

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**İZMİR İKLİM ŞARTLARI İÇİN
FOTOVOLTAİK EVİRİCİ AĞIRLIKLI VERİM
MODELİ**

İlker ONGUN

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

İkinci Danışmanı: Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 25 Ağustos 2017

İZMİR

2017

İlker ONGUN tarafından doktora tezi olarak sunulan “İzmir İklim Şartları için Fotovoltaik Evirici Ağırlıklı Verim Modeli (A Photovoltaic Inverter Weighted Efficiency Model for İzmir Climate Conditions)” başlıklı bu çalışma, E. Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 25 Ağustos 2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Günnur KOÇAR



Raportör Üye : Doç. Dr. Engin KARATEPE



Üye : Doç. Dr. Sabit Numan ÇETİN



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Necdet YILDIZ



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Murat ATEŞ



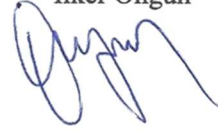
EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “İzmir İklim Şartları için Fotovoltaik Evirici Ağırlıklı Verim Modeli” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

15 Eylül 2017

İlker Ongun



ÖZET**İZMİR İKLİM ŞARTLARI İÇİN
FOTOVOLTAİK EVİRİCİ AĞIRLIKLI VERİM MODELİ**

ONGUN, İlker

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Günnur KOÇAR
Ağustos 2017, 120 sayfa

Bir fotovoltaik güç sisteminin (FVGS) yıllık enerji hasadı, yalnızca eviricinin elektriksel dönüşüm verimine değil aynı zamanda FV sistemin kurulu olduğu coğrafyaya ve iklim şartlarına da bağlıdır. Bu çalışma kapsamında İzmir iklim koşullarında FV eviricilerin yıllık hasat tahminlemede kullanılabilecek bir ağırlıklı verim modeli geliştirilmiştir.

Modelin geliştirilmesi öncelikle yüksek çözünürlüklü ve kesintisiz iklim verisi gerektirmektedir. Türkiye’de bu nitelikteki veriler hazır biçimde bulunmadığı için mevcut verilerin işlenmesiyle uygun nitelikte veri takımları elde edilmesi gerekmiştir. Elde edilen veri setleri üzerinde kristal silisyum (c-Si) FV hücrelerin en yüksek güç noktasındaki (MPP) üretimleri hesaplanarak yıllık dağılımlarına göre güç aralıklarının üretime katkı ağırlıkları belirlenmiştir.

Belirlenen bu değerler, Avusturya Teknoloji Enstitüsü – AIT FV Evirici Test Laboratuvarlarında yapılan denemeler ile diğer ağırlıklı verim modelleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ülkenin orta enleminde yer aldığı için Türkiye ışınımını temsil edebilecek İzmir şartları için geliştirilen bir ağırlıklı verim modeli elde edilmiştir. Elde edilen model, İzmir şartlarında diğer modellere göre daha gerçekçi bir hasat tahminlemesi yapmaktadır.

Anahtar sözcükler: Fotovoltaik evirici, ağırlıklı verim, hasat, güneş ışınımı, bölgesel iklim şartları.



ABSTRACT**A PHOTOVOLTAIC INVERTER WEIGHTED EFFICIENCY
MODEL FOR İZMİR CLIMATE CONDITIONS**

ONGUN, İlker

PhD. Thesis in Solar Energy Technology

Supervisor: Prof. Dr. Günnur KOÇAR

August 2017, 120 pages

Yield of a photovoltaic power system (PVPS) is dependent not only on the electrical conversion efficiency of the inverter used, but also to the geographical location and local climatic conditions of where the system is installed. Within this study, a weighted efficiency model to use in estimating annual yield of PVPSs installed in İzmir or locations with similar climatic conditions.

Development of the model primarily requires a high resolution and uninterrupted climatic measurement data set. Since there is no access to a local measurement data meeting those requirements in Turkey, the available data was processed to produce a data set that meets the requirements. The resulting data set was used to calculate the energy production of c-Si PV cells at their maximum power point and the annual distribution of that production. Individual contributions of the power ranges to the annual yield were used to determine the weights of the respective ranges.

Calculated values were compared with the other weighted efficiency models through the tests made in AIT – Austrian Institute of Technology PV Inverter Test Laboratories. The result is a new weighted efficiency model developed for İzmir climatic conditions that can represent the irradiation of Turkey for being in the median latitude of the country.

Keywords: Photovoltaic inverter, weighted efficiency, yield, solar irradiation, regional climate.

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek desteklerini esirgemeyen ve değerleri yönlendirmeleriyle çalışmanın tamamlanmasını sağlayan Prof. Dr. Günnur Koçar'a ve Prof. Dr. Engin Özdemir'e

Denemelerin yapılması için tesislerinde çalışma imkânı sağlayan AIT – Austrian Institute of Technology kuruluşuna,

Çalışmalara temel oluşturan ölçme verilerini sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne, ve Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü'ne

Veri toplama, düzenleme ve işleme süreçlerinde katkı sağlayan Fırat Salmanoğlu, Güner Seven, Ayhan Uğur ve Sertan Ünalın'a

Veri analizi sonrasında geliştirilen matematik modelin doğrulanmasında fikirlerini esirgemeyen Prof. Dr. Adnan Değirmencioğlu'na

Çalışmada yer alan grafiklerin oluşturulmasına sağladığı katkılar için Gülşah Ongun'a

En içten teşekkürlerimle...



İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
a. Latin harfli kısaltma ve simgeler	xxi
b. Yunan harfli simgeler	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TANIMLAR VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	14
2.1 Verim Hesaplama	15
2.1.1 Dönüşüm Verimi ve Tepe Verim	15
2.1.2 Ağırlıklı Verim	17
2.1.2.1 η_{EURO}	18
2.1.2.2 η_{CEC}	18
2.1.2.3 Diğer modeller	19
2.1.3 Takip Verimi	19
2.1.4 Baştanbaşa Verim	21
2.1.5 Verim Ölçme	21
2.2 Mevcut Ağırlıklı Verim Modelleri	23
2.2.1 η_{EURO} Aksaklıkları	23
2.2.2 η_{CEC} Aksaklıkları	26
3. YÖNTEM	27
4. VERİ DÜZENLEME	31
4.1 Eğimli Yüzeye Gelen Işınımın Belirlenmesi	31
4.2 FV Modül Sıcaklığı Matematik Modeli	38
4.3 Hasat Dağılımı	43
5. İZMİR AĞIRLIKLI VERİM HESAPLAMASI	53
5.1 Yeni Katsayıların Belirlenmesi	55
5.1.1 $\eta_{İZMİR}$ versiyon.1: Çok aralıklı model	58
5.1.2 $\eta_{İZMİR}$ versiyon.2: Eşit hasat aralıklı model	61
5.1.3 $\eta_{İZMİR}$ versiyon.3: Eşit güç oranı aralıklı model	62
5.1.4 $\eta_{İZMİR}$ versiyon.4: Doğrusal değişimli aralıklar modeli	64
6. DENEMELER	67
6.1 Laboratuvar Altyapısı	67

İÇİNDEKİLER (devam)

6.2	Deney Tasarımı	69
6.3	Denemelere Esas Eşitlikler.....	71
6.3.1	η_{EURO}	71
6.3.2	η_{CEC}	71
6.3.3	$\eta_{\text{İZMİR1}}$	72
6.3.4	$\eta_{\text{İZMİR2}}$	72
6.3.5	$\eta_{\text{İZMİR3}}$	72
6.3.6	$\eta_{\text{İZMİR4}}$	73
6.4	Verim Değişimi Deneyleri	73
6.4.1	Evirici 1.....	74
6.4.2	Evirici 2.....	76
6.4.3	Evirici 3.....	78
6.4.4	Evirici 4.....	80
6.4.5	Evirici 5.....	82
6.4.6	Evirici 6.....	84
6.4.7	Evirici 7.....	86
6.4.8	Evirici 8.....	88
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	91
8.	KAYNAKÇA.....	95
9.	ÖZGEÇMİŞ	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 1901–2012 yılları arasında yüzey sıcaklıklarında gözlenen değişim (<i>Kaynak: IPCC Climate Change Report, 2013</i>).....	1
1.2 1970-2010 yılları arasındaki toplam insan kaynaklı sera gazı salımları (<i>Kaynak: IPCC Climate Change 2014 Report</i>).....	2
1.3 Yeryüzü ortalama sıcaklığındaki yıllık ortalama değerlerin sanayi öncesi dönemden günümüze dek olan seyri (<i>Kaynak: Dünya Meteoroloji Örgütü 11 Kasım 2016 tarihli Küresel İklimde Son Durum Önbildirisi</i>).....	3
1.4 Kıyı ve ada ölçüm verilerine dayalı olarak tahminlenen 1860 – 2009 küresel ortalama deniz seviyesi değerleri (Veriler 1990 yılı için sıfırlanmıştır).....	4
1.5 Gelgit ölçekleri (Maregraf) ile yapılan ölçümler (1850-1900 yılları arasında hata bantlarında görülen genişleme, alet sayısının azlığından kaynaklıdır ve zaman içinde ölçüm yeri sayısı arttıkça hata bandı daralmaktadır).....	5
1.6 1992’den beri muhtelif gözlem ve ölçüm uydularından alınan küresel ortalama deniz seviyesi verileri (<i>Kaynak: Center for Satellite Applications and Research – STAR¹¹</i>).....	6
1.7 Fosil yakıtlı ve yenilenebilir kaynaklı 1 GW elektrik santralinden kaynaklanan küresel ısınma etkisi (<i>Kaynak: Edmonds ve Smith, 2011</i>).....	9
1.8 Dünyada FVGS kurulumlarının güncel özeti (<i>DGK:Dünyanın Geri Kalanı, Veriler: EPIA, IEA PVPS, CleanTech, Solar Power Europe, Mercom</i>).....	11
2.1 Tipik bir şebeke bağlantılı FV eviricide dönüştürme verimi ile giriş gerilimi ve çıkış akımındaki ilişki.....	16
2.2 Evirici verim ölçmesi için deney devresi (<i>Kaynak: TS EN 50530</i>).....	21
2-3 3 fazlı şebeke bağlantılı bir evirici için TS EN 50530 uyarınca verim değerlendirmelerini yapmak üzere kullanılacak test düzeneği.....	22
2.4 Bulutlu ve güneşli günlerde anlık değerlerle saatlik ortalamanın karşılaştırılması	24
2.5 SDŞ Işınımın (1 000 W/m ²) katları olarak farklı ışınım şiddetlerinde yıllık üretime verilen katkı miktarları	25
2.6 Hotopp (η_{EURO}), güney bakılı 30° eğimli yüzeyde anlık ışınım değerleri, aynı düzlemdeki dizinin MPP gücü, % 15 büyütülmüş dizinin gücü	25
2.7 CEC ağırlıklandırma modeli ile anlık değerlerin karşılaştırılması.....	26
3.1 Değişik ortalama süreli ışınım ölçümleri arasındaki farklar.....	28

SEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.2 Hasat dağılımı belirleme işlem akışı.....	29
4.1 Menemen OMGİ 2009-2012 yılları arasındaki ışınım profilleri	32
4.2 Güney bakılı β eğimli FV modül	33
4.3 Güneş deklinasyon (sapma) açısının yıllık değişimi.....	35
4.4 β_{opt} açısı ile yerleştirilmiş FV modül	36
4.5 Menemen OMGİ 2011 yılı yatay eksene gelen ve en uygun eğim açısındaki (33°) ışınım verisi değerleri.....	37
4.6 Menemen OMGİ 2009-2012 yılları arasındaki sıcaklık profilleri.....	38
4.7 FV hücre I-diyot eşdeğer devresi	38
4.8 E. Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü modül ve ortam sıcaklığı, ışınım ölçümleri....	40
4.9 Öngörülen ve ölçülen modül sıcaklığı değerleri	42
4.10 MGM Işınım-Ortam sıcaklığı verilerinde model ile belirlenen modül sıcaklığı değerleri	43
4.11 İzmir iklim ve coğrafi şartlarında 33° eğimli düzlemdeki doğrudan ışınımına bağlı olarak tam güney bakılı bir FV sistemin yıllık enerji dağılımı	45
4.12 Farklı enlemlerde yer alan sistemlerin ışınım aralığına göre hasat dağılımları	46
4.13 Tipik FV hücre $I-V$ eğrisi, en yüksek güç noktası (MPP) ve doluluk oranı (FF)	48
4.14 Yıllık hasadın P_{MPP} değerlerine göre yıllık dağılımı.....	50
4.15 Burgdorf – İsviçre (a), Kassel – Almanya (b), Viyana – Avusturya (c) ve Atina – Yunanistan (d) için P_{MPP} değerlerine göre yıllık hasat dağılımı.....	51
5.1 Işınımına göre gelen enerji (a) ve dizinin MPP gücüne göre hasat dağılımlarının (b) karşılaştırılması	53
5.2 η_{EURO} ve η_{CEC} ağırlıklı verim modellerinin katsayı kapsamaları ve İzmir hasat dağılım profiline karşılaştırılması.....	54
5.3 Euro ve CEC ağırlıklı verim modellerinde kullanılan güç yüzdesi aralıkları için İzmir veri seti kullanılarak elde edilen katsayılar	57
5.4 İzmir FV hasat profilini temel alan ağırlık katsayıları (Toplam hasadın dağıldığı güç aralığı yirmi eşit parçaya bölünmüştür)	60

SEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.5 Her biri yıllık hasadın %20'sini üreten güç oranı aralıkları renk ayrımları ile belirtilmiştir	62
5.6 Evirici çalışma güç oranlarının eşit aralıkları renk ayrımları ile belirtilmiştir (Yıllık hasadın %2 kadarına karşılık gelen tam güç üzerindeki oranlar da tam güç aralığı kapsamında değerlendirilmiştir).....	63
5.7 İzmir iklim şartlarında FV eviricinin MPP gücünün dize anma gücüne oranına göre hasat dağılım katsayıları ve birikimli hasat değerleri.....	64
6.1 AIT FV Evirici Deney Laboratuvarının donanımsal alt yapısı	67
6.2 Evirici 1 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	74
6.3 Evirici 2 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	76
6.4 Evirici 3 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	78
6.5 Evirici 4 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	80
6.6 Evirici 5 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	82
6.7 Evirici 6 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	84
6.8 Evirici 7 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	86
6.9 Evirici 8 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1 $G-T_{\text{modül}}-T_{\text{ortam}}$ değişkenleri arasındaki çoklu regresyon sonuçları	41
2 η_{EURO} tahminleme modeli için katsayılar ve kısmi MPP aralıkları	55
3 η_{CEC} tahminleme modeli için katsayılar ve kısmi MPP aralıkları	55
4 İzmir şartları için η_{EURO} katsayıları.....	56
5 İzmir şartları için η_{CEC} katsayıları.....	56
6 İzmir şartlarında çalışan bir eviricinin farklı giriş güçlerindeki veriminin toplam üretim içindeki ağırlıkları	59
7 Eşit hasat aralıklı model için güç aralığı değerleri	61
8 $\eta_{\text{İZMİR}}$ versiyon.3 için güç aralıkları ve ağırlık katsayıları.....	63
9 $\eta_{\text{İZMİR}}$ versiyon.2 için güç aralıkları ve ağırlık katsayıları.....	65
10 Denemelerde kullanılan eviricilerin temel teknik özellikleri	70
11 Evirici verim ölçmelerinde η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırma özeti.....	91
12 Evirici verim ölçmelerinde $\eta_{\text{İZMİR1}}$ ile η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırma özeti	92
13 Önerilen modeller ile mevcut modeller arasındaki tahminleme farkları	92

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a. Latin harfli kısaltma ve simgeler

Terim	Simge/Kısaltma	Birim	İngilizcesi
Açık devre gerilimi	V_{AD}	V	V_{OC} – Open circuit voltage
Alternatif Akım (a.a.)	ac	V, A, W	Alternative Current
Aralık dönencesinden sonraki gün sayısı	$ADGS$		NDS – Number of days after December solstice
Birim yük	q	C	Elementary charge, $1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Boltzman sabiti	k	J/°K	Boltzman constant, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
Boyutlandırma çarpanı	BC		SF – Sizing Factor
Doğru Akım (d.a.)	dc	V, A, W	Direct Current
Doluluk Oranı	FF		Fill Factor
En yüksek güç noktası	MPP	W	Maximum Power Point
En yüksek güç noktası takibi	$MPPT$		Maximum Power Point tracking
Fotovoltaik	FV		PV – Photovoltaic
Fotovoltaik Güç Sistemi	$FVGS$		PVPS – Photovoltaic Power System
FV Modül akımı	I_{FV}	A	PV module current
FV modül sıcaklığı	T_{mod}	°C	
Görünür güç	S	VA	Apparent power
Güç	P	W	Power, active power.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Gün sayısı	<i>n</i>		Number of the day
Işınım	<i>G</i>	W/m ²	Irradiance
Işıtım	<i>H, I</i>	Wh/m ²	Irradiation, insolation
Akım – Gerilim Karakteristiği	<i>IV</i>		<i>IV</i> curve
Kaliforniya Enerji Komisyonu	<i>CEC</i>		California Energy Commission
Kısa devre akımı	<i>I_{KD}</i>	A	<i>I_{SC}</i> – Short circuit current
Kristal Silisyum	<i>c-Si</i>		Crystal silicon
Otomatik Meteorolojik Gözlem İstasyonu	<i>OMGİ</i>		AMOS – Automatic meteorological observation station
SDŞ Sıcaklığı	<i>T_{SDŞ}</i>	°C	TSTC – Standard test conditions temperature, 25 °C.
Standart Deney Şartları	<i>SDŞ</i>		STC – Standard Test Conditions
Tipik Meteoroloji Yılı	<i>TMY</i>		Typical Meteorological Year
Tutulum Boylamı	<i>TB</i>	Derece	Ecliptic Longitude

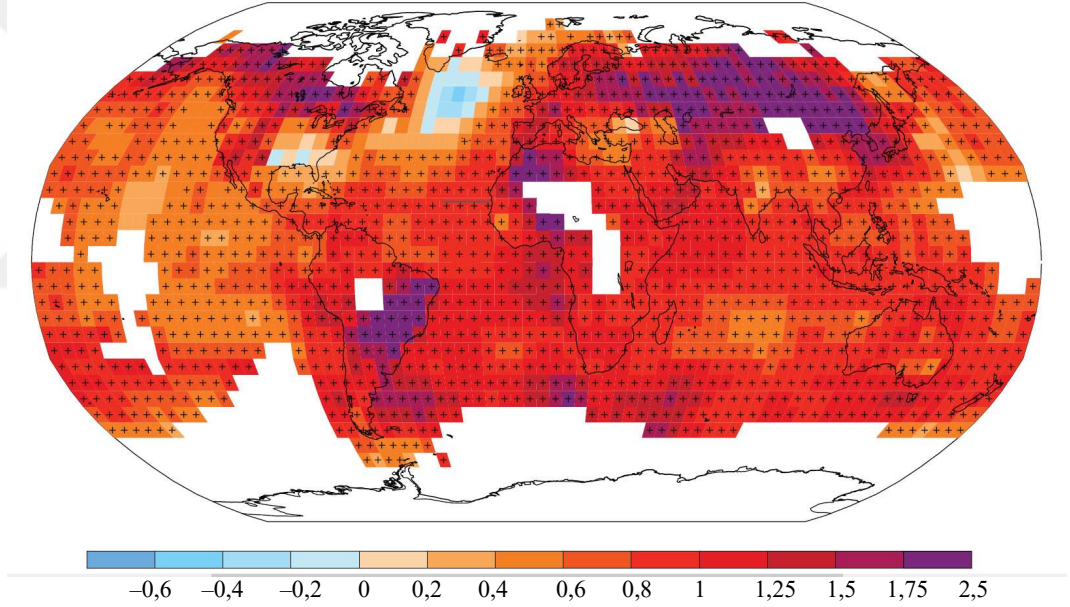
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

b. Yunan harfli simgeler

Terim	Simge/Kısaltma	Birim	İngilizcesi
Güneş yükseklik açısı	α	Derece	Solar altitude angle
Akım sıcaklık katsayısı	α	%/°C	Temperature coefficient of current 0,04%/ °C
Eğim	β	Derece	Slope, tilt
Açık devre gerilimi sıcaklık katsayısı	β	%/°C	Temperature coefficient of voltage -0,4%/ °C
Güney açısı, azimut	γ	Derece	Azimuth angle
Güneş sapma açısı	δ	Derece	Solar declination angle
Verim	η		(Eta) Efficiency
Geliş açısı	θ	Derece	Angle of incidence
Güneş açısı	θ_z	Derece	Zenith angle
Enlem	φ	Derece	Latitude
Saat açısı	ω	Derece	Hour angle

1. GİRİŞ

20. yüzyılın son çeyreğinde, sınırlı fosil kaynaklara dayalı teknolojilerin görünür gelecekte enerji gereksinimlerini karşılayamama riski somut bir geçek olarak fark edildikten sonra, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanan teknolojilerin geliştirilmesi yönünde önemli adımlar atılmaya başlanmıştır. Henüz kısmen Ar-Ge aşamasında olan ve tutundurma için yüksek maliyetler gerektiren bu adımların atılmasını toplumlara kabul ettirmek için, fosil kaynakların tahrip edici çevresel etkileri önemli bir ikna aracı olarak kullanılmaktadır. Bu argümanın en belirgin parametresi olarak da atmosfere salınan karbon miktarındaki artışa bağlı olarak gerçekleşen küresel ısınma – iklim değişikliği öne çıkmaktadır. Şekil 1.1’de sanayi devrimi sonrasında gözlemlenmiş olan yerküre yüzey sıcaklığı değişimleri gösterilmektedir.



