiye’de güneş enerjisi," *Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, İktisat Tezli Yüksek Lisans Programı*, 2019.
- [26] S. Özbektaş, M.C. Şenel, B. Sungur, "Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji durumu ve kurulum maliyetleri," *Mühendis ve Makina / Engineer and Machinery* 64, 711, 317-351, 2023.
- [27] E. Kapluhan, "Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: dalga enerjisinin dünyadaki ve Türkiye’deki kullanım durumu," *Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi Yıl/Year: 5, Cilt/Vol:5, Sayı/Issue: 17*, 2014.
- [28] IRENA and OEE, "Scaling up investments in ocean energy technologies," *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, 2023.
- [29] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Global Energy Transformation : A Roadmap to 2050," 2019.

- [30] H. Atik, "Avrupa birliği üyesi ÷lkelerde ve Türkiye'de düşük karbonlu ve iklime dirençli bir topluma geçiş: ampirik bir analiz", Uluslararası İlişkiler, Cilt 14, Sayı 54, s. 127-147, 2017.
- [31] ETKB,
https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf, 5.12.2023.
- [32] ETKB, <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, 17.01.2024.
- [33] M.B. Ağırkaya, "Türkiye ekonomik büyümesinde yenilenebilir enerji: mevcut durum, gelecek beklentileri, istihdam ve yatırım fırsatları," ODÜSOBİAD 12 (3), 2327-2350, 2022.
- [34] H. İ. Yamaç, "Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde enerji hasatı için piezoelektrik malzeme kullanılması durumunda sistemlerin modellenmesi ve analizinin yapılması," Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- [35] S. Mert, "Dalga enerjisi dönüşüm sistemi tasarımı ve deneysel çalışması," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kıyı Bilimler ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 2012.
- [36] M. Sağlam, T. S. Uyar, "Dalga enerjisi ve Türkiye'nin dalga enerjisi teknik potansiyeli"
- [37] F. Arı, V. Yılmaz, "Türkiye'de ve dünyada enerji kaynaklarının genel görünümü ve alternatif enerji kaynaklarının önemi," Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 2023.
- [38] F. Şengüler, "Türkiye'nin hibrit haritalarının oluşturulması ve maliyet analizi," Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Programı, 2019.
- [39] A. M. Shirzad, "Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Dardanos Yerleşkesinin rüzgar enerjisi ve güneş enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi," Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Kaynakları Ve Yönetimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2021.
- [40] Vestas,
https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/2MW_TurbineBrochure/2mw-platform-brochure/?page=10, 22.06.2022.
- [41] CW Energy. <https://cw-enerji.com/tr/urunler/gunes-panelleri-1.html>, 24.12.2022.
- [42] N. Acet, "Farklı iklim koşulları için ışı nım değerlerine dayalı güneş enerjisi potansiyelinin tahmini," Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı, 2023.
- [43] Y. Önal, Ü. Ç. Turhal, "Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkez Kampüsünde güneş takipli fotovoltaik enerji sistemi uygulaması," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Sonuç Raporu, 2021.
- [44] F. S. Bayraktar, M. Yazıcı, R. Köse, "Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) teknolojileri ve Türkiye'de CSP'ye yönelik politikalar," Journal of Scientific Reports-B, Sayı 7, 1-13 Haziran 2023.

- [45] D. Kılıç, "Parabolik oluk tipi güneş toplayıcı güç santralinin ysa tabanlı optimizasyonu," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2019.
- [46] G. İşler, "Parabolik oluk kollektörleri ve merkezi alıcılı güneş kuleleri ile enerji üretim analizi ve uygulaması," Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018.
- [47] S. Çelik, "Güneş Enerjisi Kaynaklı Trijenerasyon Sisteminin Termodinamik ve Termoekonomik Analizi," Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018.
- [48] National Renewable Energy Laboratory, System Advisor Model (SAM), <https://sam.nrel.gov/>, 26.12.2022.
- [49] G. Örer, T. Gürsel, A. Özdamar, N. Özbalt, "Overview of wave energy facilities," II. Renewable Energy Resources Symposium, İzmir, Türkiye, pp.126-140, 15.10.2003.
- [50] H. İ. Yamaç, "Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde enerji hasatı için piezoelektrik malzeme kullanılması durumunda sistemlerin modellenmesi ve analizinin yapılması" Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- [51] U. Bak, "Dalga enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm sistemleri," İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.
- [52] A. Şenpınar, M. T. Gençoğlu, "Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevresel etkileri açısından karşılaştırılması," Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 2006.
- [53] E. Ozkop, I. H. Altas, "Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: a review of the technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 106-115, 2017.
- [54] SketchUp, <https://www.sketchup.com/plans-and-pricing/sketchup-free>, 21.12.2022.
- [55] S. Ozlu, I. Dincer, "Development and analysis of a solar and wind energy based multigeneration system," Solar Energy, 122, 1279–1295, 2015.
- [56] N. Sezer, Y. Bicer, M. Koç, "Design and analysis of an integrated concentrated solar and wind energy system with storage," Int Journal of Energy Research, 1–21, 2019.
- [57] A. Al-Sharafia, A. Z. Sahina, T. Ayarc, B. S. Yilbasa, "Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 66, 33-49, 2017.
- [58] Q. Huang, Y. Shi, Y. Wang, L. Lu, Y. Cui, "Multi-turbine wind-solar hybrid system," Renewable energy, 76, 401-407, 2015.
- [59] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, "Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system," Solar Energy, Volume 85, Issue 10, 2407-2420, 2011.