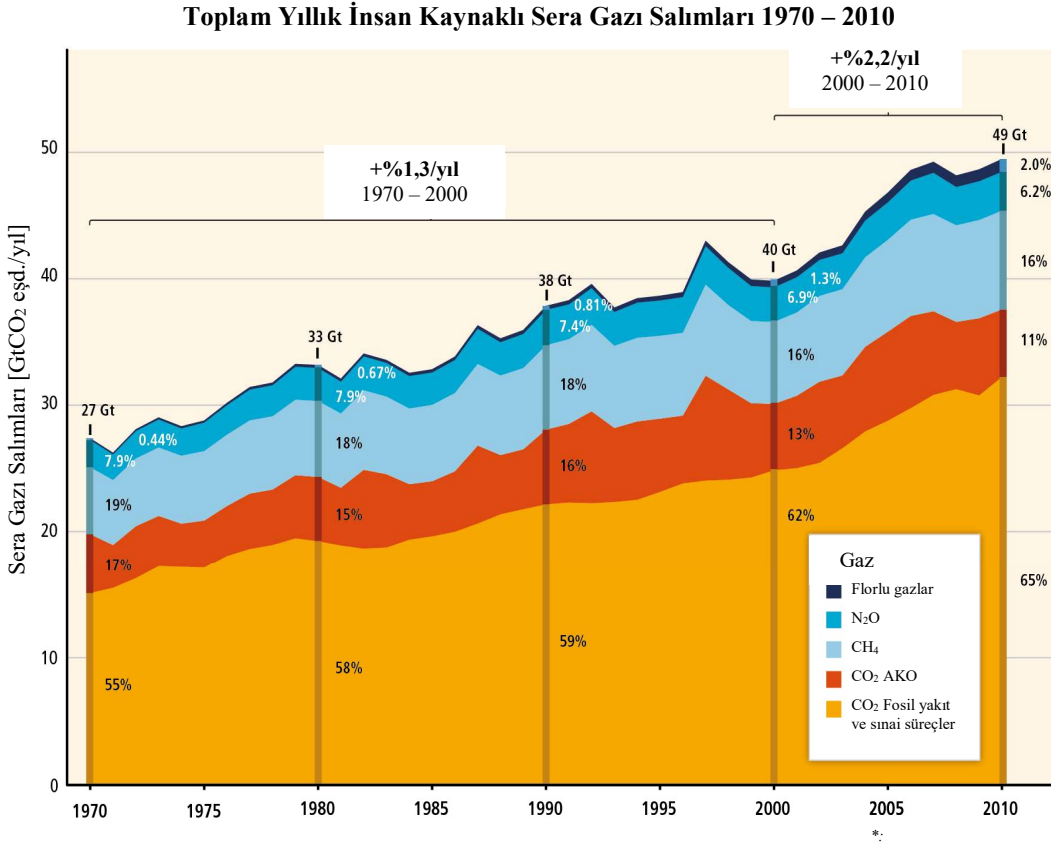
Şekil 1.1 1901–2012 yılları arasında yüzey sıcaklıklarında gözlenen değişim (Kaynak: IPCC Climate Change Report, 2013)

İklim değişikliği, küresel ısınmaya bağlı olarak gerçekleşeceği öngörülen ve çevre açısından yıkıcı sonuçları olabilecek yerel ve küresel iklimsel farklılıklar (kuraklık, sıcak dalgası, akarsu rejimlerinde değişiklik, deniz suyu seviyeleri, çölleşme vb.) olarak tanımlanabilir. Sera gazı salımları ile yeryüzü sıcaklıkları arasındaki ilişkinin bilimsel kanıtları IPCC¹ 5. Değerlendirme Raporunda (Stocker

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change – Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli: Birleşmiş Milletler Çevre Programı UNEP ve Dünya Meteoroloji Örgütü – WMO tarafından oluşturulmuş olan uluslararası iklim değişikliği değerlendirme kuruluşu.

et al., 2013) gösterilmiştir. Küresel sıcaklıklar salımlara bağlıdır ve esasen, atmosfere salınmış birikimli karbon miktarındaki artışla orantılı biçimde yükselmektedir.

İnsan kaynaklı karbondioksit salımının neden olduğu sera etkisi yüzünden değişen yüzey sıcaklıkları, ortalama deniz suyu yüksekliği ve yağış rejimlerinde değişiklikler gibi sonuçlar da ortaya çıkardığı için, sorun son yıllarda artık “İklim Değişikliği” olarak tek başlıkta anılmaktadır. İnsan kaynaklı sera gazı salımlarının değişimi Şekil 1.2’de görülmektedir.

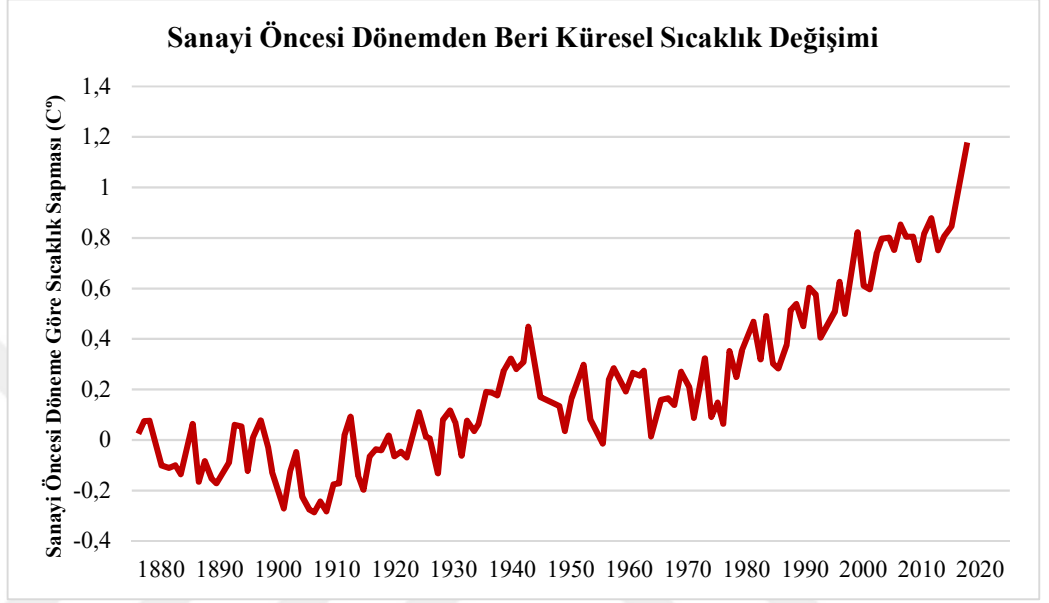


Şekil 1.2 1970-2010 yılları arasındaki toplam insan kaynaklı sera gazı salımları (Kaynak: IPCC Climate Change 2014 Report)

Burada gösterilen salımların CO₂ eşdeğerleri, IPCC İkinci Değerlendirme Raporundaki GWP100 – Küresel Isınma Potansiyeli modeline göre hesaplanmıştır. Grafikteki Arazi Kullanımı ve Ormancılık – AKO² salımları verisi, orman yangınları, turba yangınları ve turba bozunumu değerlerini temsil etmektedir.

² Arazi Kullanımı, Arazi Kullanımı Değişikliği ve Ormancılık – AKAKDO (İng: LULUCF) olarak da bilinir.

Salımlardaki artış ile küresel ortalama sıcaklıkta oluşan sapma arasındaki ilişki, Şekil 1.3'teki grafik üzerinden görülebilir. Birleşmiş Milletlere bağlı Dünya Meteoroloji Örgütü³ tarafından 2016 sonunda yayınlanan geçici Küresel İklimde Durum raporunda yer alan bu grafikte, sanayi öncesi dönemden günümüze kadar kaydedilmiş sıcaklıklar verilmiştir.



Şekil 1.3 Yeryüzü ortalama sıcaklığındaki yıllık ortalama değerlerin sanayi öncesi dönemden günümüze dek olan seyri (Kaynak: Dünya Meteoroloji Örgütü 11 Kasım 2016 tarihli Küresel İklimde Son Durum Önbildirisi)

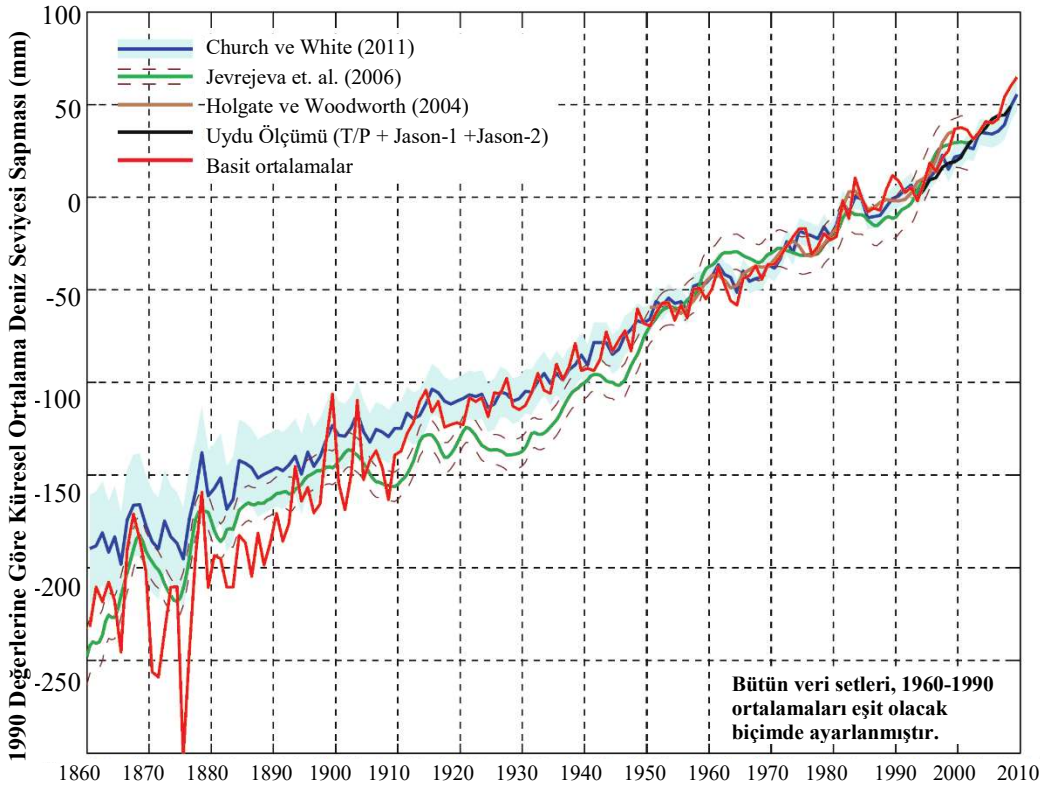
Şekil 1.3'te görülebileceği gibi, 1930'lara kadar arada bir düşüşle neredeyse yatay bir seyir izleyen sıcaklık değerleri, özellikle 1970 sonrasında kararlı biçimde yükseliş eğilimine girmiştir. Grafikteki son veri, 2016 yılının Ocak-Eylül arası ortalamasıdır ve yılın son üç ayındaki düşük sıcaklık verileri eklendiğinde bu denli çarpıcı bir sıçrama görülmeyecektir. Yine de, özellikle 1970'lerden sonra görülen doğrusal artış eğilimi çok belirgindir ve Şekil 1.2'de verilen sera gazı salımlarındaki artış ile dikkate değer bir korelasyon göstermektedir.

Sera gazı salımlarındaki artış nedeniyle yeryüzü sıcaklıklarındaki artışın gözlenebilir diğer bir önemli etkisi de, buzullardaki erimeye bağlı olarak gerçekleşen deniz suyu seviyesindeki yükselmedir. Deniz suyu seviyelerindeki yükselme, iklim değişimi meseleleri arasında en tartışmalı ilerleyen alanlardan

³ WMO – World Meteorological Organization

birisidir. Yükselmelerin olağan uzun dönemlik bir döngünün parçası mı yoksa insan kaynaklı salımların etkilerinden birisi mi olduğu sorusu hep ortadadır.

Church ve White (2011), deniz seviyesi yükselişi üzerine; İngiliz Tabii Çevre Araştırmaları Kurumuna⁴ bağlı çalışan Milli Oşinografi Merkezinin⁵ dünya çapındaki 2320 deniz suyu seviyesi ölçme istasyonundan ve 66 dip basıncı ölçme istasyonundan 1933 yılından beri kaydedilen veriler⁶ ile bu ölçümleri temel alan önemli çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmıştır. Şekil 1.4'te, sanayi devrimi sonrasında ortalama deniz seviyesi değerlerindeki sürekli artış belirgin biçimde görülmektedir.



Şekil 1.4 Kıyı ve ada ölçüm verilerine dayalı olarak tahminlenen 1860 – 2009 küresel ortalama deniz seviyesi değerleri (Veriler 1990 yılı için sıfırlanmıştır)

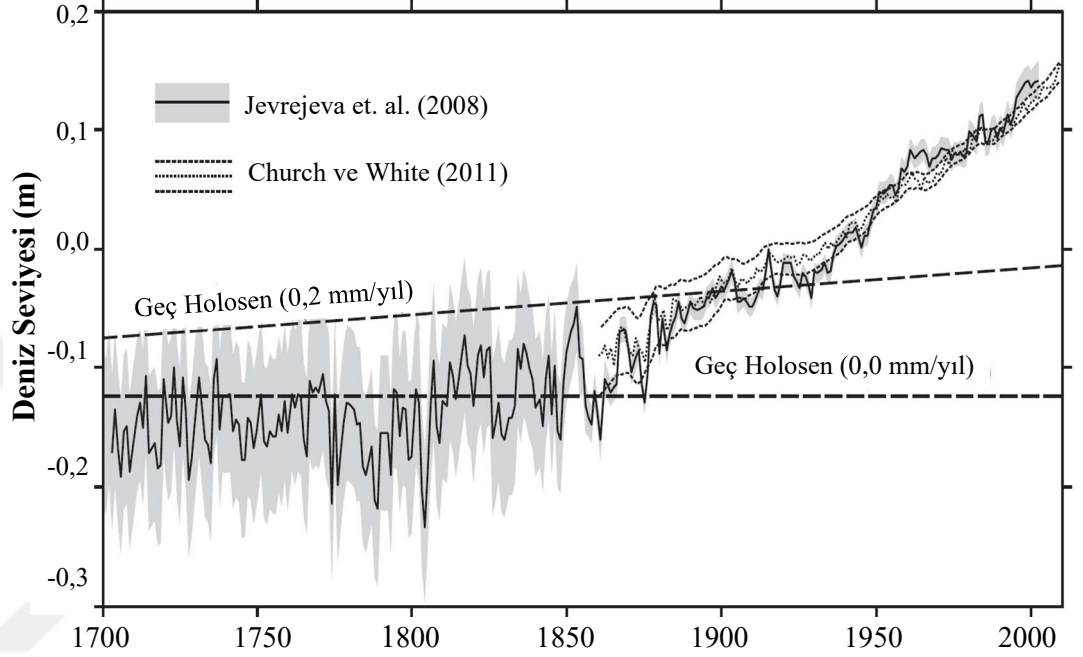
Gehrels ve Woodworth (2013), deniz seviyesindeki modern zamanlardaki yükselişin ne zaman başladığına dair yaptıkları çalışmada, küresel ortalama deniz seviyesinin hesaplanmasındaki bütün yaklaşımları değerlendirmişlerdir. Muhtelif yayınlardaki aletli ölçümler ve temsili kayıtlar (örn. deniz seviyesini gösteren

⁴ Natural Environment Research Council – NERC

⁵ National Oceanography Center – NOC

⁶ Söz konusu verilere ve ölçüm istasyonlarının yerlerine <http://www.psml.org> adresinden ulaşılabilir.

bulgular) ile bunlar arasındaki sapmalar incelendiğinde, Holosen çağın olağan artış hızının (0 ila 0,2 mm/yıl) 1800'lerin sonu ile 1900'lerin başı arasında pozitif yönde kırılarak seviye artışının hızlandığı görülmektedir. Şekil 1.5'te küresel ortalama deniz seviyesi artışı eğilim çizgisinin 1860 –1925 yılları arasında 1,3 mm/yıl ve 1925 sonrasında 1,7 mm/yıl olarak değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 1.5 Gelgit ölçekleri (Maregraf) ile yapılan ölçümler (1850-1900 yılları arasında) hata bantlarında görülen genişleme, alet sayısının azlığından kaynaklıdır ve zaman içinde ölçüm yeri sayısı arttıkça hata bandı daralmaktadır)

Modern zamanlar için verilen küresel ortalama deniz seviyesi değişim değerleri, günümüzdeki en yüksek doğruluklu veri kaynağı olan uydu ölçümleri ile karşılaştırıldığında da benzer bir değişim trendi görülmektedir. Öte yandan bu karşılaştırmalar, uzaydan okyanus yüzeyi topografisi incelemeye yönelik gözlem uyduları ancak 1992'den beri hizmette olduğu için⁷ geçmişe doğru uzun bir dönem için yapılamamaktadır.

Amerikan Milli Havacılık ve Uzay Dairesi⁸ ve Fransız Milli Uzay Çalışmaları Merkezi⁹ ortaklığındaki TOPEX/Poseidon, Jason-1 ve Jason-2 uyduları ile Avrupa Uzay Ajansının¹⁰ ERS-2 ve Envisat uyduları ve Amerikan Donanmasının NASA

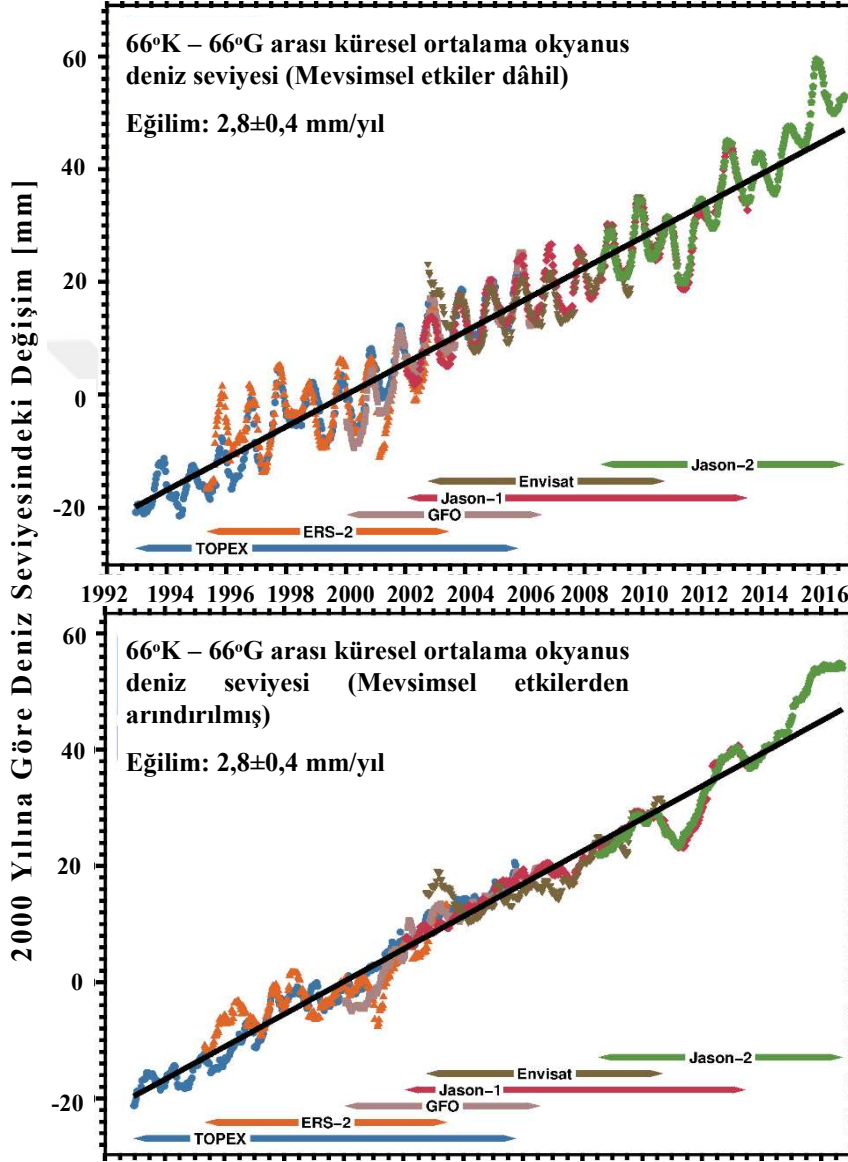
⁷ TOPEX/Poseidon 1992'de, ERS-2 1995'te, GFO 1998'de, Jason-1 2001'de, Envisat 2002'de, Jason-2 2013'te fırlatılmıştır.

⁸ National Aeronautics and Space Administration – NASA

⁹ Centre National d'études Spatiales – CNES

¹⁰ European Space Agency – ESA

ile ortak GFO uydusunun ölçüm sonuçları derlenerek, bir arada verilmiştir. Şekil 1.6'daki ilk grafikte seviye değerleri mevsimsel değişimler dahil olarak, ikinci grafikte ise mevsimsel değişimlerden arındırılarak gösterilmiştir. Her iki durumda da, yılda 2,8 mm olarak belirlenen artış eğilim eğrileri değişmemektedir.



Şekil 1.6 1992'den beri muhtelif gözlem ve ölçüm uydularından alınan küresel ortalama deniz seviyesi verileri (Kaynak: *Center for Satellite Applications and Research – STAR*¹¹)

Son dönem ölçüm verileri ile önceki çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, deniz suyu seviyesindeki artış eğiliminin hızlanarak devam ettiği açıkça görülmektedir. Bu karşılaştırmalar, deniz seviyelerinde gözlemlenen

¹¹ Amerikan Milli Okyanus ve Atmosfer İdaresine bağlı çalışan Uydu Uygulamaları ve Araştırma Merkezi. (https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php, erişim tarihi 10 Şubat 2017.)

yükselmenin, insan kaynaklı salımların belirgin biçimde artmasına neden olan fosil yakıtların kullanımını yaygınlaştıran sanayi devrimi ile eş zamanlı olarak hızlanmış olduğunu ortaya koymaktadır.

Nakado ve arkadaşları., Antarktika ve Grönland buz tabakaları ve dağ buzullarındaki küresel ısınmaya bağlı inceltme miktarı ile yine insan kaynaklı yeraltı suyu kullanımı miktarlarının, mevcut yükselme seviyeleri ile uyumlu olduğunu göstermiştir (Nakada, et al., 2013). Hızlı artış öncesinde 0,3 mm/yıl ve sonrasında 1,3 mm/yıl olarak belirlenen deniz seviyesi yükseliş değerleri, literatürdeki çalışmalar arasında yaygın bir referansa sahiptir.

Yeryüzündeki yaşamımızın büyük iklim felaketleri gerçekleşmeden sürebilmesi için, iklim değişimi üzerindeki insan kaynaklı baskının hızla azaltılması, durdurulması ve mümkün olursa geri alınması gereklidir. Bu konuda, 1992’de imza altına alınan ve 1994’te faaliyete geçen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi¹² kapsamında düzenlenen, konferans, zirve ve imzalanan anlaşmalarla, küresel sıcaklık artışını geri dönüşü olmayan 2 C° değeri ile sınırlama çalışmaları halen sürmektedir.

UNFCC tarafı ülkeler 1992’deki ilk konferansta, “taraf ülkelerin salımlarının 2000 senesine kadar 1990 seviyelerine çekme” hedefinin uygun olmadığına karar vermişlerdir. Sonraki tartışmalarla, gelişmiş ülkeleri salım hedefleri konusunda uluslararası yasalarla bağlayıcı kılan 1995 tarihli Kyoto Protokolü ortaya çıkmıştır. ABD protokolü onaylamamış, Kanada ise 2012’de protokolden çekilmiştir. Diğer tüm taraflar 1. Taahhüt döneminde (2008 – 2012) yer almış ve 37 taraf ülke¹³ 2. Taahhüt dönemi (2013 -2020) hedeflerine katılmayı kararlaştırmıştır.

Durban – 2012 ve Doha – 2013 konferanslarında taraflar, “derin bir kaygı ile”, küresel ısınmayı sanayi önceki döneme göre 2 C° veya 1,5 C° ile sınırlamaya yönelik mevcut çabaların yetersiz olduğunu belirtmiştir. 2015’teki Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında katılımcı 196 ülke, küresel ısınmayı 2 C° veya çabalar yeterli olursa 1,5 C° ile sınırlamayı hedefleyen Paris Anlaşması metnini benimsemiştir. 194 üye ülkenin 132’si tarafından ulusal meclislerinde onaylanan ve tüm ülkeler tarafından imzalanan Paris Anlaşması, 4 Kasım 2016’da yürürlüğe girmiştir.

¹² United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCC

¹³ Tüm AB ülkeleri, Avustralya, Belarus, Hırvatistan, İzlanda, Kazakistan, Norveç, İsviçre ve Ukrayna.

Kyoto Protokolü ve Rio Konvansiyonu gibi küresel anlaşma, sözleşme ve protokollerin yanı sıra, Avrupa Birliğinde de kısa ve orta vadeli hedefler açıklanmıştır. 2009'da Avrupa Parlamentosu tarafından bağlayıcı mevzuat olarak kabul edilen ve 2020 için 20-20-20 hedefleri olarak bilinen İklim ve Enerji Paketinde 2020 yılına kadar;

- salımların 1990 seviyelerinin %20 altına çekilmesi,
- yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji payının toplam tüketim içinde %20'ye yükseltilmesi,
- enerji verimliliği verilerinde %20 iyileşme sağlanması

öngörülmüştür. Avrupa Konseyi bu stratejiyi sürdürerek 2030 için hedeflerini de;

- salımların 1990 seviyelerinin %40 altına çekilmesi,
- yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji payının toplam tüketim içinde %27'ye yükseltilmesi,
- enerji verimliliği verilerinde %27 iyileşme sağlanması

olarak yenilemiştir¹⁴.

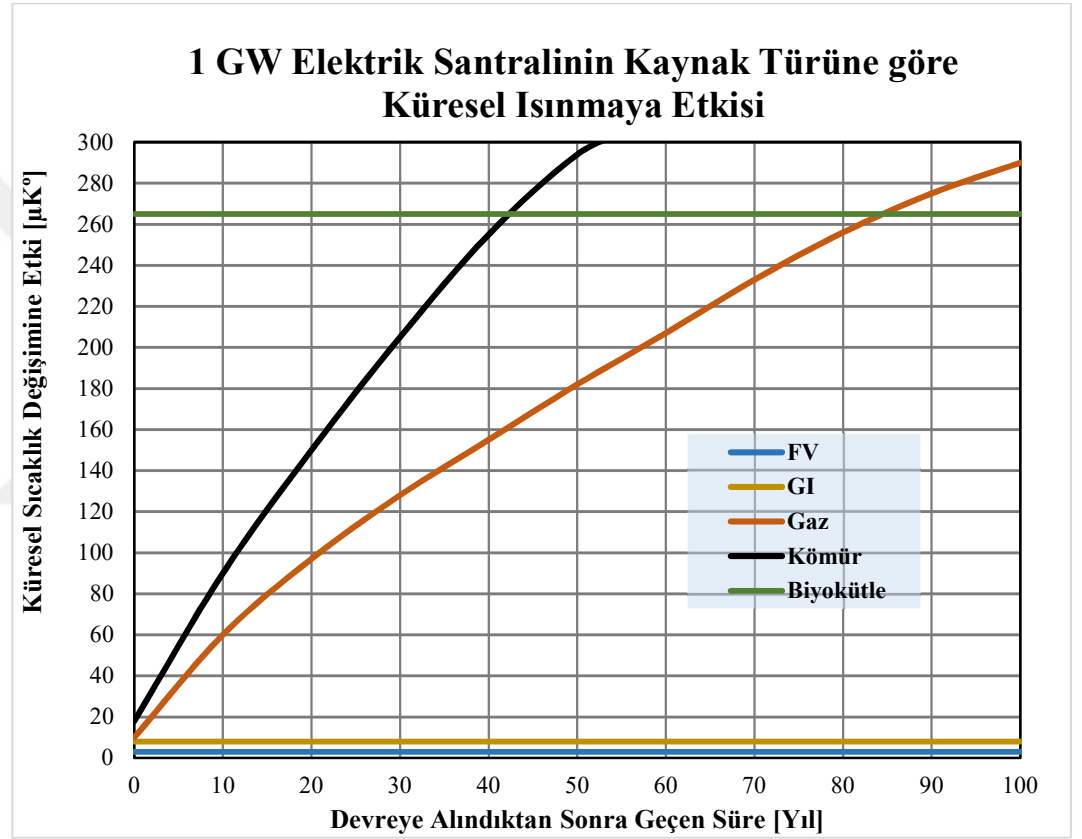
Küresel ısınma değerini, günümüzdeki 1,2 C° olarak tespit edilmiş değerinden sonra, en fazla 2 C° artış ile sınırlamak için salımlarda çok keskin azaltımlar sağlanması gerekmektedir.

Küresel çapta yürütülen araştırmalar ve hükümetlerin siyasi üstlenmeleri nedeniyle düşük salımlı enerji kaynakları, küresel ısınma ve iklim değişikliğinden kaynaklanan olumsuz etkilerin azaltılması için giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Fosil yakıtlara göre daha düşük salımlı olduğu bilinen nükleer enerji kullanımı, bazı çalışmalarda salım azaltımı için depolaması olmayan yenilenebilirler göre daha etkin bir seçenek olarak önerilmektedir (Apergis, ve diğerleri 2010), (Baek ve Pride 2014). Diğer yandan bu çalışmalarda, enerji fiyatlarının enerji talebini ve dolayısıyla salımları artırıcı etkisinin ihmal edilmiş olması nedeniyle elde edilen bulgular gerçeklerden farklı olmuştur. Aynı verilere, talep etkisi eklenecek yapılan Granger nedensellik testlerinde, yenilenebilir enerji

¹⁴ : Konseyin 22 Ocak 2014 tarihli "A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030" başlıklı yazısına istinaden 2030 Enerji Stratejisi olarak açıklanmıştır. (<http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>)

kullanımı ile karbondioksit salımları arasında negatif bir ilişki bulunurken, nükleer enerji kullanımının ilişkisi görülmemiştir (Jaforullah ve King 2015).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin hepsi, küresel ısınmayı azaltma hızları konusunda aynı etkinlikte değildir. Rüzgâr ve akıntı türbinleri gibi mekanik dönüşüm içermeyen yenilenebilir enerji tesislerinde yüzey yansıtıcılığını ve üretim salımlarını değerlendirdikleri çalışmalarında Edmonds ve Smith, fosil yakıtlı santraller ile yenilenebilir kaynaklı santrallerinin küresel ısınmaya katkısını Şekil 1.7’de gösterildiği biçimde sunmuşlardır.



Şekil 1.7 Fosil yakıtlı ve yenilenebilir kaynaklı 1 GW elektrik santralinden kaynaklanan küresel ısınma etkisi (Kaynak: Edmonds ve Smith, 2011)¹⁵

Görüldüğü gibi, 1 GW gücünde güneş ısı veya fotovoltaik kaynaklı elektrik santrali 50 yıl işletildiğinde, aynı güçteki bir kömür yakıtlı elektrik santraline göre küresel ısınma azaltımına yaklaşık 300 µK° katkı sağlamaktadır. Daha küçük güçler için ısınma azaltım etkisi orantılı olarak bulunabilir.

Kalkınma ve sanayi gelişimi için enerji elde edilmesi ve kullanılmasına ilişkin sera gazı salımları, iklim değişikliğinin yavaşlatılmasına yönelik bütün stratejilerin

¹⁵ Aslına sadık olarak yeniden çizilmiştir.

ana bileşenidir. İklim değişikliği ve karbondioksit salımları arasında görülen ilişki, sanayileşme, ekonomik büyüme ve enerji gereksinimindeki artışla birlikte değerlendirildiğinde, konunun sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma alanlarındaki etkileri de önemli bir boyut kazanmaktadır. Bu etkilerin yönetilmesi, enerji tedariki için yenilenebilir kaynakların kullanılması seçeneğini güçlü biçimde içermektedir. İklim değişikliğini yakın ve uzun vadede sınırlama seçeneği olarak yenilenebilir enerji teknolojilerinin değerlendirilmesi, enerji sistemine tam entegrasyon, enerji depolama teknolojileri, güvenilir ve ayrıntılı veri kaydı gibi teknik ve planlama, karbon vergisi, teşvikler gibi yasal ve siyasi alanlarda dikkatli dönüşümler gerektirmektedir (Arent et al., 2011).

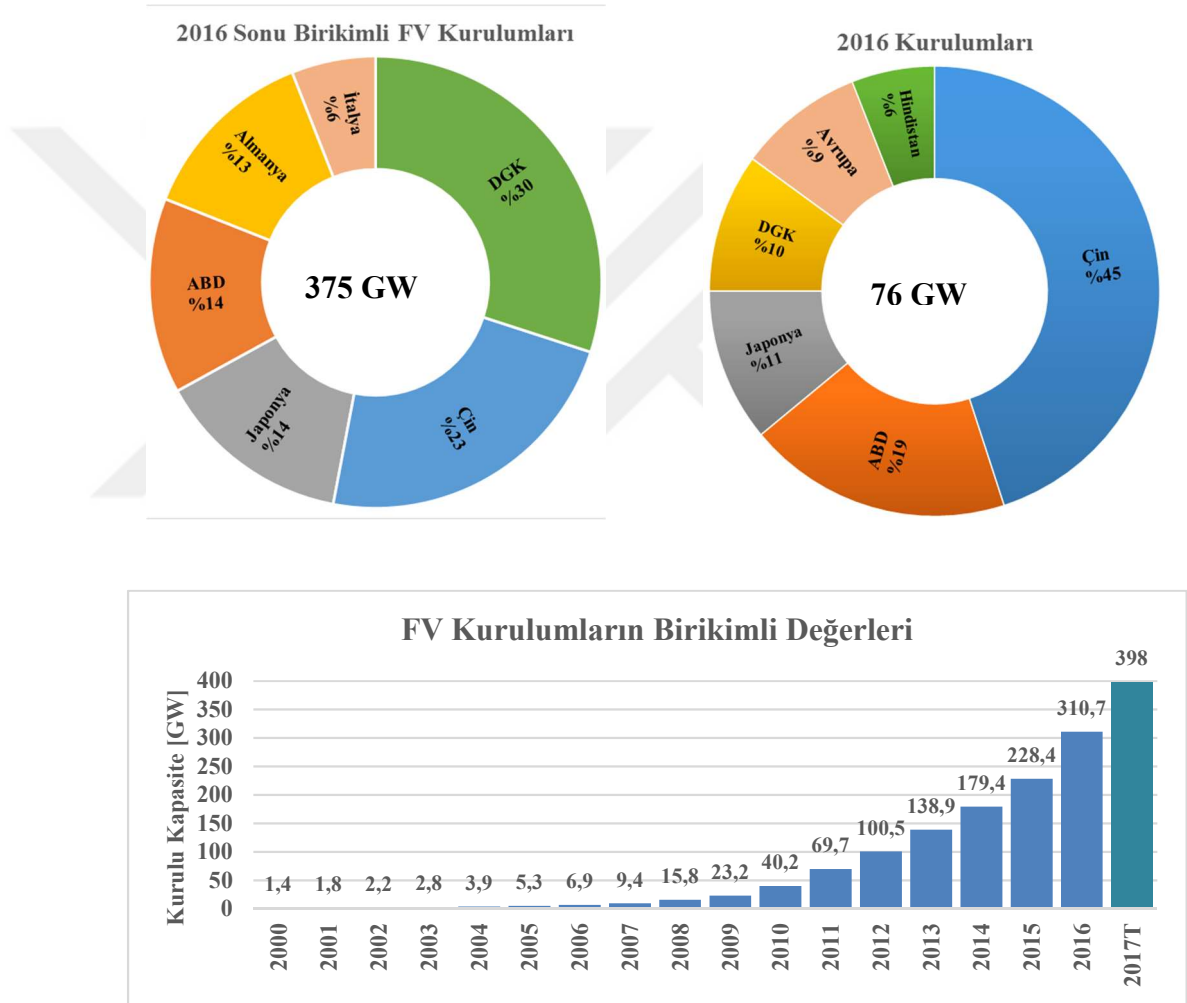
Eldeki bütün bu bulgular ve çok daha fazlası nedeniyle, bütün ülkelerin enerji tedarik politikalarını yenilenebilir kaynakları da göz önüne alacak biçimde geliştirmesiyle, dünyadaki temel ekonomik ve siyasi yapılanmada da önemli değişiklikler oluşmuş ve oluşmaktadır. Bu çerçevede, mevcut teknolojilerin yenilenebilirler ekseninde dönüştürülmesi ve yenilenebilir kaynakların enerji üretiminde kullanımına ilişkin yeni teknolojilerin geliştirilmesi, ülkelerin sürdürülebilir kalkınmaları için kaçınılmaz hale gelmiştir.

En önemli yenilenebilir kaynaklar arasında yer alan güneş enerjisinden günümüzde fotovoltaik (FV) ve güneş ısı olmak üzere iki temel biçimde fayda sağlanmaktadır. Güneş enerjisinden doğrudan doğruya elektrik elde edilmesini sağlayan FV teknolojilerinin kullanımı, sürdürülebilir enerji sistemine giden yolda önemli bir rol oynamaktadır. Bu gidişe uygun olarak, Avrupa (özellikle Almanya) merkezli olarak başlayıp tüm dünyaya yayılan biçimde, FV sistemler ile elektrik üretimi özellikle son 5 yıl içinde marjinal ve yeni teknoloji denemeleri olmaktan çıkıp ana akım elektrik kaynakları arasına girmiştir.

2010'da dünyadaki toplam kurulum, neredeyse yarısı Almanya'da olmak üzere 40 GW iken, 2015'te 50 GW ve 2016'da 73 GW yeni FV sistem kurularak birikimli toplam kapasite 310 GW değerine ulaşmıştır. Günümüzde toplam elektrik üretiminde FV katkısı %1'i geçen 22 ülke vardır. İtalya %8, Yunanistan %7,4 ve Almanya %7,1 ile ilk üçü oluşturmaktadır. Bugün dünyadaki toplam elektrik üretiminin %1,3'ü FV ile sağlanmaktadır (PVPS - Photovoltaics Power Systems

Programme 2016)¹⁶. 2020 itibariyle dünyadaki toplam kurulu kapasitenin 700 GW değerine ulaşacağı tahmin edilmektedir (Solar Power Europe)¹⁷.

Şekil 1.8’de, dünyadaki kurulu FV kapasitesinin yıllara göre evrimi ile 2016 yılında dünyada kurulan FV sistemler ve mevcut kümülatif kurulum değerleri görülmektedir. Hükümetlerin fosil yakıtlardan kaçınarak karbon salımlarını azaltmak, enerjide dışa bağımlılık oranını düşürmek ve ekonomik büyümeyi hızlandırmak gibi amaçlarla FV sistem kurulumlarına öncelik vermesi, FV pazarında gözle görülür hızlı bir büyüme yaratmıştır.



Şekil 1.8 Dünyada FVGS kurulumlarının güncel özeti (DGK:Dünyanın Geri Kalanı, Veriler: EPIA, IEA PVPS, CleanTech, Solar Power Europe, Mercom)

Bütün zamanlarda kurulan kapasitenin neredeyse dörtte biri sadece 2016’da devreye alınmıştır. Başlangıçta yoğunluklu olarak Almanya’da gerçekleşen yeni kurulumlar, artık bütün dünyada hızlanarak artmaktadır. Almanya’da bütün

¹⁶ Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) birimidir.

¹⁷ Global Market Outlook 2016

zamanlarda devreye alınmış olan FV kapasitesi 49 GW iken, sadece Çin’de 2016’da devreye alınan kapasite 35 GW değerine ulaşmıştır.

2016 verilerinde Hindistan ilk kez ve büyük bir pazar payıyla yer almaktadır. Yoksulluk ve coğrafi şartlar nedeniyle nüfusunun %20’den fazlasının elektrik erişimi olmayan ülke, FV sistemlerin tercih nedenleri için yeni bir örneği de göz önüne getirmektedir. Yeryüzünde her noktada elektrik üretimi sağlayabilen Geleneksel santrallere göre çok daha kısa sürede, önemli bir alt yapı yatırımı gerektirmeden ve ucuza mal edilebilen FV sistemler, nüfusun hızlı biçimde elektriğe kavuşmasını sağlayarak dezavantajlı bölgelerde refah artırıcı bir etki de göstermektedir.

Dünyada gerçekleştirilen FV kurulumların neredeyse tamamı, mevcut elektrik dağıtım şebekesi ile bağlantılı sistemlerden oluşmaktadır¹⁸ (PVPS, 2016). Şebekeye bağlı FV sistem kurulumlarında, uygulanabilirlik raporu için gereken geri ödeme süresi ve ekonomik analiz gibi değerlendirmeleri gerçekçi biçimde yapabilmek için yıllık enerji hasadının doğru ve güvenilir biçimde tahminlenmesi çok önemlidir. Bir FV sistemin hasadı,

- kullanılan FV modüllerin türüne ve dönüştürme verimine,
- kurulum noktasındaki ışınım değerlerine ve,
- eviricilerin dönüştürme verimlerine

bağlıdır.

FV eviricilerin verimini değerlendirmede kullanılan iki temel parametreden birisi olan MPP takip algoritmaları, günümüzde %99’un üzerinde takip verimi değerleri sağlamaktadır (Dupont, Rech ve Pinheiro 2012). Diğer yandan, kurulacak FV güç sistemlerinde ışınım ve FV modül özellikleri de kontrol edilemeyecek değişkenlerdir. Bu nedenle, hasat belirlemenin en önemli parametrelerinden birisi olarak FV eviricilerin dönüştürme performansı ön plana çıkar. FV modül çıkışındaki dc elektriğin ac şebekeye aktarılması için kullanılan eviricilerin dönüştürme verimleri üzerine yürütülen çalışmalarda elektriksel dönüştürme performansının yanı sıra, kurulumun yapıldığı coğrafi bölgedeki ışınım değişim profiline ve eviricinin empedans izleme özelliklerinin dikkate alındığı çeşitli

¹⁸ %99,6, PVPS – Trends in Photovoltaics 2016.

değerlendirme yöntemleri ile farklı ölçme ve hesaplama yöntemleri geliştirilmiş ve uluslararası standartlarda yerini almıştır.

Bu doktora tezinde, İzmir ışınım koşulları temel alınarak bir *ağırlıklı dönüşüm verimi modeli* geliştirilmiştir. İzmir iklim şartlarında elde edilecek FV evirici hasadının, yerel ışınım ve sıcaklık verileri ile değerlendirilmesine imkân veren bu model ($\eta_{İZMİR}$) ile yıllık hasat miktarları daha gerçekçi olarak hesaplanabilecektir. Verim ölçme modellerin adlandırılmasına ilişkin belirgin bir standart yoktur. Bu çalışma kapsamında değinilen öncül modeller, kolay anlaşılabilirlik açısından, verim simgesi olarak kullanılan η (ETA) ve yanında alt simge olarak model adının kısaltması şeklinde simgelenmiştir. Bu adlandırmalarda CEC, California Energy Commission için kullanılan kısaltmadır. EURO kısaltması ise, modelin sahibi Rolf Hotopp böyle adlandırmamış olsa da sonradan yaygın olarak orta Avrupa ışınım değeri için kullanılmaya başlanmıştır.

Tez kapsamında geliştirilen modeller ve iklim verisi istatistikleri için temel kaynak olarak, Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan ve kalite kontrol süreçleri tamamlanmış ölçme değerleri kullanılmıştır. Gereken durumlarda ve uygun doğruluklar sağlandığında, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü tarafından alınan ölçme sonuçlarından da yararlanılmıştır.

Tezin yazımında kullanılan dilin, TSE CLC/TS 61836 numaralı “*Fotovoltaik güneş elektriği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller*” standart metnine uygun olmasına dikkat edilmiştir (TSE CLC/TS 61836 2010). Verim değerlendirmeleri için de, EN 50530 numaralı “*Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Eviricilerin Toplam Verimliliği*” standardı temel alınmıştır (TS EN 50530 2010).

Tez metni içerisinde kullanılan ışınım ve ısıtım terimleri sırasıyla birim alan gelen elektromanyetik radyasyon *gücünü* (W/m^2) ve *enerjisini* (Wh/m^2) göstermektedir. Bu iki terimin birbiri ile olan sıkı ilişkisi nedeniyle FV dizelerden ve FV süreçlerden bahsedilirken geçişli olarak kullanılmaları yaygın bir uygulamadır. Işınım terimi dilimizde yaygın olarak *iyonlaştırıcı radyasyon* anlamında kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki kullanımın bu anlamda olmadığı dikkate alınmalıdır.

2. TANIMLAR VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kapalı bir sistemden alınan enerjinin sisteme giren enerjiye oranı olarak tanımlanan verim boyutsuz bir büyüklüktür, 0 ile 1 arasında değerler alır ve çoğunlukla % (yüzde) olarak verilir. Bir güç elektroniği sisteminde verim, sistem çıkışındaki elektriksel gücün, sistem girişine uygulanan elektriksel güce oranı olarak değerlendirilmektedir.

Güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren FV güç sistemlerinde verimin değerlendirilmesi yalnızca elektriksel dönüşüm üzerinden yapılmaz. Bunun bir dizi nedeni vardır:

1. FV sistemler elektrik üretmek amacıyla kullanıldıkları için, bu sistemlerin kurulu güçlerine göre değil, çıkışlarına bağlanan yüke sağladıkları elektrik enerjisine göre değerlendirilmesi gerekmektedir.¹⁹ Kaynaktan (güneş) gelen enerji değişken ve kesikli olduğu için, FV dize tarafından üretilerek evirici girişine uygulanan gerilim de değişken olmaktadır. Temelde bir elektronik güç şartlandırıcı olan FV eviricilerin elektriksel dönüşüm verimleri de, giriş gerilimine bağlıdır.
2. Hasadı yüksek tutmak için, eviricilerin giriş gücünde oluşan değişimleri takip ederek sürekli biçimde çıkış gücünü en yüksek değerde tutmalarını sağlayacak yöntem, sistem ve algoritmalar geliştirilmektedir. Maximum Power Point – En Yüksek Güç Noktası takibi, (MPPT) olarak adlandırılan bu teknoloji, eviricilerdeki dönüşüm verimine ek olarak, izleme hızına ve doğruluğuna bağlı başka bir verimlilik ölçütü daha ortaya koymaktadır.
3. Güneş ışınımında bölgesel ve coğrafi farklılıklar vardır. Rüzgâr kadar olmamakla birlikte, dönemsel sürprizler de gözlenebilmektedir. Bu nedenle evirici verim değerlendirmeleri sırasında, bölgesel ışınım değişim dinamiklerinin de dikkate alınmasını sağlamak gereklidir.