- [60] G. Lavidas, J. K. Kaldellis, "Assessing renewable resources at the Saronikos Gulf for the development of multi-generation renewable systems," *Sustainability*, 12, 9169, 2020.
- [61] K. K. P. Kumar, N. Soren, A. Latif, D.C. Das, S.M.S Hussain, A. Al-Durra, T. S. Ustun, "Day-ahead dsm-integrated hybrid-power management-incorporated cceed of solar thermal/wind/wave/bess system using HFPSO, *Sustainability*, 14, 1169, 2022.
- [62] D. A. Halamay, T. A. Brekken, A. Simmons, S. McArthur, "Reserve requirement impacts of large-scale integration of wind, solar, and ocean wave power generation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol 2, No. 3, 1949-3029, 2011.
- [63] M. Talaat, M. H. Elkholy, M. A. Farahat, "Operating reserve investigation for the integration of wave, solar, and wind energies," *Energy*, vol 197, 117207, 2020.
- [64] H. Lund, "Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind, and wave power into the electricity supply," *Renewable Energy*, 31, 503–515, 2006.
- [65] X. Qu, Y. Yao, J. Du, "Conceptual design and hydrodynamic performance of a modular hybrid floating foundation," *Energies*, 14, 7605, 2021.
- [66] J. Widén, N. Carpman, V. Castellucci, D. Lingfors, J. Olauson, F. Remouit, M. Bergkvist, M. Grabbe, R. Waters, "Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 44, 356-375. 2015.
- [67] G. Reikard, B. Robertson, J.R: Bidlot, "Combining wave energy with wind and solar: short-term forecasting," *Renewable Energy*, vol 81, 442-456. 2015.
- [68] M. Subekti, Parjiman, N. Hanifah, "Design of sea wave power hybrid power generation through utilization of wave and wind energy as renewable electric energy sources for leading, outermost, and disadvantaged areas," *Proceedings International Joint Conference on Science and Engineering (IJCSE), Advances in Engineering Research*, vol 196, 2020.
- [69] S. Pennock, D. Coles, A. Angeloudis, S. Bhattacharya, H. Jeffrey, "Temporal complementarity of marine renewables with wind and solar generation: Implications for GB system benefits," *Applied Energy*, vol319, 119276, 2022.
- [70] M. Jacobson, M. A. Delucchi, "Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials," *Energy Policiy*, vol 39, Issue 3, pp. 1154-1169, 2011.
- [71] S. Astariz, A. Vazquez, G. Iglesias, "Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind energy," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015, vol 7, Issue 5, 053112, 2015.
- [72] S. Astariz, G. Iglesias, "Enhancing wave energy competitiveness through co-located wind and wave energy farms, a review on the shadow effect," *Energies*, 8, 7344-7366, 2015.
- [73] A. Azzellino, C. Lanfredi, L. Riefolo, V. D. Santis, P. Contestabile, D. Vicinanza, "Combined exploitation of offshore wind and wave energy in the