Evirici hasadını yani üretilen enerji miktarını (kWh) belirlemek için elektriksel dönüşüm verimi ile birlikte etkin biçimde göz önünde bulundurulması gereken MPPT algoritması ve ışınım değişim dinamikleri, FV eviricilerin ekonomik değerlendirilmelerinde kullanılmak için öncelikli bazı kriterler

¹⁹ Bir FV güç sisteminin enerji üretimi *hasat - yield* olarak adlandırılır.

geliştirilmesine ve ardından da bu değerlendirme yöntemlerinin standartlaşmasına yol açmıştır.

Bu yaklaşımla, FV eviricilerin elektronik dönüşüm verimlerinin yanı sıra, içinde kullanıldıkları sisteme ve sistemin kurulduğu coğrafi konumun iklim verilerine göre değişkenlik gösteren başarımlarının tespitinde kullanılacak hasat hesaplamaları için bu bölümde açıklanan parametreler belirlenmiştir.

2.1 Verim Hesaplama

Bir FV eviricinin verimi, önceki bölümde sıralanan nedenlere bağlı değişimlerin değerlendirmeye katıldığı karmaşık bir ölçme dizisi ile belirlenir. Eviricinin statik ve dinamik en yüksek güç noktası izleme işlevleri değerlendirildikten sonra, statik dönüştürme verimi de belirlenir. Bu iki ölçüm değerinden de FV eviricinin baştanbaşa (overall) verimi hesaplanır. Bu ölçmenin aşamaları 2.1.4'te açıklanmaktadır.

2.1.1 Dönüşüm Verimi ve Tepe Verim

Şebekeye bağlı FV eviricilerin pek çoğunda başlangıçta galvanik yalıtıma yönelik olarak, dc-dc dönüştürücü katında yüksek frekansta veya ac çıkış katında düşük frekansta çalıştırılan bir transformatör bulunmaktaydı (Kerekes et al., 2009). Evirici tasarımında galvanik yalıtımın tercih edilmesi, ağırlık ve maliyeti artırıp dönüştürme verimini düşürmektedir. Yalıtım transformatörü kullanılmayan ürünler hafif, ucuz ve % 1 - % 2,5 daha verimli olmaktadır (Haeberlin et al., 2006). Öte yandan, transformatörsüz eviriciler, FV modül kaçak kapasitesinden kaynaklanan bazı güvenlik sorunları yaratabilmektedir (Borup et al., 2007). Günümüzde yüksek dönüşüm verimi, düşük maliyet, küçük boyut ve hafiflik avantajları nedeniyle transformatörsüz evirici topolojilerine ilgi artmaktadır (Islam et al., 2015).

Eviricilerde dönüşüm verimi, evirici çıkışından elde edilen ac elektriksel gücün, evirici girişine uygulanan dc elektriksel güce oranı olarak tanımlıdır ve boyutsuzdur.

Eşitlik 1

$$\eta_{conv} = \frac{\int_0^{T_M} p_{ac}(t). dt}{\int_0^{T_M} p_{dc}(t). dt}$$

Bu eşitlikte;

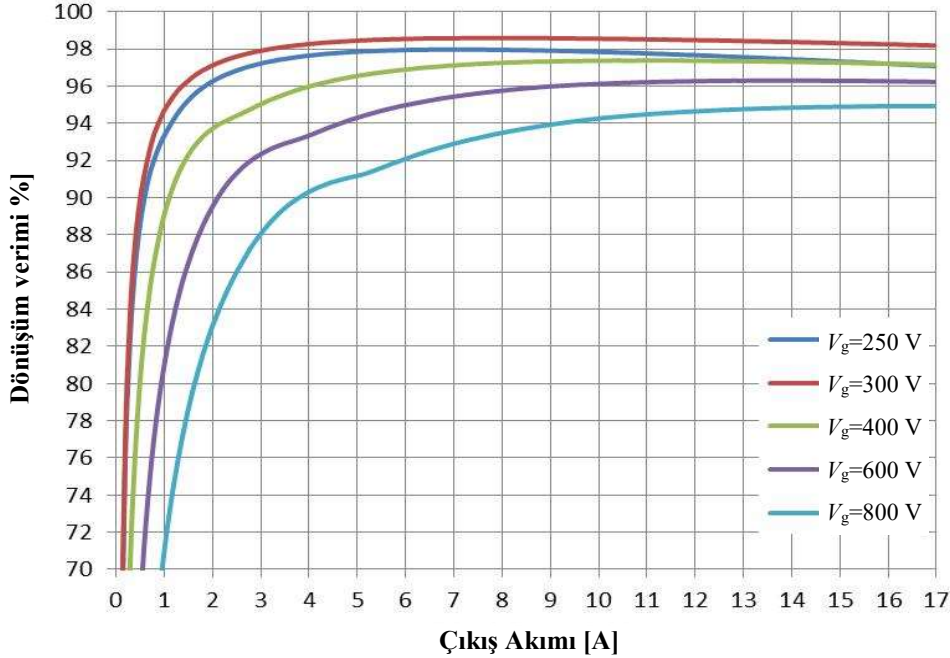
T_M ölçüm periyodunu,

$p_{AC}(t) \cdot dt$ eviricinin ac çıkışından verdiği gücün anlık değerini,

$p_{DC}(t) \cdot dt$ eviricinin dc girişinden çektiği gücün anlık değerini ifade etmektedir.

Bu eşitlik ile bulunan değer tümüyle eviricinin topolojisine, tasarım teknolojisine ve kullanılan bileşenlerin özelliklerine bağlı olan *elektronik dönüşüm verimidir* ve laboratuvar koşullarında aynı cihaz için aynı işletim şartlarında her zaman sabittir.

Öte yandan eviriciler, enerji sağlayan güç şartlandırıcı elektronik cihazlardır ve dönüşüm verimleri, çalışma aralıkları içinde giriş gerilimine ve çıkış gücüne (akımına) göre değişkenlik gösterir. Şekil 2.1’de orta güçlü tek fazlı bir eviricinin farklı giriş gerilimleri için çıkış gücüne bağlı olarak dönüşüm verimindeki değişimler gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Tipik bir şebeke bağlantılı FV eviricide dönüştürme verimi ile giriş gerilimi ve çıkış akımındaki ilişki

Evirici üreticileri doğal olarak, ürün verim değeri için bu grafikteki en yüksek değeri (bu örnekte %98,6) duyurmaktadır. Bu değere *tepe verim* değeri denilir ve

evirici kataloglarında *maksimum verim* olarak belirtilir. Şekil 2-1’de eviricinin optimum giriş geriliminin 300 V_{dc} olduğu görülmektedir. Bunun altındaki ve üstündeki gerilim değerlerinde dönüştürme verimi azalmaktadır. Oysa eviriciye dc güç sağlayan FV dizede farklı mevsimlerde, günün farklı saatlerinde ve farklı hava şartlarında, ışınım değerlerine bağlı olarak her zaman optimum gerilim değeri üretilemeyecektir.

Diğer yandan evirici dönüştürme veriminin ac çıkış gücü (P_{ac}) ile de değiştiği (Evirici çıkış gerilimi sabit olduğu için, çıkış akımı çıkış gücünü temsil eder, $P=V.I$) görülmektedir. Eviricilerde boşa çalışma kayıpları bütün çıkış güçleri için sabit olduğundan, genellikle düşük güçlerde dönüştürme verimi azalacaktır. Bu etkileşim, farklı evirici topoloji ve tasarımları için farklı biçimlerde gerçekleşebilir ama her zaman vardır. Yüksek çıkış güçlerinde de ısı kayıpları nedeniyle verimin azalacağı söylenebilir.

Görüldüğü gibi bir eviricinin en iyi çalışma şartlarında gösterdiği dönüştürme verimi, her ne kadar %90-95 gibi yüksek değerlerde olsa da, gerçek çalışmasındaki verim değeri için tek belirleyici değildir. Bu nedenle tepe verim değerinden başka verim değerleri de tanımlanmıştır.

2.1.2 Ağırlıklı Verim

FV eviriciler gerçek kullanım şartlarında, bulutlu günlerdeki hızlı ve sık ışınım değişiklikleri gibi birçok değişkenden etkilenen bir giriş gerilimi dalgalanmasına maruz kalarak çalışır. Öte yandan, şebekeye bağlı olarak çalışan bir eviricinin verimi yalnızca giriş gücüne değil belirgin biçimde dc giriş geriliminin değerine de bağlıdır (Baumgartner et al., 2007). FV dizeden sağlanan dc giriş gerilimi, büyük oranda sistemin kurulu olduğu konumdaki güneş ışınımı ve ortam sıcaklığı değerlerine bağlıdır.

Yerel iklim şartlarının FV evirici verimine etkisini değerlendirmek için, *ağırlıklı verim* olarak adlandırılan ve sistemin kurulacağı coğrafi bölgenin güneş ışınımı değişim dinamiklerine bağlı olarak ortaya çıkan ve en yüksek güç noktası (MPP) sapmalarının evirici dönüşüm verimi üzerine etkisini belirlemeyi amaçlayan verim belirleme modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller belirlenirken, eviriciye uygulanacak dc giriş gücü değerinin sürekli sabit olmayıp, yıllık güneş ışınımı dağılımına bağlı olarak farklı sürelerde oluşan farklı giriş gücü grupları üzerinden ayrı ayrı verim hesaplanmaktadır. Böylelikle daha gerçekçi bir hasat tahmin

yapabilen ve genellikle anma gücündeki tepe verim değerinden daha düşük bir ağırlıklı verim değeri elde edilmektedir.

2.1.2.1 η_{EURO}

1990 yılında bir Alman teknoloji dergisinde Rolf Hotopp, FV eviricilerin değerlendirilmesinde kullanılacak bir *ağırlıklı dönüşüm verimi* modeli yayınlanmıştır. Yıllık enerji hasadı için eviricinin maksimum veriminden daha iyi tahminleme yapacak bir yöntem olarak öne sürülen bu ağırlıklı dönüşüm formülü (Hotopp 1991), ekonomik değerlendirmede doğruluğu artırdığı için ilgiyle karşılanmıştır. Bu verim hesaplama modeli ETA EURO (η_{EURO}) olarak adlandırılıp eviricilerin “gerçek” verimini bulmak için bütün eviricilerin verim değerlendirilmelerinde kullanılmak üzere önerilmiştir (Nickel 2004). Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu verim modeli, eviricinin toplam çalışma süresi boyunca altı ayrı güneş ışınımı aralığının rastlanma süreleri oranında ağırlık katsayıları kullanan bir hesaplamayı içermektedir.

Eşitlik 2

$$\eta_{EURO} = 0,03\eta_{\%5} + 0,06\eta_{\%10} + 0,13\eta_{\%20} + 0,1\eta_{\%30} + 0,48\eta_{\%50} + 0,2\eta_{\%100}$$

Avrupa verimi olarak bilinen Eşitlik 2’deki ağırlık çarpanları, Almanya Trier’deki bir yıllık saatlik ortalama güneş ışınımı ölçüm verileri temel alınarak hesaplanmıştır (Hotopp, 1990).

2.1.2.2 η_{CEC}

Almanya ışınım dinamiklerini temel alan önceki modelin katsayıları, daha farklı bir ışınım profili sergileyen Kaliforniya’da kurulu olan bir FV sistem için doğru hasat tahmini yapmakta yetersiz kalmaktadır. Tipik bir Kaliforniya meteorolojik yılı için doğru tahminlemeler yapabilmek amacıyla Kaliforniya Enerji Komisyonu²⁰ tarafından diğer bir ağırlıklı verim modeli geliştirilmiştir (Bower et al., 2004). Bu modeldeki ağırlık katsayıları, Sacramento bölgesindeki güneş ışınımı verileri temel alınarak belirlenmiştir.

²⁰ CEC – California Energy Commission

$$\eta_{CEC} = 0,04\eta_{\%10} + 0,05\eta_{\%20} + 0,12\eta_{\%30} + 0,21\eta_{\%50} + 0,53\eta_{\%75} + 0,05\eta_{\%100}$$

Eşitlik 3'te görülen ve η_{CEC} olarak adlandırılan modelde, η_{EURO} modelindeki düşük ışınım aralığına yapılan vurgu azaltılıp yüksek ışınım aralığının etkisi artırılmıştır. Bununla birlikte, öncekine benzeyen bir hesaplama yöntemi ve yine aynı sayıda terim kullanılmıştır.

2.1.2.3 Diğer modeller

η_{EURO} ve η_{CEC} modellerindeki yaklaşım kullanılarak diğer bazı bölgeler için benzer ağırlıklı verim modelleri de geliştirilmiştir. Ongun ve Özdemir (2012) İzmir, Türkiye dakikalık iklim verilerini temel alan ve ışınım değerlerine bağlı olarak verim değerlendirmesi yapan $\eta_{İZMİR}$ modeli seçeneklerini değerlendirmişlerdir. Yine benzer bir çalışma, Brezilya'nın Indaial, Florianapolis ve Itajai bölgeleri için yapılarak η_{IDL} , η_{FNS} ve η_{IAJ} , modelleri geliştirilmiştir (Kellermann, Reiter ve Péres 2015). Bu modeller değerlendirmelerinde ışınım sınıflarını referans almışlardır.

2.1.3 Takip Verimi

Bir eviricinin MPP izleme performansı FV sistemlerde hasadı etkileyen diğer bir parametredir. Bu nedenle, hasat tahmini için kullanılacak verim değerinin hesaplanmasında eviricinin en yüksek güç takip (MPPT) verimi de etkin olarak bulunmalıdır. MPP takip verimi, eviricinin FV üreteç *IV* karakteristik eğrisindeki en yüksek güç noktasını yakalama doğruluğunun göstergesidir. η_{MPPT} , evirici tarafından çekilen gücün, evirici girişine en yüksek güç noktasında (MPP) sağlanan güce oranıdır ve boyutsuzdur.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int_0^{T_M} p_{dc}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt}$$

Bu eşitlikte;

T_M ölçüm periyodunu,

$p_{DC}(t) \cdot dt$ eviricinin çektiği gücün anlık değerini,

$p_{MPP}(t) \cdot dt$ FV simülatörün sağladığı MPP gücün anlık değerini ifade etmektedir.

Evirici hasadının belirlenmesinde önemli bir rol oynayan MPP takip verimi değerlendirilirken, takip performansının değişimlere tepkisi de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle MPP takip performansı, statik ve dinamik verim olarak ayrı ayrı ölçülmektedir. Her iki oranın belirlenmesinde, evirici girişindeki anlık örneklenmiş akım ve gerilim değerleri kullanılır.

Statik MPPT verimi eviricinin, FV üretcin durgun karakteristik eğrisinin en yüksek güç noktasında kalma doğruluğunu tanımlar ve,

Eşitlik 5

$$\eta_{MPPTstat} = \frac{1}{P_{MPPT,FVS} \cdot T_M} \sum_i V_{dc,i} \cdot I_{dc,i} \cdot \Delta T$$

ölçme yöntemi ile belirlenir. Burada;

$V_{dc,i}$ örneklenmiş evirici giriş gerilimi,

$I_{dc,i}$ örneklenmiş evirici giriş akımı,

T_M toplam ölçme süresi,

ΔT ardışık örneklemeler arasındaki süredir.

Bu ölçme yapılırken bütün akım ve gerilim örneklemeleri eşzamanlı olarak gerçekleştirilmelidir.

Dinamik MPPT verimi eviricinin, ışınım değişimine bağlı olarak FV üretç çıkışında görülen IV karakteristiklerindeki yeni en yüksek güç noktalarını bulma doğruluğunu tanımlar ve,

Eşitlik 6

$$\eta_{MPPTdyn} = \frac{1}{P_{MPPT,FVS,j} \cdot T_j} \sum_i V_{dc,i} \cdot I_{dc,i} \cdot \Delta T_i$$

ölçme yöntemi ile belirlenir. Burada;

ΔT_j P_{MPP,FVS_j} gücünün (FV üreteç tarafından) sağlandığı süre,

ΔT_i $V_{dc,i}$ ve $I_{dc,i}$ değerlerinin örneklendiği süredir.

2.1.4 Baştanbaşa Verim

Bir eviricinin baştanbaşa (*overall* veya *total*) verimi, eviricinin çıkışından verdiği ac gücün, evirici girişine FV üreteç (veya ölçmeler sırasında FV simülasyon) tarafından en yüksek güç noktasında sağlanan güce oranı olarak tanımlıdır ve boyutsuzdur.

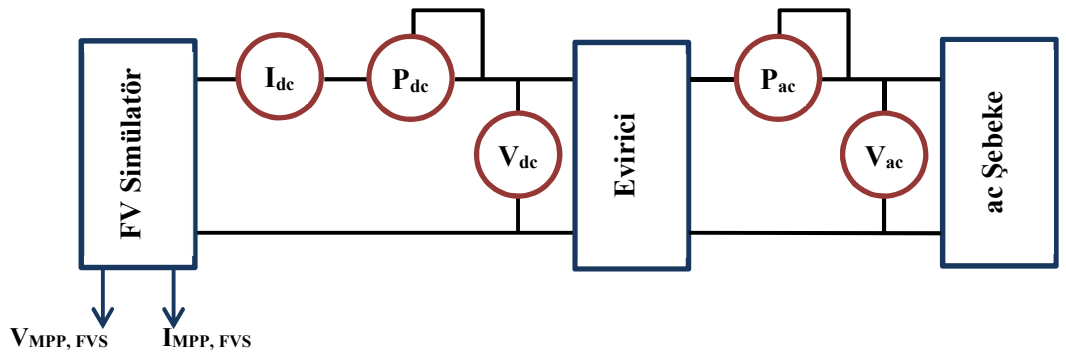
Eşitlik 7

$$\eta_t = \frac{\int_0^{T_M} p_{ac}(t) \cdot dt}{\int_0^{T_M} p_{MPP}(t) \cdot dt} = \eta_{conv} \cdot \eta_{MPPT}$$

Baştanbaşa verim, eviricinin dc-ac dönüştürme verimi ile statik MPP takip veriminin çarpımı olarak tanımlanmıştır (Haeberlin, Borgna, ve diğerleri 2005). Baştanbaşa verim eviricinin elektronik dönüşüm başarımından başka, girişteki akım ve gerilim değişimlerini de takip edebilmesinin bir ölçüsüdür ve verim ölçme standardı olarak benimsenmiştir (TS EN 50530 2010).

2.1.5 Verim Ölçme

Eviricilerin verimlerini ölçmek için endüstri standardı olarak IEC 50530 belgesi yürürlüktedir. TSE tarafından TS EN 50530 olarak benimsenen bu standart belgesinde, tek fazda verim ölçmesi için TS EN 50530 içinde verilen test devresi Şekil 2.2'de görülmektedir.

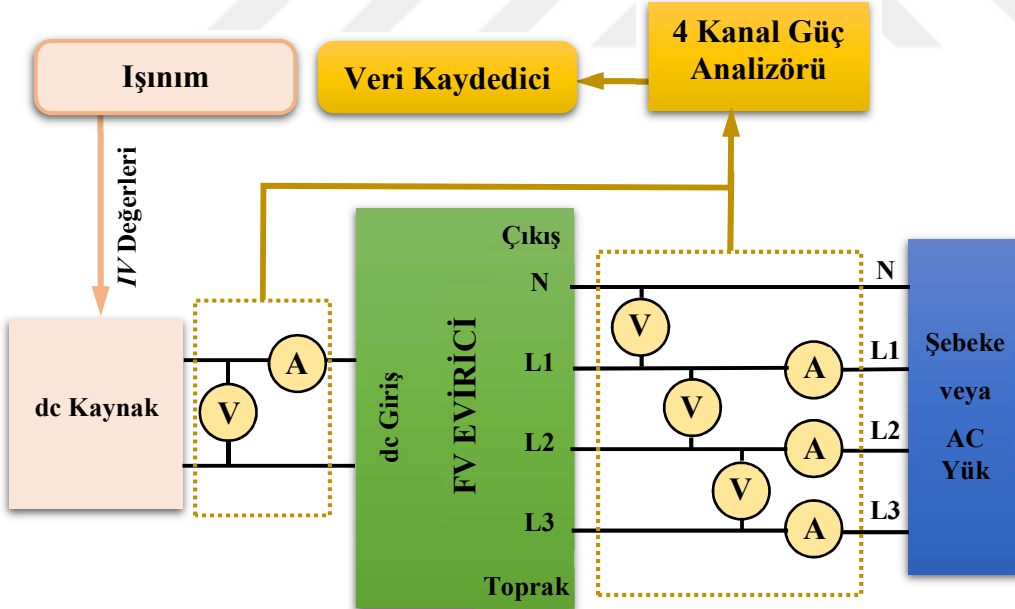


Şekil 2.2 Evirici verim ölçmesi için deney devresi (Kaynak: TS EN 50530)

Burada kullanılan FV simülâtörün (ölçmede FV üretici taklit eden dc güç kaynağı) ve ölçme aletlerinin teknik özellikleri aynı standartta ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Simülâtörün sağladığı MPP gücü bileşenleri V_{MPP} ve I_{MPP} , simülâtör tarafında ölçülüp kaydedilmelidir.

Standartta verilen Şekil 2.2'deki ölçme devresi, kullanılacak test sistemi için temel prensibi göstermektedir. Gerçekte bu ölçmenin yapılması, çok kısa zaman aralıklarında çok sayıda örnekleme değerinin alınmasını, ölçmede kullanılan FV simülâtörün akım – gerilim bileşenlerinin ölçüm adımlarına göre sürekli olarak denetimini ve ölçüm sonuçlarından gerekli verim değerlerinin hesaplanmasını içeren otomatikleştirilmiş bir süreci gerektirmektedir.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'te üç fazlı bir evirici için, TS EN 50530 standart metninde tarif edilen yapıda bir örnek ölçüm sistemi verilmiştir. Bu test düzeneğinde, FV simülâtörün (dc kaynak) gerilimi, ölçmenin amacına göre önceden belirlenmiş IV eğrilerine uygun biçimde değiştirilerek eviricinin dc giriş gücü oluşturulmaktadır. FV simülâtörün kontrolü için gereken IV eğrileri, kullanılan kaynağın varsa kendi özgün yazılımı ile veya örneğin MATLAB gibi bir yazılımla üretilebilir.



Şekil 2-3 3 fazlı şebeke bağlantılı bir evirici için TS EN 50530 uyarınca verim değerlendirmelerini yapmak üzere kullanılacak test düzeneği

Eviricinin giriş ve çıkış güçleri güvenilir bir güç analizörü ile izlenip yine bilgisayar üzerinde 100 – 250 ms gibi yüksek bir örnekleme hızı ile kayıt altına alınmalıdır. Veri kayıt işlemi kullanılan güç analizörünün kendi yazılımı ile veya

LabVIEW gibi bir yazılımla gerçekleştirilebilir. Eviricinin gücüne uygun bir yük yoksa – ki özellikle yüksek güçlerde bu önemli bir sıkıntı yaratır – elektrik dağıtım şebekesi yük olarak kullanılabilir.

Bu tür örnek bir ölçme düzeneğinde, 3 fazlı RefuSOL eviricinin verim değerlendirmeleri, Magna Power Electronics 1 000 V/45 A güç kaynağı, Yokogawa WT3000 güç analizörü, yük olarak bağlı 400 V/50 Hz şebeke kullanılmış ve LabView 200 ms örnekleme hızı ile kullanılarak sonuçlar kaydedilmiştir (Valentini et al., 2008).

2.2 Mevcut Ağırlıklı Verim Modelleri

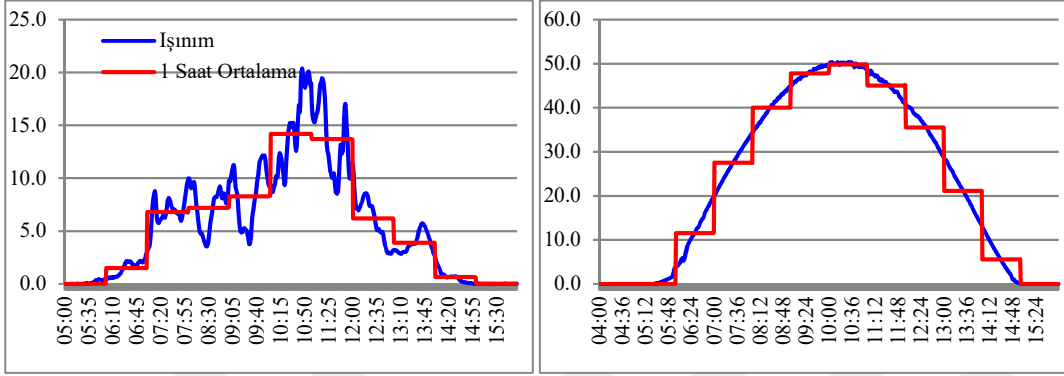
1990’da Hotopp’un önerisi ile başlayan ve 2004’te CEC tarafından aynı temel yaklaşımla üretilen başka bir modelle güncelleştirilen *ağırlıklı verim* hesaplaması yaklaşımı, evirici hasadının daha doğru hesaplanması açısından son derece faydalıdır. Bununla birlikte, mevcut iki modelin de belirlenmiş aksaklıkları bulunmaktadır.

2.2.1 η_{EURO} Aksaklıkları

49. kuzey enleminde yer alan Trier, Avrupa’nın genel iklimini temsil etmediği halde buranın ışınım değerleri üzerine kurulmuş olan modelin günümüzde neden yaygın biçimde “Avrupa verimi – η_{EURO} ” olarak adlandırıldığı açık değildir. Hotopp, kendi önerdiği ağırlıklı verim hesaplama modelini esasen Avrupa verimi olarak adlandırmamıştır. Ancak modelle ilgili tek ve en önemli mesele iklim temsiliyle ilgili değildir.

η_{EURO} ’nun üzerine kurulduğu veri seti, ışınım gücünün saatlik ortalamalarından oluşmaktadır. Geniş bir zaman aralığı için alınan ortalamaların kullanılmış olması nedeniyle, güneşlenme saatleri içindeki yüksek ve düşük ışınım değerlerinin etkileri bu yaklaşımda görünmez hale gelmekte ve dolayısı ile ihmal edilmiş olmaktadır. Saatlik ortalama sözgelimi, parçalı bulutlu günlerde, hava açıkken ölçülen örneğin 200 W/m^2 ışınım ile bulutlu anlardaki 100 W/m^2 ışınımın ortalaması alınmaktadır.

Bu yaklaşımın etkisi, İzmir’de yapılmış olan ölçmelerden iki örnek gün²¹ için Şekil 2.4’te gösterilmiştir. Açık gün için saatlik ortalamalar ışınım değişimini kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla gösterebilirken, bulutlu gün için ışınım değerlerinin temsilinde hatanın arttığı açıkça görülmektedir.



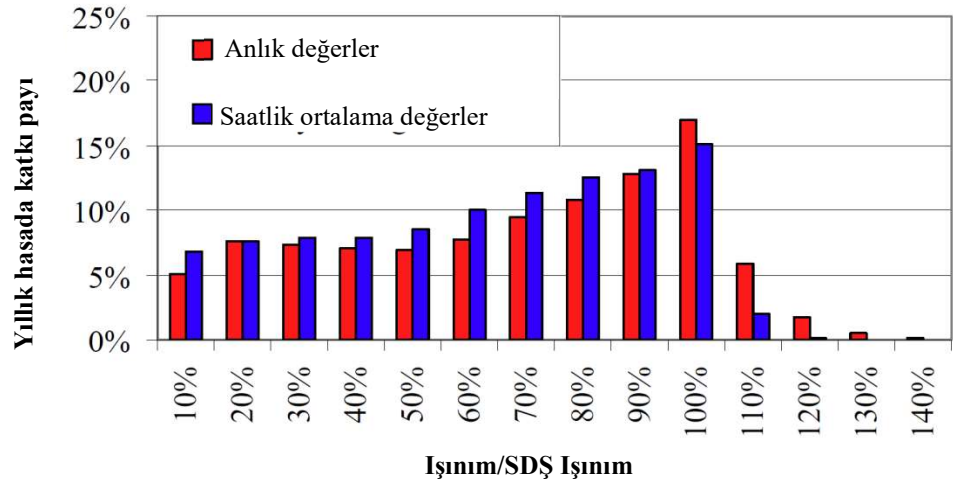
Şekil 2.4 Bulutlu ve güneşli günlerde anlık değerlerle saatlik ortalamaların karşılaştırılması

Saatlik ortalama verilerin kullanılmasının, düşük ışınım bölgesinin yıllık enerji üretimi içindeki katkısının olduğundan fazla görünmesine yol açtığı ve hatta parçalı bulutlu günlerdeki üretimin, modül sıcaklığının düşük kalması nedeniyle açık günlerdekinden bile fazla olabileceği gösterilmiştir (Ransome ve Funtan 2005).

Işınım değer aralıklarının yıllık toplam enerji üretime katkıları incelenirken saatlik ortalama veri kullanılırsa, yüksek ışınım değerlerinde sağlanan katkı olduğundan daha az görünmektedir. Saniye çözünürlükte veri kullanılması durumunda yüksek ışınım değerlerindeki üretimin hasada katkısı doğru olarak belirlenebilir. Bu etki, 2000 yılında Freiburg Almanya’da güney bakılı 30° eğimli modüllerle kurulu sistemde kaydedilen değerlerle gösterilmiştir (Burger et al., 2009).

Şekil 2.5’te yıllık hasat içinde saatlik ve saniyelik verilerle yapılan pay dağılımları gösterilmiştir. Ortalama değerlerle yapılan değerlendirmede orta ve düşük ışınım değerlerinde yapılan katkı gerçekte olduğundan daha fazla görünmektedir. Yüksek çözünürlüklü ışınım verisi ile yapılan değerlendirmede, yüksek ışınım şiddetlerinde yapılan üretimin yıllık hasada katkısının esasen daha yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır.

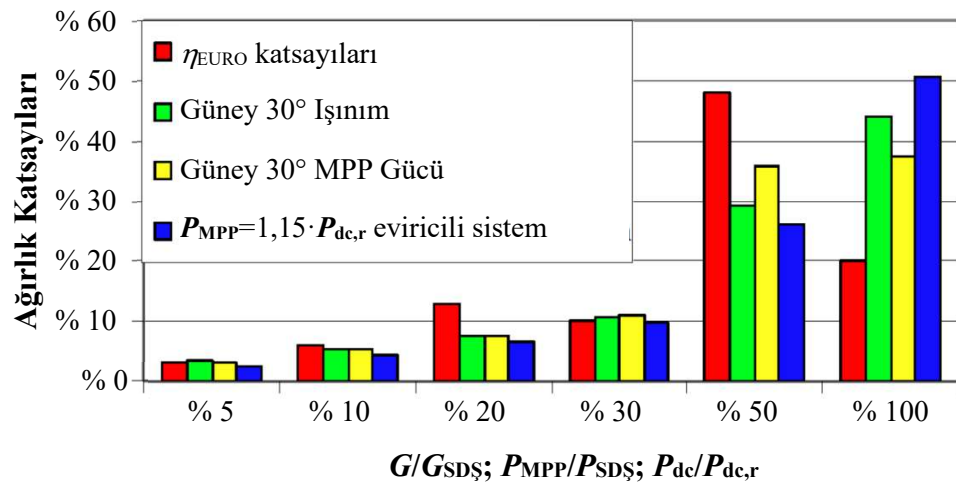
²¹ DMİ Menemen ölçümleri (dakika): Bulutlu gün 3 Ocak 2009, güneşli gün 1 Ocak 2009.



Şekil 2.5 SDŞ Işınımın (1000 W/m^2) katları olarak farklı ışınım şiddetlerinde yıllık üretime verilen katkı miktarları

Hotopp'un modelinde ayrıca, modüllerin ısınmasıyla azalan dize başarımı ve FV modül yönelim ve eğim açıları da göz ardı edilmiştir. Söz konusu parametrelerin etkisi Şekil 2.6'da görülmektedir (Burger et al., 2009).

Şekil 2.6'da Freiburg Almanya konumu için, Hotopp ağırlık katsayıları tahminlemesi, en uygun eğimli (Freiburg için 30°) yüzeye gelen ışınım, bu düzleme yerleştirilmiş FV üreticinin MPP gücü ve 1,15 boyutlandırma çarpanı²² ile büyütülmüş FV üreticinin gücü görülmektedir. Hotopp katsayılarının % 100 ışınım seviyesi için, çok ciddi bir hatayla, düşük üretim gösterdiği, % 20 ve % 50 ışınım



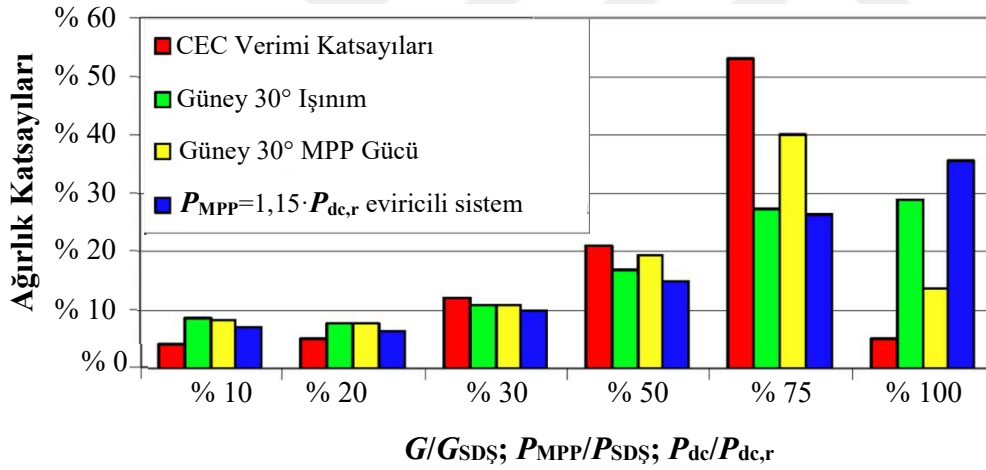
Şekil 2.6 Hotopp (η_{EURO}), güney bakılı 30° eğimli yüzeyde anlık ışınım değerleri, aynı düzlemdeki dizinin MPP gücü, % 15 büyütülmüş dizinin gücü

²² Boyutlandırma çarpanı (sizing factor) konusundan değerlendirme kısmında bahsedilecektir.

seviyeleri için ise gerçekte olduğundan daha fazla üretime ulaştığı açıkça görülmektedir. FV modüllerde sıcaklık etkisi ile oluşan verim kaybından kaynaklanan üretim düşüşü de grafikte görülmektedir. Işınım ile gelen enerji % 50 aralığından % 100 aralığına geçişte artmasına karşın, dizeden elde edilen MPP gücü artmamıştır.

2.2.2 η_{CEC} Aksaklıkları

CEC ağırlıklı verim katsayıları, Sacramento *Tipik Meteorolojik Yıl (TMY)* ışınımına göre belirlenmiştir. Değişen enlem nedeniyle artan güneşlenme süreleri ve ışınım değerleri dikkate alınarak yeni katsayılar belirlenmiştir. Ancak, Şekil 2.7'de ışınım şiddeti aralıklarına göre hasat dağılımı görülen CEC ağırlıklandırma modeli de, *uzun aralıklı* ortalamalar alınarak elde edildiği için, kısa süreli ışınım değişimlerinin etkisi yine ihmal edilmiş olmaktadır. Bununla birlikte % 75 ışınımına da bir katsayı tanımlanarak Hotopp modeline göre belirgin bir avantaj sağlamıştır.



Şekil 2.7 CEC ağırlıklandırma modeli ile anlık değerlerin karşılaştırılması

Sacramento'da ışınım şiddeti Orta Avrupa'dan % 40 daha fazla olmasına karşın, % 100 ışınımında düşük, % 75 ışınımında ise yüksek tahminleme yapılmış olması, daha önce açıklandığı gibi, anlık değil ortalama değerlerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

CEC ağırlıklı verim modeli, temel yaklaşım olarak Hotopp modelini takip ettiği için, hasat değerlendirmesi için ışınım değerlerini temel almaktadır. Oysa eviricilerin çıkış güçleri ışınım değerine değil, FV dizeden alınan dc elektrik gücüne bağlıdır. FV dizelerin başarımı da modül sıcaklığı ile belirgin biçimde değiştiği için, bu modelde de gerçek değerlerden sapma görülmektedir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada, önceki modellerde açıklanan sapmaları gidermek için, yerel ışınım değerlerinin kullanıldığı ve ağırlıklandırma aralıklarının yeniden belirlendiği, daha sağlıklı bir hasat belirlemeye yönelik yeni bir ağırlıklı ortalama modeli araştırılmaktadır. Burada, önceki çalışmalarda önerildiği gibi, daha yüksek çözünürlüklü verilerle çalışılması benimsenmiştir.

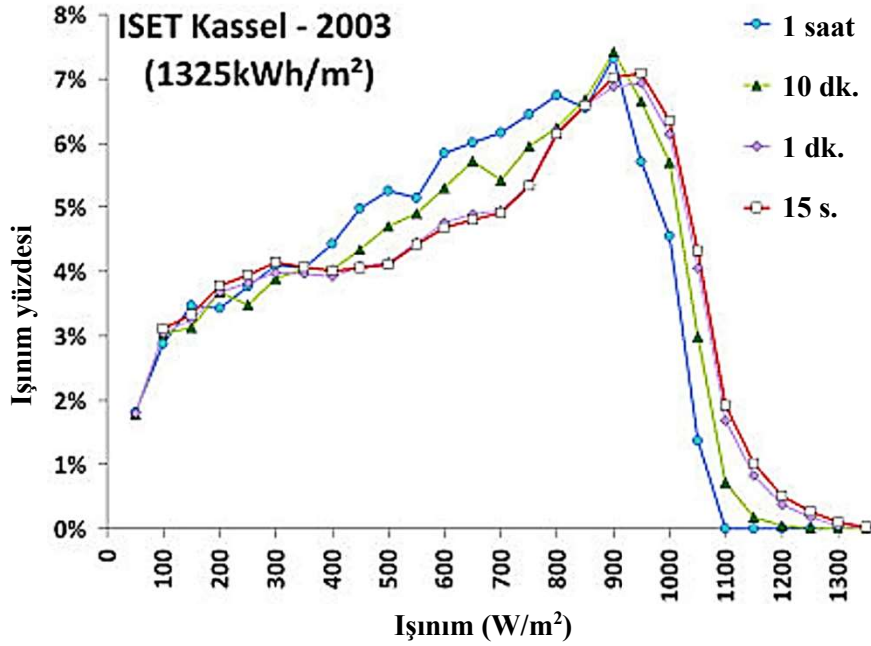
Ağırlıklı verim modelinde kullanılacak katsayıların belirlenmesi için bir takım ortam değişkenlerinin düzenli biçimde kaydedilmiş olması gereklidir. Bu değişkenler, *FV modül sıcaklığı* ($T_{modül}$) ve *modül yüzeyine gelen ışınım* değerleridir. Ancak Türkiye’de, ayrı istatistik ve matematik işlemler uygulamadan bu araştırmaya doğrudan destek olacak nitelikte ölçümlerin kaydedildiği bir kaynak bulunamamıştır.

Türkiye özelinde elde edilebilen en yüksek çözünürlüklü ışınım verisi, yatay düzleme gelen ışınım ve ortam sıcaklığı verilerinin bir dakikalık ortalamaların kaydedildiği MGM – Meteoroloji Genel Müdürlüğü verileridir. 2009 – 2012 yılları arasında kaydedilmiş Menemen OMGİ²³ ışınım verileri bu çalışmaya temel oluşturmaktadır. MGM verileri yatay düzleme gelen ışınım değerlerini içerdiği için öncelikle bu veri seti işlenerek İzmir için optimum eğim açısı olan 33° için yıllık ışınım veri seti hesaplanmıştır.

Hasat tahmini için gereken diğer bir gereksinim, modül sıcaklığı verileridir. Bu çalışmanın başladığı tarihte Türkiye’de ışınım ile birlikte kaydedilmiş istenen nitelikte bir modül sıcaklığı verisi bulunmamaktadır. Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Entitüsünde (EÜGEE) kurulu olan FV güç sisteminde kaydedilen modül sıcaklığı verileri ise daha düşük çözünürlüklü (5 dakikalık ortalamalar) biçimde kaydedilmiş durumdadır. Bu sıcaklık verisi hasat tahmininde kullanılması tercih edilmeyecek nitelikte olsa da, ışınım ve ortam sıcaklığı verileri ile birlikte ve eşzamanlı ve uzun süreli (5 yıl) olarak kaydedildiği için değerli başka bir bilgiyi – modül sıcaklığı ile ışınım ve ortam sıcaklığı arasındaki ilişkiyi – içermektedir. Modül sıcaklığının değişimi ışınım değişimine oranla oldukça yavaş bir süreç olduğundan, bu veri setinin düşük çözünürlüklü olması, içerdiği ilişki açısından güvenilirliğini ve hassasiyetini azaltmayacaktır.

²³ Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu

Hasat tahmini için kullanılacak verilerin kayıt sıklığı konusunda yapılan çalışmalarda, beş dakika ve altındaki sıklıkların tahminlemede gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yapılan istatistik çalışmaların ve tahminlemelerin doğruluğu adına saniye çözünürlükteki ışınım verileri tercih edilmekle birlikte, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, 5 dakikanın altındaki çözünürlüklerdeki veriler de kabul edilebilir bir doğruluk sağlamaktadır (Ransome 2009).

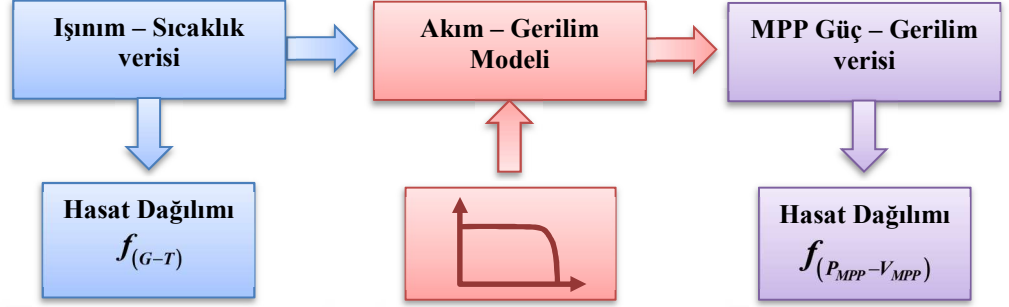


Şekil 3.1 Değişik ortalama süreli ışınım ölçümleri arasındaki farklar

EÜGEE veri seti üzerinden, İzmir şartlarında çalışan bir fotovoltaik güç sisteminde güneş ışınımı ile modül sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren bir matematik model elde edilip, bu model yüksek çözünürlüklü MGM ışınım verisinde çalıştırılarak yapay bir eşzamanlı modül sıcaklığı veri seti elde edilerek hasat hesabı için kullanılmıştır.

Yıllık yüksek çözünürlüklü ışınım – modül sıcaklığı verisi üzerinden hasat değerleri hesaplandıktan sonra, ışınım değerleri yıl içinde rastlanma sıklıklarına göre alt gruplara ayrılıp, her ışınım sınıfındaki yıllık toplam hasat değerleri üzerinden bir ağırlıklandırma değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu doktora çalışmasının temel alt yapısını oluşturan yerel ölçekli *hasat dağılımı belirleme* işlemleri için takip edilen metodoloji, Şekil 3.2’de görülmektedir. Türkiye coğrafyasını temsilen İzmir bölgesi meteorolojik ölçümleri temel alınarak gerçekleştirilen bu değerlendirme, iklim verilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesini ve buna ilişkin enerji üretiminin belirlenmesini temel almaktadır.



Şekil 3.2 Hasat dağılımı belirleme işlem akışı

Hasat dağılımı önce ışınımın sonra da FV üreticinin en yüksek güç noktasındaki üretim değerlerinin fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Böylelikle modül yüzeyine gelen ve evirici tarafından işlenen enerji değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. Son aşama olarak, elde edilen ışınım ve MPP bazlı hasat dağılımı verileri değerlendirilerek, İzmir iklim şartlarında çalıştırılan bir FV eviricinin toplam verimliliğinin belirlenmesinde kullanılacak bir ağırlıklı verim hesaplama modeli geliştirilmiştir.



4. VERİ DÜZENLEME

Bu bölümde, Yöntem bölümünde söz edilen verilerin işlenmesine ve gerekli hesaplara ilişkin açıklamalar yer almaktadır. Veri düzenleme sürecinde ele alınan MGM dosyalarında her yıl için 525 600 satır ve EÜGEE dosyasında ise 105 120 satır veri bulunmaktadır. Her iki veri seti de öncelikle boş veri satırlarını belirlemek ve veri bütünlüğünü denetlenmek üzere yazılımsal ve istatistiksel süreçlerle kontrol edilmiş, içeriği etkilemeden gerekli biçimsel düzenlemeler yapılmıştır.

FV sistemlerde yıllık hasat tahminlemeleri için *modül yüzeyine gelen ışınımın* ve *modül sıcaklığının* bilinmesi gerekir. Menemen OMGİ verileri her iki veriyi de doğrudan sağlamamaktadır. Bu nedenle Menemen OMGİ verileri işlenerek öncelikle Gözlem istasyonu ölçmelerindeki yatay düzleme gelen ışınım değerleri, FV modül en iyi eğim açısına dönüştürülmüştür. Daha sonra EÜGEE verilerinden, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı ve ışınım değeri arasındaki ilişki incelenerek, modül sıcaklığını ortam sıcaklığı ve ışınımına bağlı olarak belirleyecek matematik model elde edilmiş ve bu model Menemen OMGİ verilerinde çalıştırılarak yüksek çözünürlüklü modül sıcaklığı verisi türetilmiştir.