- Italian seas: a spatial planning approach,’’ *Frontiers in Energy Research*, vol 7, 42, 2019.
- [74] W. Shi, J. Li, C. Michailides, M. Chen, S. Wang, X. Li, “Dynamic Load Effects and Power Performance of an Integrated Wind–Wave Energy System Utilizing an Optimum Torus Wave Energy Converter,’’ *J. Mar. Sci. Eng.*, 10, 1985, 2022.
- [75] S. Yang, G. He, H. Zhang, “Design and development of wave energy - wind energy hybrid power generation system,’’ *Applied Mechanics and Materials*, Volume 535, pp. 17-21, 2014.
- [76] M. Sağlam, E. Sulukan, T.S. Uyar, “Wave energy and technical potential of Türkiye,’’ *Journal of Naval Science and Engineering*, 2010.
- [77] A. Ozdamar, K. T. Gursel, G. Ozer, Y. Pekbey, “Investigation of the potential of wind–waves as a renewable energy resource: by the example of Cesme-Turkey,’’ *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 581–592, 2024.
- [78] H. Ishaq, I. Dincer, “A comparative evaluation of OTEC, solar and wind energy based systems for clean hydrogen production,’’ *Journal of Cleaner Production*, vol 246, 118736, 2020.
- [79] Google Earth, <https://earth.google.com/web/@0,-0.30580005,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>, 14.12.2021.
- [80] ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>, 14.12.2021.
- [81] Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, 14.12.2021.
- [82] Republic of Türkiye Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change, General Directorate of Meteorology, Piri Reis Maritime Pages, Marine Meteorology, <https://pirireis.mgm.gov.tr/swan/6>, 02.06.2022.
- [83] PV*SOL, <https://pvsol.software/en/>, 24.12.2022.
- [84] Meteonorm, <https://meteonorm.com/en>, 26.12.2022.
- [85] PVGIS. Photovoltaic Geographical Information System, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, 26.12.2022.
- [86] Microsoft Visio, <https://www.microsoft.com/tr-tr/microsoft-365/p/visio>, 26.12.2022.
- [87] EES, Engineering Equation Solver, <https://fchartsoftware.com>, 08.04.2022.
- [88] I. Dincer, H. Ishaq, G.F. Natarer “Performance investigation of an integrated wind energy system for co-generation of power and hydrogen,’’ *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 43, Issue 19, pp. 9153-9164, 2018.
- [89] Z. Celik, H. S. Celik, “Parameters affecting exergetic efficiency of PV/T systems and hybrid system design with water heater,’’ *EJONS International Journal on Mathematics, Engineering and Natural Sciences*, vol 3, pp. 107-119, 2018.
- [90] M. Kanoglu, Y. Cengel, J. M. Cimbala, “Fundamentals and applications of renewable energy, 1st edition,’’ McGraw-Hill Education: United States, America, pp. 265-270, 2020.

- [91] S. Rehman, L. M. Alhems, Md. M. Alam, L. Wang, Z, "A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost," Ocean Engineering, Volume 267, 113192, 2023.
- [92] F. Toprak, "Reaktif red 198'in fıstık kabuğu ile adsorpsiyonunda optimum deneysel şartların taguchi metoduyla belirlenmesi," Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2010.
- [93] S. Hoseinzadeh, E. Assareh, A. Riaz, M. Lee, D. A. Garcia, "Ocean thermal energy conversion (OTEC) system driven with solar-wind energy and thermoelectric based on thermo-economic analysis using multi-objective optimization technique," Energy Reports, vol 10, pp. 2982-3000, 2023.
- [94] B. Koç, F. Kaymak, "Yanıt yüzey yöntemi ve gıda işleme uygulamaları," 2009.
- [95] A. H. Shiravi, M. Firoozzadeh, M. Lotfi, "Experimental study on the effects of air blowing and irradiance intensity on the performance of photovoltaic modules, using Central Composite Design" Energy, vol238, 121633, 2022.
- [96] Design Expert 13, <https://www.statease.com/docs/v13/>, 15.07.2023.
- [97] O. Ozcan, A. N. Akın, "Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study," International Journal of Hydrogen Energy, vol 44, Issue 27, pp.14117-141262, 2019.
- [98] A. Dezhdar, E. Assareh, N. Agarwal, A. Bedakhanian, S. Keykhah, G. Y. Fard, N. Zadsarf, M. Aghajari, M. Lee, "Transient optimization of a new solar-wind multi-generation system for hydrogen production, desalination, clean electricity, heating, cooling, and energy storage using TRNSYS," Renewable Energy, vol 208, pp. 512-537, 2023.
- [99] H. Li, X. Sun, H, "Wave energy: history, implementations, environmental impacts, and economics," Proceedings of SPIE, vol 12326, 123260N, 2022.
- [100] R. Kempener, F. Neumann. "Wave energy technology brief," International Renewable Energy Agency (IRENA), 18, 2014.
- [101] M. Taylor, S. Al-Zoghoul, P. Ralon, O. Sorokino, "Renewable power generation costs in 2022," International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023.
- [102] EPDK, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <https://www.epdk.gov.tr/detay/icerik/3-0-167/resmi-istatistikler>, 15.07.2023.
- [103] Y. Taranto, M. Rogner, E. Yeldan, S. Acar, B. Kat, "Türkiye'de elektrik sistemi dönüşümünün sosyoekonomik etkileri," Shura Enerji Dönüşüm Merkezi, Sabancı Üniversitesi, 2021.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. H. Balta, Z. Yumurtacı, “Bütünleşik Formda Dalga, Güneş ve Rüzgar Enerjilerinden Elektrik Üretiminin Araştırılması,” 7. İzmir Rüzgar Sempozyumu ve Sergisi, 2023.

Makaleler

1. H. Balta, Z. Yumurtacı, “Investigation and Optimization of Integrated Electricity Generation from Wind, Wave, and Solar Energy Sources,” *Energies*, vol. 17, 603, 2024.