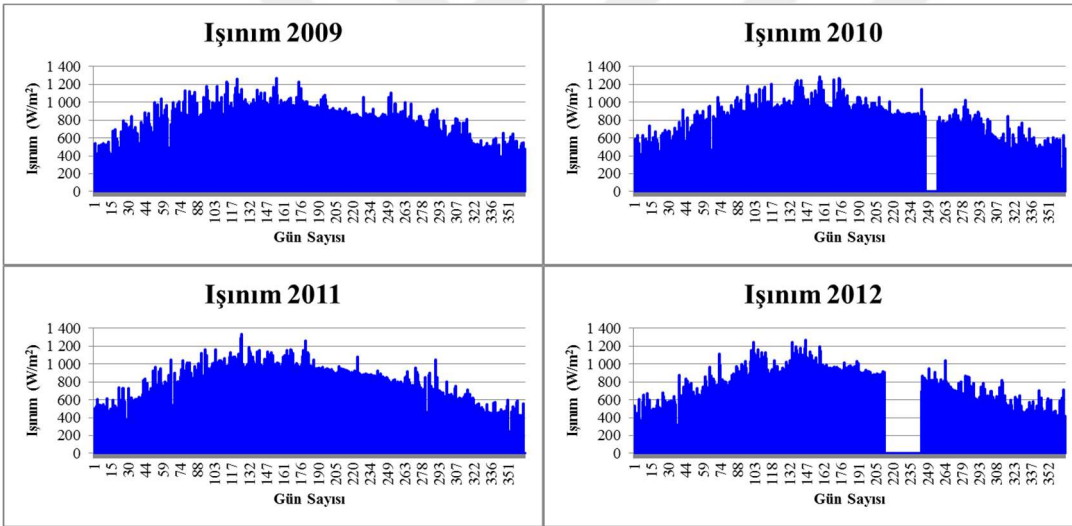
4.1 Eğimli Yüze Gelen Işınımın Belirlenmesi

Meteoroloji Genel Müdürlüğü Menemen OMGİ veri setinin nitelikleri ve veri seti üzerinde yapılan düzenlemeler, bu bölümde açıklanmıştır. Meteorolojik gözlem istasyonlarındaki genel uygulama, güneş ışınımının yatay düzlemde kaydedilmesidir. Oysa FV hasat tahmini için modül yüzeyine gelen ışınım gücünün bilinmesi gerekir. Bu nedenle, öncelikli olarak yatay düzleme gelen ışınımın en uygun açıya göre yeniden belirlenmesi için önceden yapılmış çalışmalar incelenmiş ve İzmir bölgesi için gereken hesaplama işlemleri elde edilmiştir. Elde edilen bu işlemler daha sonra MGM Menemen OMGİ verileri üzerinde çalıştırılarak, MGM tarafından sağlanan ham veriler, bu çalışmada kullanılacak niteliklere getirilmiştir.

İzmir bölgesi ülkenin güney bölgelerinden daha az ve kuzey bölgelerinden daha çok güneş ışınımı almakla birlikte, coğrafi olarak Türkiye'nin orta paralelinde olduğu için, tüm ülkeyi uygun bir yakınlıkta temsil edebilecek bir konumda bulunmaktadır. Bu nedenle İzmir Bölgesinde elde edilmiş uygun ve güvenilir bir veri seti araştırılmıştır. Bu veri setinin, elde edilecek modelin sağlamlığı için yüksek çözünürlükte ışınım ve sıcaklık verisini içermesi gerekmektedir. Türkiye'de

düzenli olarak 1 saniye çözünürlükte veri kaydı yapan kurum bulunmamaktadır ama 1 dakika sıklıkla kayıt yapılmış olan MGM verilerine ulaşılabilmektedir. Bir dakikalık veri kayıt sıklığı, hasat hesabı için yeterli hassasiyet sağlamaktadır.

Bu çalışmada 38,6237 K, 27,0433 D konumundaki Meteoroloji Genel Müdürlüğü 17789 Numaralı Menemen otomatik meteoroloji gözlem istasyonunda (OMGİ) 2009, 2010, 2011 ve 2012 yıllarında kaydedilmiş bir dakika çözünürlükteki *yatay düzleme gelen toplam ışınım ve gölgede ortam sıcaklığı* verileri dikkate alınmıştır. Bu ölçümlerin yıllık ışınım profilleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. 2010 ve 2012 ölçmelerinde veri setinde kısmi kesintiler söz konusudur. 2009 ve 2011 veri setlerinde gözlenebilir bir kesinti olmadığı için istatistiki temsil değerleri daha iyidir. Bu tez kapsamında referans veri seti olarak sürekliliği uygun bulunan 2009 ve 2011 ölçümleri arasından, daha güncel olması bakımından 2011 yılında kaydedilmiş olan ölçümler kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Menemen OMGİ 2009-2012 yılları arasındaki ışınım profilleri

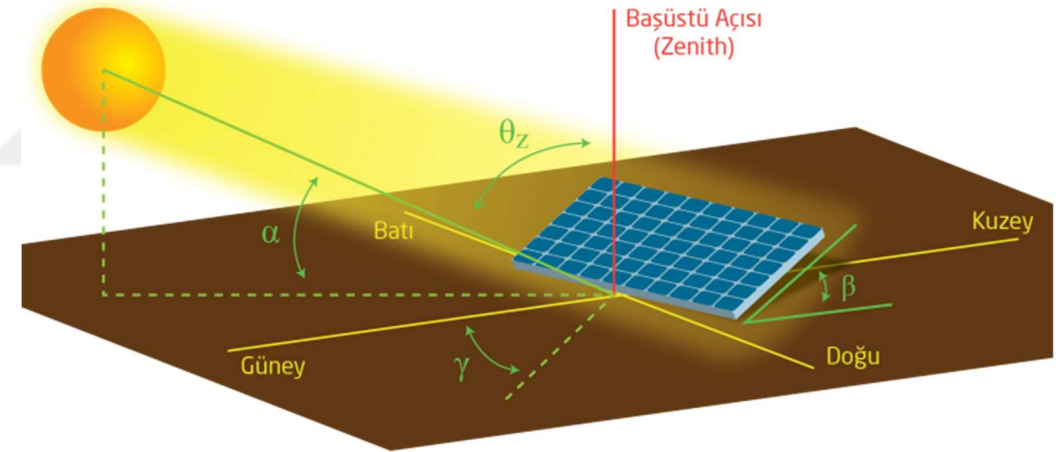
Kuzey yarıkürede güneş enerjisi toplama sistemleri için en uygun yönelim doğrultusu güneydir. Toplayıcı yerleşiminin diğer önemli parametresi de toplayıcı yüzeyin yataya göre eğim açısıdır ve önceki en uygun eğim (β_{opt}) değeri olarak, istemin konumlandığı noktanın enlem derecesine (φ) bağlı olarak çeşitli öneriler yapılmıştır:

- φ (Gopinathan 1991) (Soulayman 1991) (Günerhan ve Hepbaşlı 2007)
- $(\varphi+15^\circ)\pm 15^\circ$ (Duffie ve Beckman 1991)
- $\varphi\pm 8^\circ$ (Lewis 1987),
- $\varphi\pm 15^\circ$ (Lunde 1980),

Öte yandan aynı araştırmacılar, en uygun açının yerel etkiler (yerden yansıma, sıcaklık, rüzgârın soğutma etkisi, coğrafi yapılar vb.) nedeniyle değişiklikler göstermesi yüzünden, kesin değer vermekten kaçınmaktadır. Belirli bir sistem konumu için en uygun eğim açısının saptanması, ancak o konumda yapılacak deneysel çalışmalar ile kesin olarak belirlenebilir.

Türkiye'nin sekiz ilçesindeki ışı nım ölçümlerini kullanarak yaptığı çalışmada Bakırcı (2012), farklı çalışmalarda geniş bir aralıkta değişkenlik gösteren en uygun eğim açısı değeri için $\varphi=38,5^\circ$ enlemindeki İzmir'de 33° kullanılmasını önermiştir. Bu çalışmada Menemen konumu için en uygun eğim açısı β_{opt} değeri olarak 33° kullanılmıştır.

Isıl veya fotovoltaik toplayıcı yüzeyine gelen ışı tımın belirlenmesi için güneş geometrisine dayalı bir çözümlene yapılmalıdır. Bir toplayıcının yerleşimi eğim açısı β , ve güney açısı γ ile belirtilir. Şekil 4.2'de güney bakılı bir FV modül ve güneş geometrisi açıları gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Güney bakılı β eğimli FV modül

β toplayıcının yatayla yaptığı açığı, γ ise eğimli yüzey normalinin yataya izdüşümü ile yerel meridyen arasındaki açıyı göstermektedir. Kuzey yarıkürede tam güney bakılı toplayıcı için $\gamma=0^\circ$ olur, $\gamma=180^\circ$ tam kuzey yönelimi anlamına gelir.

Ekvatorial koordinat sisteminde bir noktanın gök küredeki yönelimini belirten iki açıdan biri olan güneş sapma açısı δ , güneşin Dünyanın eksenine göre kayıklığını gösterir ve

Eşitlik 8

$$\delta = \sin^{-1}(-23,45^\circ) \cdot \sin(TB)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte TB , tutulum boylamını ifade etmektedir.

Dünyanın yörünge basıklığı küçük olduğundan en fazla 1° hataya yol açmak üzere yörünge dairesel olduğu kabul edilebilir. Bu kabulde dönencelerde $TB=90^\circ$ olacağından;

Eşitlik 9

$$\sin(TB) = \sin(90 + ADGS) = \cos(ADGS)$$

olarak yazılabilir. Burada $ADGS$, Aralık dönencesinden sonraki gün sayısıdır.

Bu yazımda ayrıca,

Eşitlik 10

$$\sin^{-1}[\sin(d) \cdot \cos(ADGS)] \cong d \cdot \cos(ADGS)$$

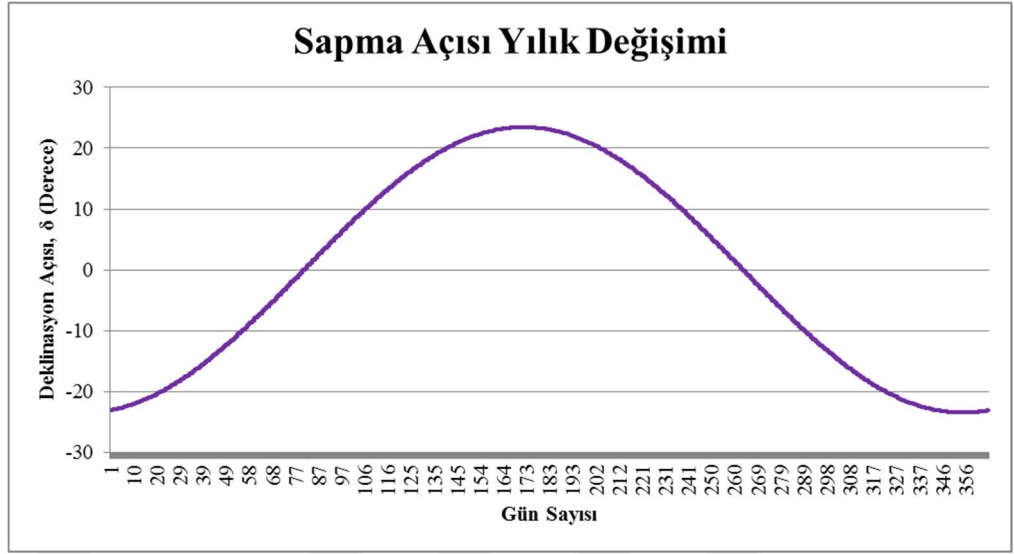
yaklaşıklığı da dikkate alınarak, yaygın olarak kullanılan ve

Eşitlik 11

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (284 + n)}{365} \right]$$

olarak bilinen Cooper eşitliği bulunur (Cooper 1969). Bu eşitlikte n gün sayısıdır ve 1 Ocak=1 ve 31 Aralık=365 (artık yıllarda 366) olacak biçimde sıralanır.

δ yıl boyunca $-23,5^\circ$ ile $23,5^\circ$ arasında dünyanın güneş çevresinde dönüşüne bağlı olarak sinüsel bir değişim gösterir. δ ekinokslarda (21 Mart ve 23 Eylül) 0° , Kuzey yarıküre yaz gündönümünde (21 Haziran) $23,5^\circ$ ve Güney yarıküre yaz gündönümünde (21 Aralık) $-23,5^\circ$ değerlerini alır. Deklinasyon açısının Eşitlik 11 ile hesaplanan yıllık değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Güneş deklinasyon (sapma) açısının yıllık değişimi

Ekvatorial koordinat sisteminde bir noktanın gök küredeki yönelimini belirten iki açıdan diğeri olan güneş saat açısı ω , güneşin yerel meridyenin doğusundan batısına doğru değişen konumunu gösterir ve güneş öğlesinden önce eksi, güneş öğlesinden sonra artı değerler alır. Güneş saat açısı,

Eşitlik 12

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$$

eşitliği ile bulunur (Duffie ve Beckman 1991).

Yataya göre belirli bir açı ile konumlandırılmış eğimli (tilted) bir yüzeye gelen ısıtım değeri,

Eşitlik 13

$$H_T = R \cdot H$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada R , yatay düzleme gelen ısıtım değeri ile eğimli yüzeydeki ısıtım değeri arasındaki orantıyı tanımlamaktadır. Bu değer, eğimli yüzeye gelen ışınımın doğrudan, saçınık ve yansıyan bileşenleri ayrı ayrı dikkate alınarak belirlenebilir. Saçınık ve yansıyan bileşenlerin yönbağımsız (istoropic) oldukları kabul edildiğinde yalnızca doğrudan ışınım bileşeni için,

Eşitlik 14

$$R = \frac{G_T}{G} = \frac{G_{\text{öğlen}} \cos \theta}{G_{\text{öğlen}} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

eşitliği yazılabilir. Burada R eğimli ve yatay yüzeye gelen ışınım arasındaki orantıyı göstermektedir ve kuzey yarıküre için

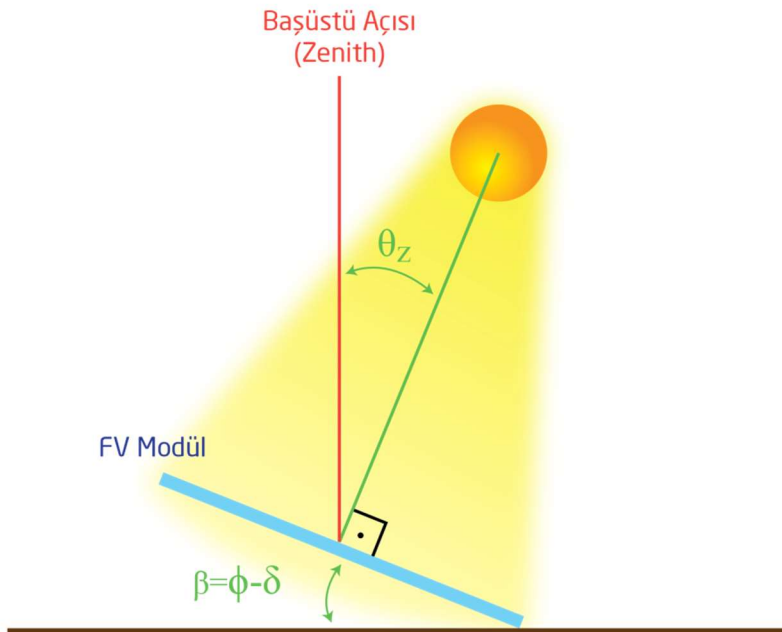
Eşitlik 15

$$R = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$

olarak yazılır.

Işıttımın en yüksek değerini aldığı güneş öğlesinde, güneş ışınlarının atmosfer içinde aldıkları yol en kısa durumdadır. Bu nedenle FV modüllerin güneş öğlesinde güneşe dik bakacak açıda yerleştirilmeleri istenir. Bu en uygun eğim açısı β_{opt} , FV modüller için $(\varphi - \delta)$ olarak bulunur ve güneş öğlesinde θ_z değerine eşit olur.

Şekil 4.4'te β_{opt} açısının, güneş öğlesinde θ_z 'ye dik bir düzlem sağladığı gösterilmektedir. FV modül, β_{opt} açısı pozitif olduğunda güney bakılı ($\gamma=0^\circ$), β_{opt} açısı negatif olduğunda kuzey bakılı ($\gamma=180^\circ$) olacaktır.



Şekil 4.4 β_{opt} açısı ile yerleştirilmiş FV modül

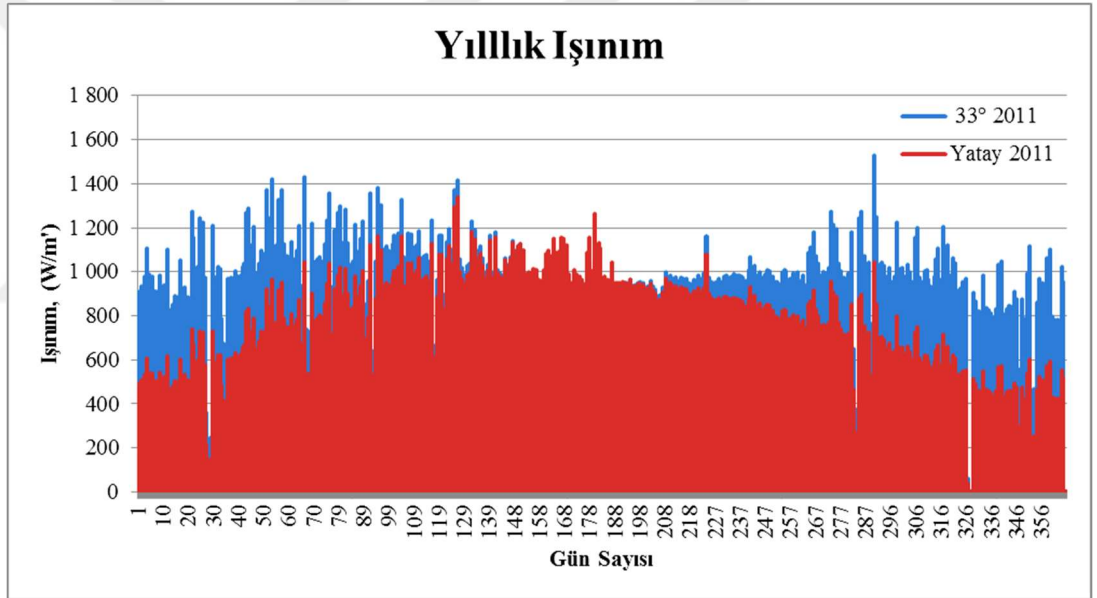
Basitleştirme amaçlı olarak güneş öğlesi değerleri alınarak elde edilen,

Eşitlik 16

$$R = \frac{\sin|\varphi - \delta - \beta|}{\cos|\varphi - \delta|}$$

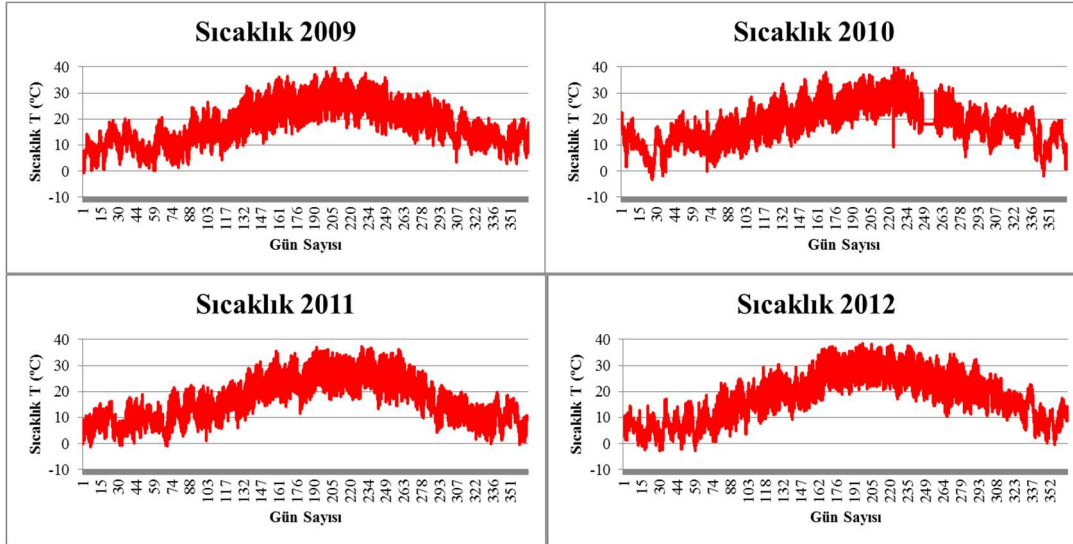
eşitliği (Duffie ve Beckman 1991), bu çalışmadaki optimum açıdaki ışınım değerini belirleme hesaplamaları için temel alınmıştır.

Eşitlik 16'ün Kuzey 38°30' (38,50°) enlemindeki Menemen OMGİ 2011 yatay düzleme gelen ışınım ölçümleri üzerinde, en uygun eğim açısı için çalıştırılması sonucunda elde edilen ışınım verisi değerleri Şekil 4.5'te yıllık grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Menemen OMGİ 2011 yılı yatay eksene gelen ve en uygun eğim açısındaki (33°) ışınım verisi değerleri

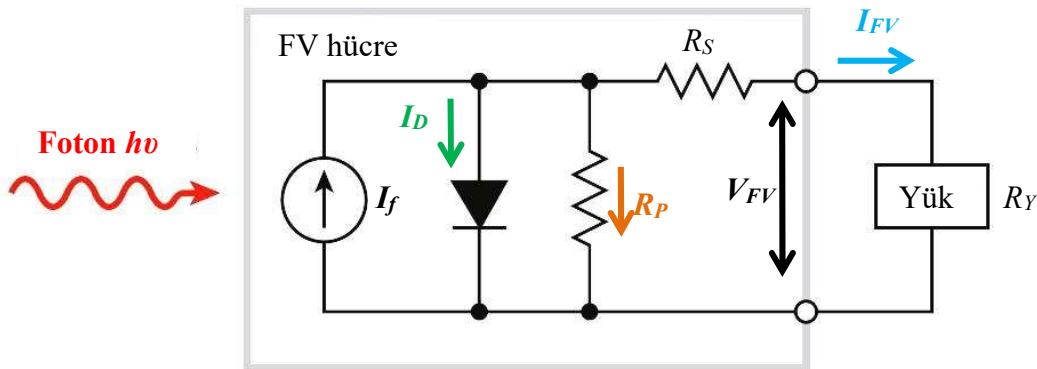
Aynı gözlem istasyonunda kaydedilen sıcaklık ölçümlerinin 2009 – 2012 aralığındaki yıllık profilleri de Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu istasyonun sıcaklık ölçümü veri setlerinde 2010 yılı dışında dikkate değer bir kesinti görülmemektedir. Bununla birlikte, cihaz arızası veya başka sebeplerle oluşan ışınım verisi kesintileri nedeniyle Menemen OMGİ 2010 ve 2012 verileri kullanılmadığı için, bu yıllara ait sıcaklık verileri de istatistiki değerlendirmelere alınmamıştır.



Şekil 4.6 Menemen OMGİ 2009-2012 yılları arasındaki sıcaklık profilleri

4.2 FV Modül Sıcaklığı Matematik Modeli

Bir silisyum FV aygıtın sıcaklığı, kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değerleri üzerinde etkilidir. Bu nedenle, hücre sıcaklığının FV akım ve dolayısı ile FV sistemlerdeki hasat üzerindeki etkisi belirlenmelidir. Sıcaklığın FV hücre elektriksel performansı üzerindeki etkisi, FV hücreler için geliştirilmiş olan *1-diyot* eşdeğer modeli üzerinde açıklanabilir. *1-diyot* veya *tek diyot* modeli²⁴ olarak adlandırılan bu eşdeğer yaklaşım Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 FV hücre 1-diyot eşdeğer devresi

²⁴ Bu yaklaşım İngilizce kaynaklarda *one-diode*, *single-diode* ve *five parameter* modeli olarak da adlandırılmıştır.

Bu basitleştirilmiş fotovoltaik hücre eşdeğer devresi referans alınarak, yük üzerinden geçen fotovoltaik akım,

Eşitlik 17

$$I_{FV} = I_f - I_o \cdot \left(e^{\frac{V_{FV} + I_{FV} \cdot R_S}{n \cdot V_T}} \right) - \frac{V_{FV} + I_{FV} \cdot R_S}{R_p}$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Bu eşitlikte renklerle gösterilen terimler, eşdeğer devrede renkli olarak gösterilen akımları temsil etmektedir. Isıl gerilim eşdeğeri (thermal voltage equivalent) terimi;

Eşitlik 18

$$V_T = \frac{k \cdot T_{mod}}{q}$$

olarak tanımlıdır. Burada;

q , elektron şarjını ($1,6021 \times 10^{-19}$ C)

k , Boltzmann sabitini ($1,3865 \times 10^{-23}$ J/K) ve

T_{mod} , modül sıcaklığını (C°)

ifade etmektedir.

Eşitlikteki diğer terimler de;

I_{FV} ve I_o sırasıyla modül akımını ve diyot ters doyum akımlarını (Ampére),

I_f foton kaynaklı akımı (Ampére),

R_S ve R_p sırasıyla seri ve paralel dirençleri (Ω)

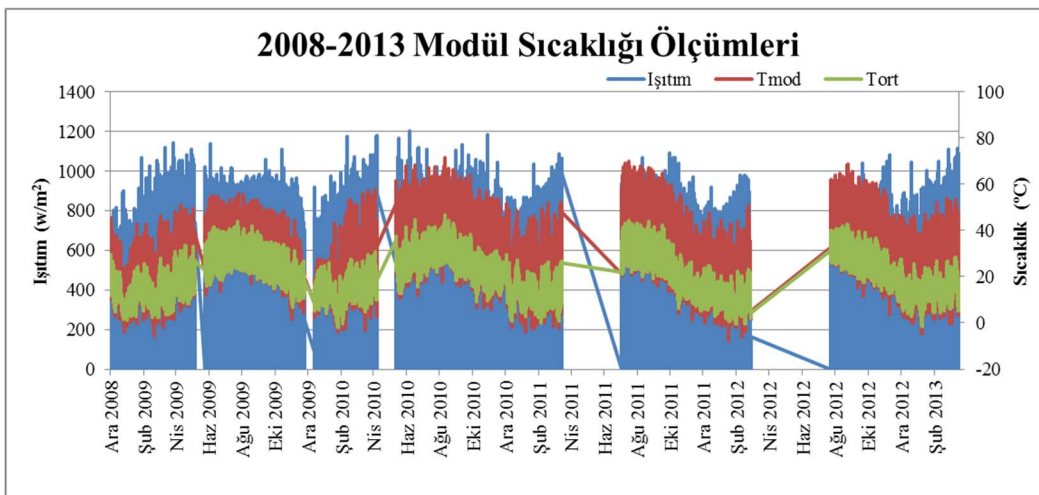
göstermektedir.

n ideallik (salım veya kalite) katsayısı olarak adlandırılır ve genellikle 1 ile 2 arasında değerler alır. Özel durumlar dışında 1 değeri kullanılmaktadır.

Belli bir FV hücre için dış devre akımı I_{FV} , sadece ışınımdan kaynaklanan akım I_f ve hücre sıcaklığı T ile değişmektedir. Kayıpların diyot akımı ile temsil edilen önemli bir kısmı, sıcaklıkla artış göstermektedir. FV modüllerde sıcaklık etkisinden kaynaklanan yıllık hasat kayıpları hücre teknolojisine göre % 8 - % 9 arasında gözlenmektedir (Makrides, ve değerleri 2012).

FV sistemlerde hasat tahmini için önemli ve gerekli bir parametre olan ve bu çalışmaya temel alınan Menemen 17789 gözlem istasyonu veri seti kapsamında bulunmayan FV modül sıcaklığı değerleri, EÜGEE veri setinden elde edilen modele göre türetilmiştir.

Bu amaçla, E. Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü tarafından işletilen FV güç sisteminde 2008 yılından beri tutulan kayıtlar incelenerek modül sıcaklığı için bir çalışma yapılması gerekmiştir. Kurulu sistemde ortam sıcaklığı ve modül sıcaklığı ile birlikte, modül düzlemindeki (33°) ışınım değeri de kaydedilmiştir. 5 dakika çözünürlükteki ölçüm verileri hasat hesaplamada doğrudan doğruya kullanılmaya uygun sıklıkta değildir. Ayrıca 2011 bahar ve 2012 bahar – yaz aylarında uzun süreli kesiklikler görülmektedir. Bununla birlikte, bu ölçmeler istatistiksel olarak incelendiğinde, sözü geçen üç büyüklük (ışınım, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı) arasındaki ilişkiyi gösterebilecek nitelikte oldukları görülmüştür. 2008-2013 yıllarında 38,464 K, 27,239 D konumunda çalışan sistemde ölçülerek kaydedilen bu değerler Şekil 4.8’de grafik olarak gösterilmiřtir²⁵.



Şekil 4.8 E. Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü modül ve ortam sıcaklığı, ışınım ölçümleri

²⁵ E. Ü. Güneş Enerjisi Enstitüsü’nde kurulu Şebeke bağlantılı FVGS verileri.

Işınım, ortam sıcaklığı ve modül sıcaklığı serilerinin uzun süreli değişimi grafik üzerinde incelendiğinde, bunların arasında kararlı ilişkiler bulunduğu anlaşılmaktadır. Toplam veri setinde bulunan toplam 354 223 adet üçlü ölçme gözlemi için yapılan çoklu regresyon analizi sonuçları, Çizelge 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1 G - $T_{\text{modül}}$ - T_{ortam} değişkenleri arasındaki çoklu regresyon sonuçları

Çoklu R	0,983507				
R Kare	0,967287				
Ayarlı R Kare	0,967287				
Standart Hata	2,479748				
Gözlem	354223				
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Anlamlılık F</i>
Regresyon	2	64404881	32202441	5236894	0
Fark	354220	2178152	6,149149		
Toplam	354222	66583033			

	<i>Katsayı</i>	<i>Standart Hata</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-değeri</i>	<i>Düşük %95</i>	<i>Yüksek %95</i>	<i>Düşük 95,0%</i>	<i>Yüksek 95,0%</i>
Kesişim	-1,9949	0,0099	-201,428	0	-2,0143	-1,9755	-2,0143	-1,9755
Işınım	0,0203	1,62E-05	1247,642	0	0,0202	0,0203	0,0202	0,0203
T_{ortam}	1,0881	0,000524	2077,737	0	1,0870	1,0891	1,0870	1,0891

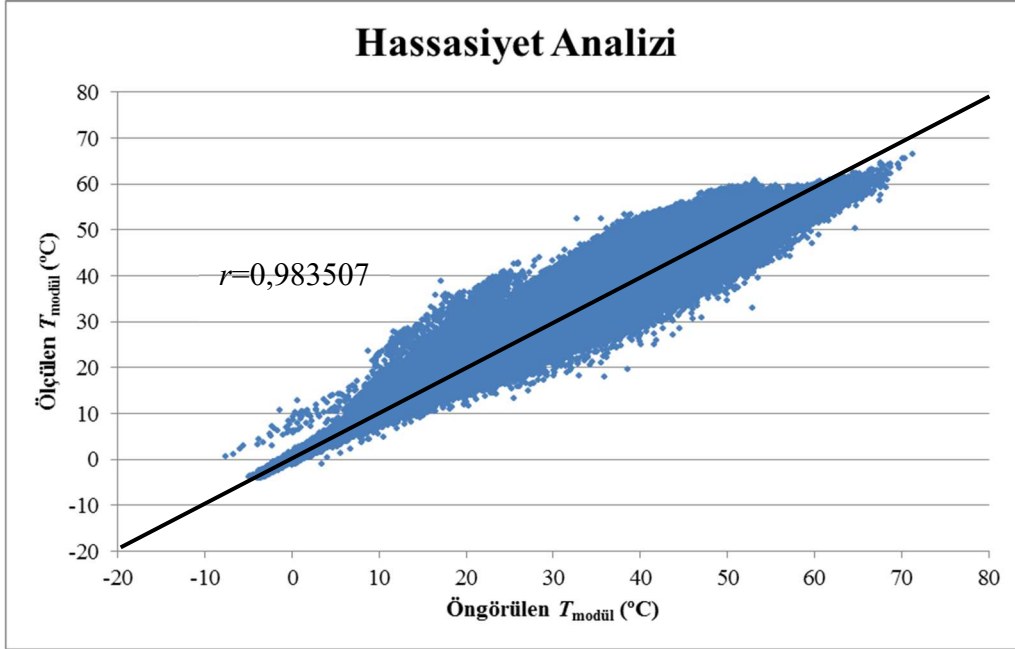
Yaklaşık 50 aylık (Aralık 2008 – Mart 2013) ölçüm sonuçları kapsamında, modül sıcaklığı ($T_{\text{modül}}$) üzerinde Işınım (G) ve ortam sıcaklığı (T_{ortam}) ölçümlerinin etkisinin değerlendirildiği analiz sonuçlarına göre, hem ışınım hem de ortam sıcaklığı parametrelerinin, modül sıcaklığı değişiminde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu iki bağımsız değişken (G ve T_{ortam}), bağımlı değişkeni ($T_{\text{modül}}$) %98’i aşan oranda açıklayabilmektedir. Son derece düşük olan P - ve *standart hata* değerleri, ortaya çıkan matematiksel modelin doğruluğunu ve anlamlılığını desteklemektedir. Çözümlemede bulunan katsayılar kullanılarak oluşturulan matematik model Eşitlik 19’da verilmiştir.

Eşitlik 19

$$T_{\text{modül}} = -1,995 + 0,0203 \cdot G + 1,0881 \cdot T_{\text{ortam}}$$

Bu matematik modelde, $T_{\text{modül}}$ değişkeni üzerinde meydana gelen değişimin % 96,7’si, Işınım ve T_{ortam} değişkenleri tarafından açıklanabilmektedir.

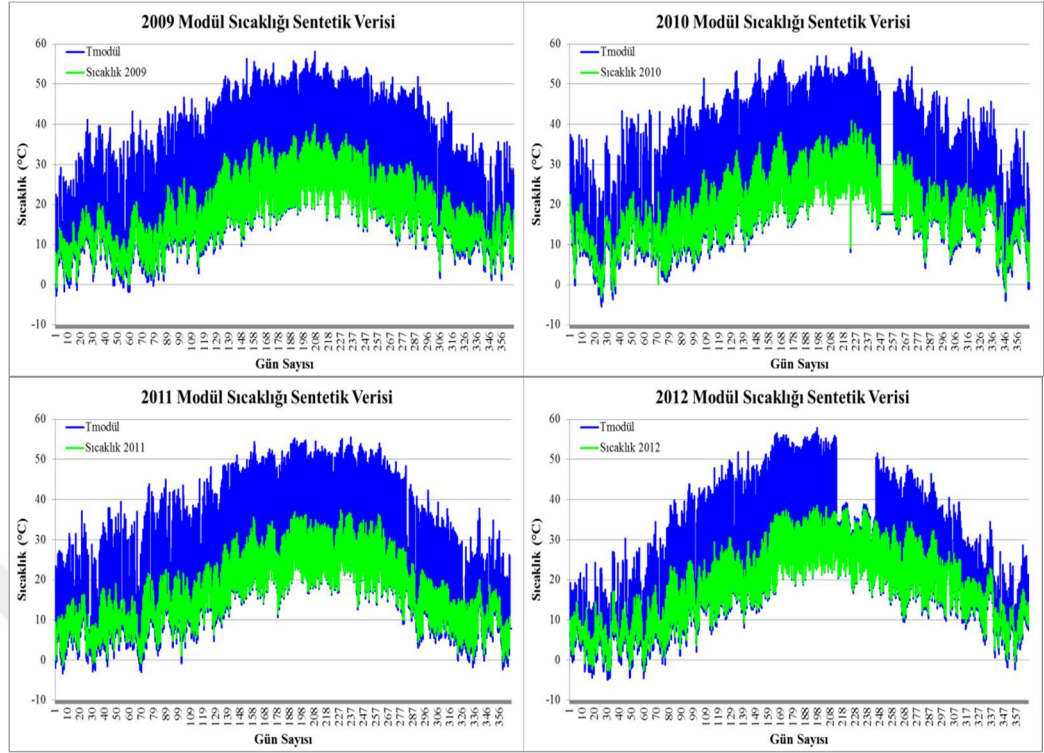
Modelin öngördüğü modül sıcaklığı değerleri ile gerçek ölçüm değerleri arasındaki hassasiyet analizi Şekil 4.9'da görülmektedir. Ölçülen ve model tarafından tahmin edilen değerler arasındaki % 98'i aşan korelasyon değeri, modelin güvenilirliğini göstermektedir.



Şekil 4.9 Öngörülen ve ölçülen modül sıcaklığı değerleri

Eşitlik 19'da verilen model, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 17789 sayılı Menemen istasyonunda kaydedilmiş dört yıllık sıcaklık değişimi veri setlerinde koşturularak, bu çalışma kapsamında kullanılacak süreklilik ve sıklıkta bir *modül sıcaklığı sentetik veri seti* türetilmiştir.

Menemen istasyonunda kaydedilen 2009, 2010, 2011 ve 2012 ölçümlerinde modelin çalıştırılmasıyla elde edilen veri setleri Şekil 4.10'da görülmektedir. Bu grafiklerdeki sentetik modül sıcaklığı serileri, modelin yüksek doğrulukla tahminleme yapabildiğini göstermektedir. Elde edilen bu yeni veri setindeki modül sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve modül yüzeyine dik gelen güneş ışınımı verileri kullanılarak artık her ölçme dilimi için hasat değerleri hesaplanarak yıllık toplam hasadın belirlenmesi mümkündür.



Şekil 4.10 MGM Işınım-Ortam sıcaklığı verilerinde model ile belirlenen modül sıcaklığı değerleri

4.3 Hasat Dağılımı

Bu çalışma kapsamında geliştirilecek olan ağırlıklı verim hesaplama modeli için bir FV eviricinin sahada kullanımı sırasında hangi güç aralıklarında ne kadar süre ile çalışacağını belirlemek gereklidir. Bu amaçla öncelikli olarak, çalışma bölgesindeki ışınım değişim profilini temel alan bir hasat dağılım karakteristiği oluşturulmalıdır.

Hasat dağılımı verilerini elde etmek için ilk olarak, önceki bölümlerde muhtelif istatistiki yöntemlerle elde edilmiş olan istenilen özelliklerdeki Işınım – Sıcaklık ($G-T$) veri seti üzerinde, verim ölçmeleri için temel alınan TS EN 50530 kapsamında sunulan Eşitlik 20 ve Eşitlik 21 çalıştırılarak modüllerin kısa devre akımları ve açık devre gerilimleri hesaplanmıştır.

Belgede, ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı ve ışınımına bağlı olarak FV modüller için kısa devre akımı I_{KD} ve açık devre gerilimi V_{AD} hesaplamaları için sırasıyla,

Eşitlik 20

$$I_{KD} = I_{KD,SD\text{Ş}} \cdot \frac{G}{G_{SD\text{Ş}}} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T_{FV} - T_{SD\text{Ş}})\right)$$

ve

Eşitlik 21

$$V_{AD} = V_{AD,SD\text{Ş}} \cdot \left(1 + \beta(T_{FV} - T_{SD\text{Ş}})\right) \cdot \left(\ln\left(\frac{G}{G_G}\right) \cdot C_V - C_R \cdot G\right)$$

eşitliklerinin kullanılması öngörülmektedir. Bu eşitliklerde;

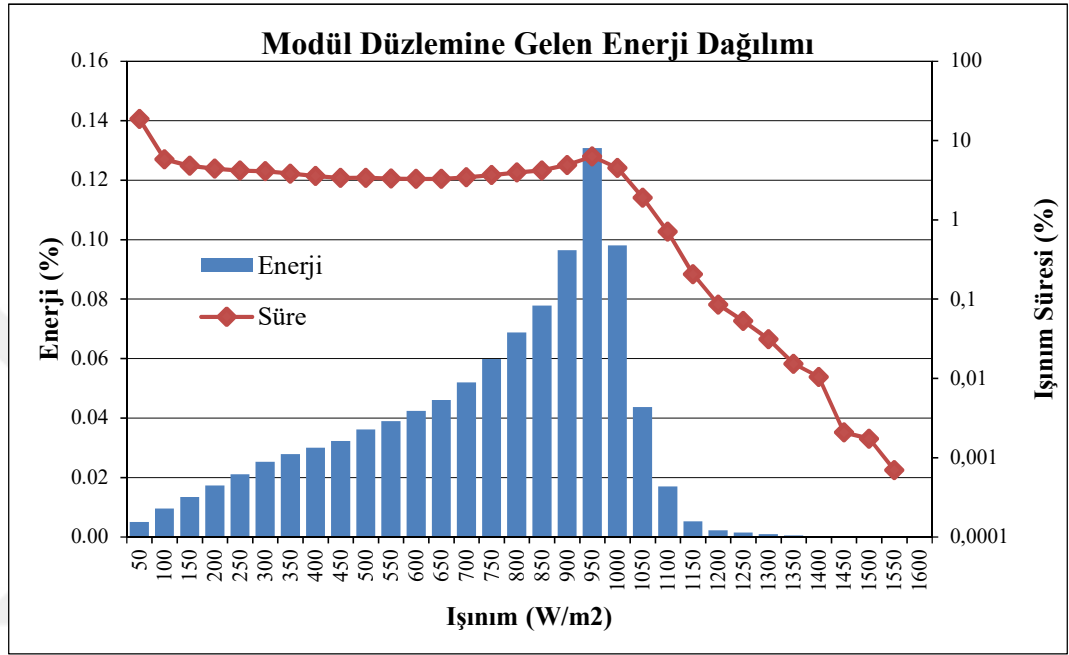
- $G_{SD\text{Ş}}$; 1 000 W/m² olarak standart ışınımı²⁶
- T_{FV} ; C° olarak FV modül sıcaklığını
- α ; 0,06 %/°C olarak kısa devre akımı sıcaklık katsayısını
- β ; -0,4 %/°C olarak açık devre gerilimi sıcaklık katsayısını
- C_G ; $2,514 \times 10^{-3}$ W/m² ışınım düzeltme katsayısını
- C_V ; $8,593 \times 10^{-2}$ düzeltme katsayısını
- C_R ; $1,088 \times 10^{-4}$ m²/W ışınım düzeltme katsayısını

göstermektedir. Ayrıca T_{FV} , FV modül sıcaklığını ve G anlık ışınım değerini ifade etmektedir. Işınımın sıfır olduğu ölçme değerleri için V_{AD} sıfır alınmıştır. Hesaplama kolaylığı açısından, standart deney şartlarındaki açık devre gerilimi 100 V ve kısa devre akımı 10 A olan 1 000 W anma gücündeki bir FV dize referans alınmıştır

Işınım aralıklarına göre yıllık enerji dağılımının, ışınım ve modül sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanmasıyla, toplam hasat içinde en yüksek payı olan çalışma bölgeleri belirlenmiş olmaktadır.

26 SDŞ – Standart deney şartları, ASTM, IEC ve CLC standartlarında endüstriyel raporlama şartlarını belirten Standard Test Conditions – STC: 1000 W/m², AM=1.5, 25 °C.

Önceki bölümlerde elde edilmiş olan *eğimli yüzeye gelen ışınım* verisi ile birlikte, EÜGEE ışınım-modül sıcaklığı verilerinden sağlanmış olan matematiksel modele dayalı olarak türetilen yüksek çözünürlüklü *modül sıcaklığı* değerleri kullanılarak, İzmir iklim şartlarında ve enleminde ($\varphi=38,5^\circ$) optimum eğimde ($\beta=33^\circ$) güney yönelimli ($\gamma=0^\circ$) olarak kurulu bir FV güç sistemi için elde edilen ışınım düzeylerine göre yıllık enerji dağılımı Şekil 4.11’de verilmiştir.



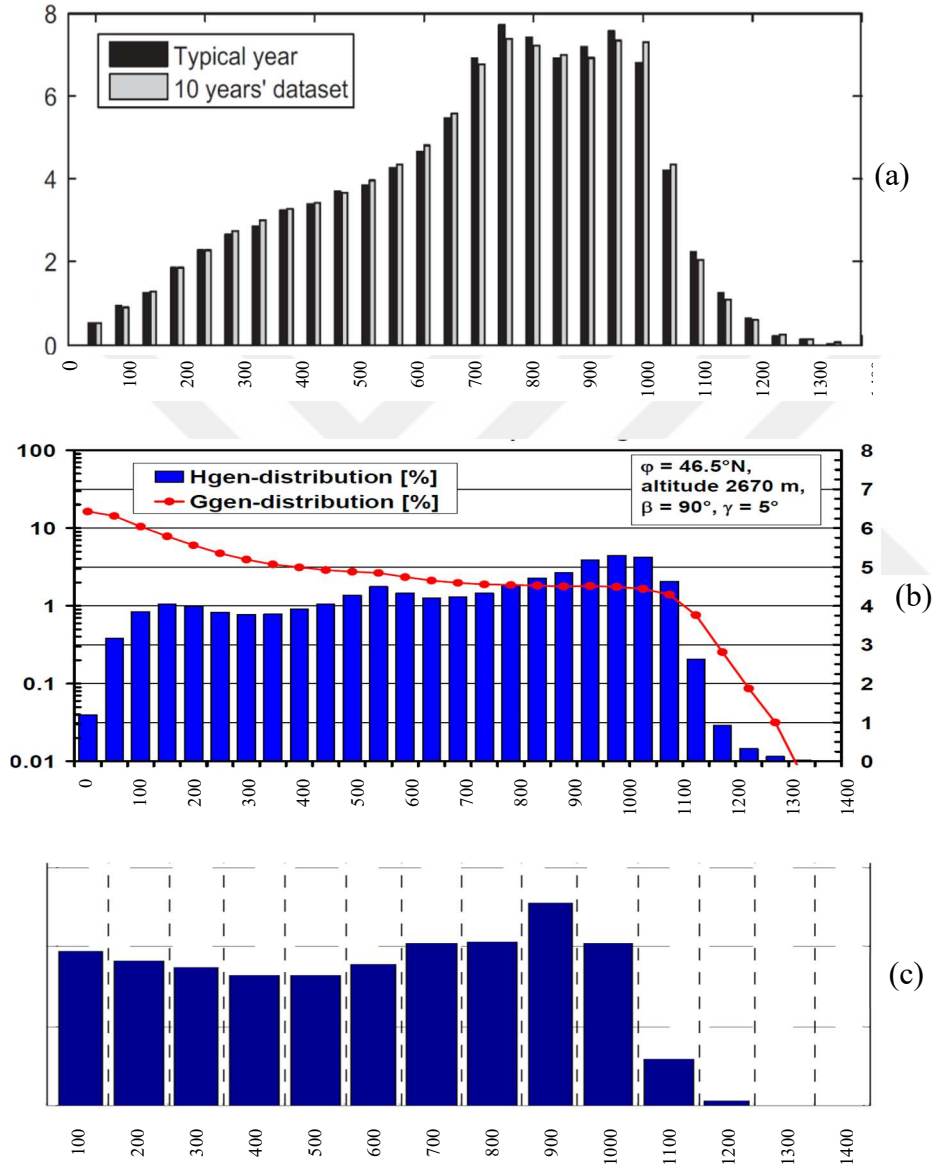
Şekil 4.11 İzmir iklim ve coğrafi şartlarında 33° eğimli düzlemdeki doğrudan ışınımına bağlı olarak tam güney bakılı bir FV sistemin yıllık enerji dağılımı

Şekil 4.11, çalışma için temel alınan 2011 Menemen OMGİ ışınım ve ortam sıcaklığı veri seti dikkate alınarak oluşturulmuştur. *Süre* serisi, yatay eksendeki ışınım değer aralıklarında gelen ışınım sürelerini, yıl içindeki toplam güneşlenme süresinin yüzdesi olarak göstermektedir. *Hasat* serisi ise yine yatay eksen üzerinde verilmiş olan ışınım değer aralıklarında FV modül düzlemine gelen enerji miktarlarını, yıllık toplam hasadın yüzdesi olarak göstermektedir.

İzmir bölgesi için ışınım aralıklarına göre elde edilen bu enerji dağılımı histogramı, dünyanın başka coğrafi konumlarında elde edilen diğer bazı hasat dağılımları ile karşılaştırıldığında farklılıklar göstermektedir. Karşılaştırma için kullanılan üç ayrı bölgedeki hasat dağılımlarını gösteren örnek grafikler Şekil 4.12’te sunulmuştur. Bu örneklerde Aguacalientes – Meksika (a) (Rodrigo, Velázquez ve Fernández 2016), Birg – İsviçre (b) ve Viyana – Avusturya (c) (B.

Bletterie et al., 2008) ışınım dağılım profilleri, alıntılандıkları yayınlardaki özgün halleriyle görülmektedir.

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’teki hasat dağılım histogramları karşılaştırıldığında, bölgelerin iklim şartlarına ve coğrafi konumlarına bağlı olarak yıllık ışınım dağılımlarının belirgin değişkenlikler gösterebildiği anlaşılmaktadır. Birg–İsviçre



Şekil 4.12 Farklı enlemlerde yer alan sistemlerin ışınım aralığına göre hasat dağılımları

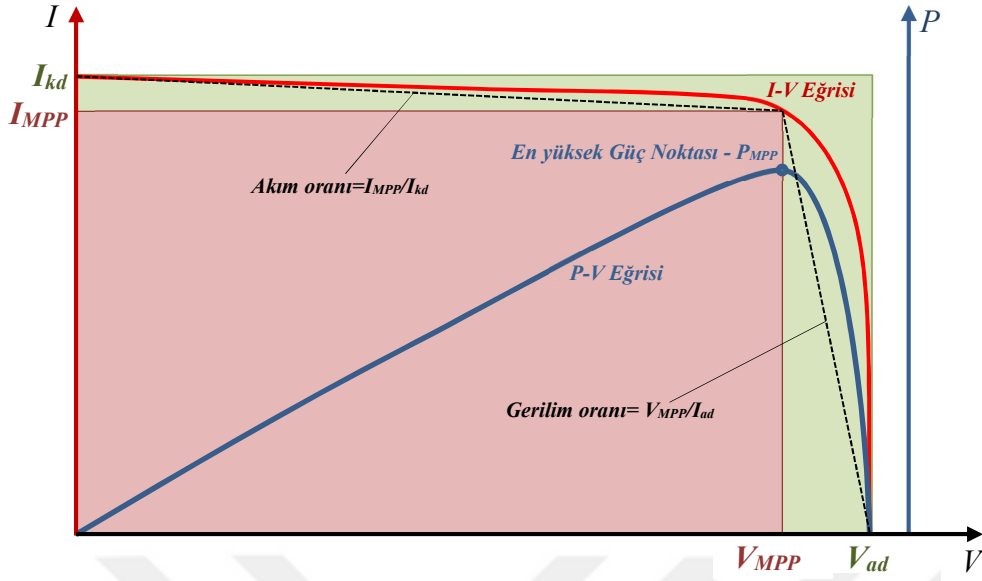
ve Viyana–Avusturya enerji profillerinde, 1000 W/m² ışınım şiddetine kadar olan değer aralıklarında gelen enerji miktarlarının yıllık toplam enerjiye oranlarının oldukça homojen biçimde dağılım gösterdiği söylenebilir. İzmir–Türkiye ve Aguacalientes–Meksika enerji profillerinde ise düşük ışınım değerlerinde gelen

enerjinin oranının azaldığı, buna karşılık orta – yüksek ışınım şiddetlerinde gelen enerjinin belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu değişiklikler, ölçüm yapılan konumun enlemi, mevsimlere göre güneşlenme süreleri ve gün uzunluğu değişimleri, bulutluluk/yağış rejimi, çevrenin yansıtıcılığı ve bitki örtüsü (albedo etkisi) gibi pek çok parametreye bağlıdır ve ancak ölçümler yapılarak doğru biçimde belirlenebilir. İzmir ölçümleri, diğer bütün profillere göre daha sivri bir yapı göstermektedir ve düşük ışınım değerlerinde gelen enerji payının en düşük olduğu profili oluşturmaktadır.

Fotovoltaik eviricilerin işletimdeki gerçek verimliliklerini belirlemek için, eviricinin yıl içinde hangi ışınım aralıklarında ne kadar yoğunlukta çalışacağını gösteren bu histogramlar, ağırlıklı verim belirlemek için gereken temel altyapıyı sağlamaları açısından önemlidir. Türkiye için bu tür bir verim değerlendirmesinin gerektirdiği niteliklerde ve kamuya açık bir ölçüm verisi henüz bulunmamaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada istatistikî yöntemler ve muhtelif hesaplamalarla elde edilmiş bulunan *eğimli yüzeyde yüksek çözünürlüklü ve kesintisiz toplam ışıttım sentetik veri seti*, İzmir bölgesi için yapılacak hasat tahminleme ve evirici ağırlıklı verim çalışmaları için kullanılabilir yapıdadır.

Elde edilen ve Şekil 4.11’de histogram halinde sunulan enerji dağılım profili, İzmir şartlarında optimum açıda yerleştirilmiş bir FV dizenin yüzeyine gelen güneş enerjisinin ışınım değer aralıklarına göre yıllık dağılım oranlarını göstermektedir. Eviricinin verimini belirleyebilmek için ise, bu enerjinin evirici tarafından dönüştürülebilir halinin değerlendirilmesi gereklidir. Bu amaçla, ayrıntılı olarak çözümlenip düzenlenmiş bulunan ışınım ve sıcaklık verileri üzerinde bir *I-V* model koşturularak eviricinin dönüştürme işlevi için kullanılacak elektriksel gücün de modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

Eviriciler dönüştürme işlevini yerine getirirken, FV dizenin en yüksek güç noktasını (MPP) takip etmektedir. Bu nedenle elde edilmiş olan enerji değerleri, uygun bir FV hücre modeli ve akım-gerilim karakteristiği kullanılarak elektrik gücü değerlerine dönüştürülmelidir. Bu amaçla öncelikle *tek-diyot* modeli (Eşitlik 20 ve Eşitlik 21) kullanılarak FV hücrenin kısa devre akımı ve açık devre gerilimi değerleri hesaplanır.



Şekil 4.13 Tipik FV hücre $I-V$ eğrisi, en yüksek güç noktası (MPP) ve doluluk oranı (FF)

FV hücreden elde edilebilecek en yüksek elektrik gücünü belirlemek için, FV hücre akım-gerilim karakteristiğinin doluluk oranı (Fill factor – FF) dikkate alınarak yapılacak hesaplamalar kullanılacaktır. Doluluk oranı FV hücrenin en yüksek güç noktasında ürettiği gücün, kısa devre akımı ile açık devre gerilimi çarpımına oranı olarak tanımlıdır ve Şekil 4.13'te örnek bir FV hücre $I-V$ karakteristiği üzerinde gösterilmiştir.

FV hücrenin açık devre gerilimi ve kısa devre gerilimi, kullanıldıklarında dış devreye güç ulaştırmayan uç elektriksel büyüklüklerdir. FV hücreden en yüksek gücün alınabileceği akım-gerilim bileşeni, kısa devre akımından küçük bir akım değeri ve açık devre geriliminden küçük bir gerilim olacaktır. En yüksek güç değerini üreten bu akım ve gerilim değerleri sırasıyla I_{MPP} ve V_{MPP} olarak adlandırılır. I_{MPP} değerinin kısa devre akımına oranı ve V_{MPP} değerinin açık devre gerilimine oranı, FV hücreden alınabilecek en yüksek gücün, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı üzerinden belirlenebilmesini sağlar.

Bu tanımlara göre doluluk oranı;

Eşitlik 22

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{kd} \cdot V_{ad}} = \frac{P_{MPP}}{I_{kd} \cdot V_{ad}}$$

olarak yazılır. Buradan en yüksek güç değeri;

Eşitlik 23

$$P_{MPP} = FF \cdot I_{kd} \cdot V_{ad}$$

olarak yazılır. FV hücrede akım oranı; $\frac{I_{MPP}}{I_{kd}}$ ve gerilim oranı da $\frac{V_{MPP}}{V_{ad}}$ olarak tanımlıdır.

Bu değerlendirmede, en yüksek güç noktasındaki gücü hesaplamak amacıyla kullanılacak gerilim değerleri için TS EN 50530 içinde kristal silisyum FV hücreler için verilen gerilim doluluk oranı,

Eşitlik 24

$$FF_V = \frac{V_{MPP,SDS}}{V_{ad,SDS}} = 0,8$$

ve akım doluluk oranı,

Eşitlik 25

$$FF_I = \frac{I_{MPP,SDS}}{I_{ad,SDS}} = 0,9$$

kullanılarak, gerilim değerleri için

Eşitlik 26

$$V_{MPP,SDS} = 0,8 \cdot V_{AD,SDS}$$

ve akım değerleri için de,

Eşitlik 27

$$I_{MPP,SDS} = 0,9 \cdot I_{KD,SDS}$$

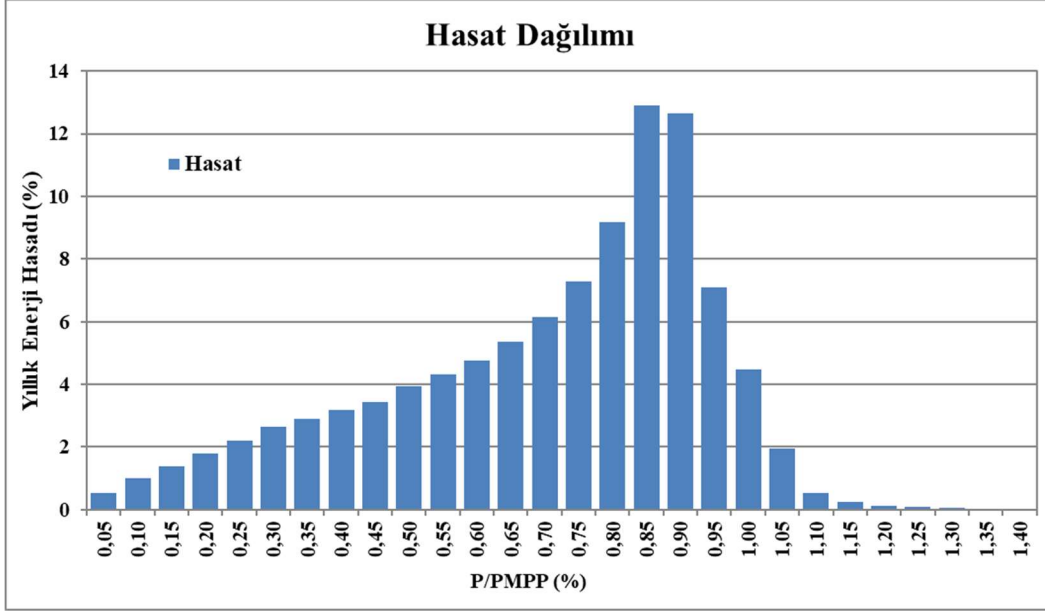
eşitlikleri yardımıyla her bir ışınım değeri için FV dizinin üreteceği en yüksek güç değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplamalara temel alınan FV dizinin ($I_{KD}=10$ A, $V_{AD}=100$ V) en yüksek anma gücü standart deney şartlarında 720 W olacağı için, anlık güç hesaplamaları bu değere göre normalize edilmiştir.

Hasat dağılımı grafiği oluşturulurken, burada dikkate alınan özelliklerdeki FV dizeye bağlanacak bir eviricinin İzmir şartlarında yıl boyunca üreteceği anma

gücünün ne kadar süreyle hangi değerlerde olacağı hesaplanmış ve yıllık gerçek hasat dağılımı ortaya çıkarılmıştır.

Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen güç değerlerinin ışınım şiddeti değer aralıklarına göre yüzdelik dağılımı Şekil 4.14'teki histogramda gösterilmiştir.



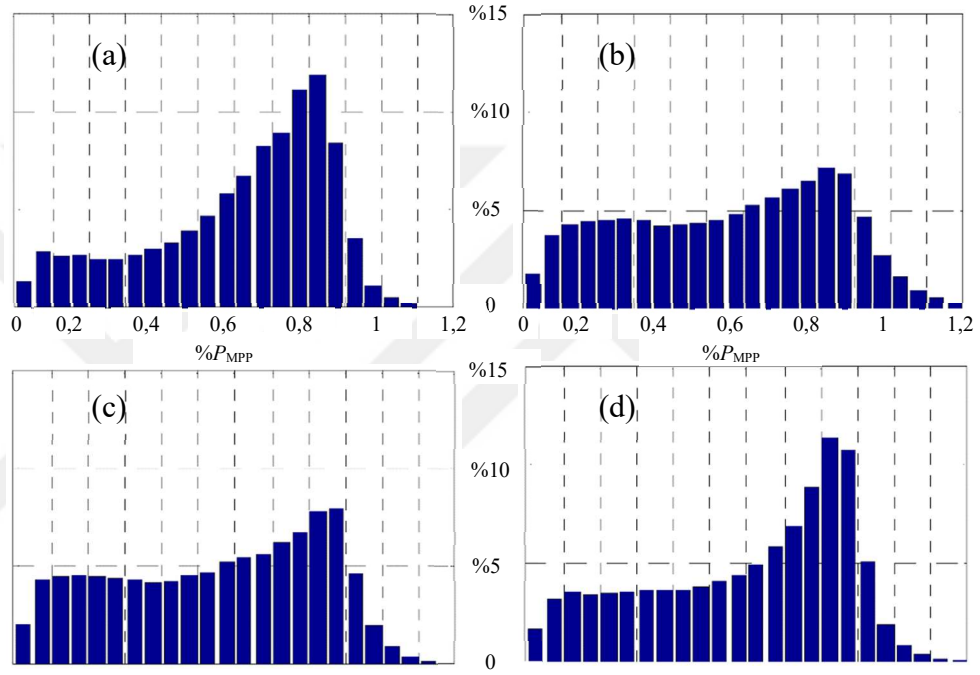
Şekil 4.14 Yıllık hasadın P_{MPP} değerlerine göre yıllık dağılımı

Şekil 4.11 ve Şekil 4.14 birlikte değerlendirildiğinde;

- İzmir şartlarında çalışan bir FV güç sisteminde, yıllık toplam güneş enerjisinin yarıdan fazlasının (%53,9) $750-1000 \text{ W/m}^2$ yüksek ışınım bandında geldiği ve
- FV dize toplam yıllık enerji hasadının yaklaşık yarısının (%49,1), %75-%95 P_{MPP} değer aralığında elde edildiği

görülmektedir. Buna göre, İzmir şartlarında çalıştırılan bir FV eviricinin, η_{EURO} ağırlıklı verim değerlendirme modelinin öngördüğünden çok daha fazla oranda yüksek güç değerlerinde çalışacağı ortaya çıkmaktadır. η_{CEC} modelinin ise, yüksek güç bölgeleri için biraz daha isabetli hesap yapmakla birlikte, düşük ışınım bölgelerindeki ayrıntılandırması gereğinden fazla olmaktadır. Bu alanda doğrusal değişen hasat dağılımının, daha basit biçimde de yeterli doğrulukla dikkate alınabileceği görülmektedir.

Yüksek güç değerlerinde çalışma durumunu açık biçimde sergileyen Şekil 4.14'teki dağılım, Şekil 4.15'te gösterilmiş olan başka coğrafyalardaki benzer grafikler ile karşılaştırıldığında, diğer konumlarda da %80-%90 P_{MPP} bandında görülen tepelerin İzmir için daha keskin yükseldiği açıkça görülmektedir. Diğer coğrafyalarda hasat profilinin orta ve düşük güç değerlerinde nispeten eşdağılımlı olarak seyretmesine karşın, İzmir değerlendirmesinde hasadın, düşük güç yüzdelerine doğru neredeyse doğrusal biçimde azaldığı ve toplam hasada düşük güçlerdeki katkının İzmir için diğerlerinden belirgin biçimde az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 Burgdorf – İsviçre (a), Kassel – Almanya (b), Viyana – Avusturya (c) ve Atina – Yunanistan (d) için P_{MPP} değerlerine göre yıllık hasat dağılımı

Bu değerlendirmeler dikkate alındığında, karşılaştırma yapılan konumlara göre daha sıcak bir iklim sergilemesine ve daha yüksek modül sıcaklıkları nedeniyle FV dizelerde oluşan üretim kayıpları daha fazla olmasına karşın İzmir’de, eviricilerin çok daha yoğun biçimde yüksek güç değerlerine maruz kalacakları görülmektedir. Buna göre, İzmir’de kurulan FV güç sistemlerinde kullanılacak eviricilerin yüksek güçlerdeki dönüştürme veriminin daha yüksek ağırlıkta olacağı, düşük güçlerdeki verim değerlerinin toplam dönüşüm verimi üzerindeki etkisinin ise toplam dönüşüm verimi hesaplanmasında nispeten daha az etkili olacağı görülmektedir.

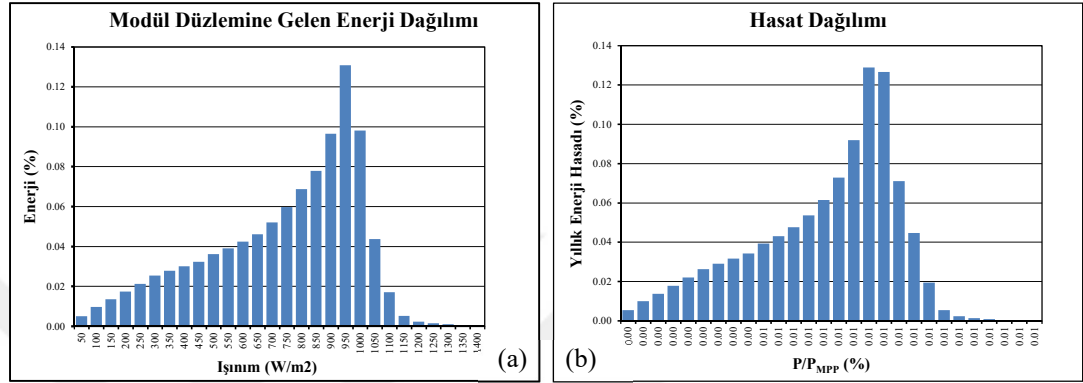
Bu çalışmada, mevcut ağırlıklı verim hesaplama modellerindeki yaklaşımların İzmir özelinde Türkiye iklim şartlarına uygunluğu sorgulanmaktadır. Önceki bölümlerde değerlendirilen η_{EURO} ve η_{CEC} modellerinin (özellikle η_{EURO}) düşük ışıyım değerlerinde elde edilen düşük güçler üzerine gereğinden fazla bir önem verdikleri aktarılmıştır.

Bu bölümde yapılan analizler sonucunda, Türkiye için geliştirilecek yeni ağırlıklı verim hesaplama yönteminde kullanılmak üzere, eviricilerin yıllık toplam çalışma süreleri boyunca hangi güç aralıklarında ne kadar süre ile çalışacakları (Şekil 4.11) ve dize en yüksek güç değerlerinin yüzdesel dağılımı (Şekil 4.14) belirlenmiştir. Bu bilgiler, çalışma kapsamında oluşturulacak İzmir ağırlıklı verim modelinin geliştirilmesi işlemleri için temel alınmıştır.



5. İZMİR AĞIRLIKLIL VERİM HESAPLAMASI

Bu doktora tez çalışmasında, Türkiye coğrafyasını temsilen İzmir bölgesi meteorolojik ölçümleri temel alınarak gerçekleştirilen değerlendirmeler, iklim verilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesini ve buna ilişkin enerji üretiminin belirlenmesini temel almaktadır.



Şekil 5.1 Işınımına göre gelen enerji (a) ve dizinin MPP gücüne göre hasat dağılımlarının (b) karşılaştırılması

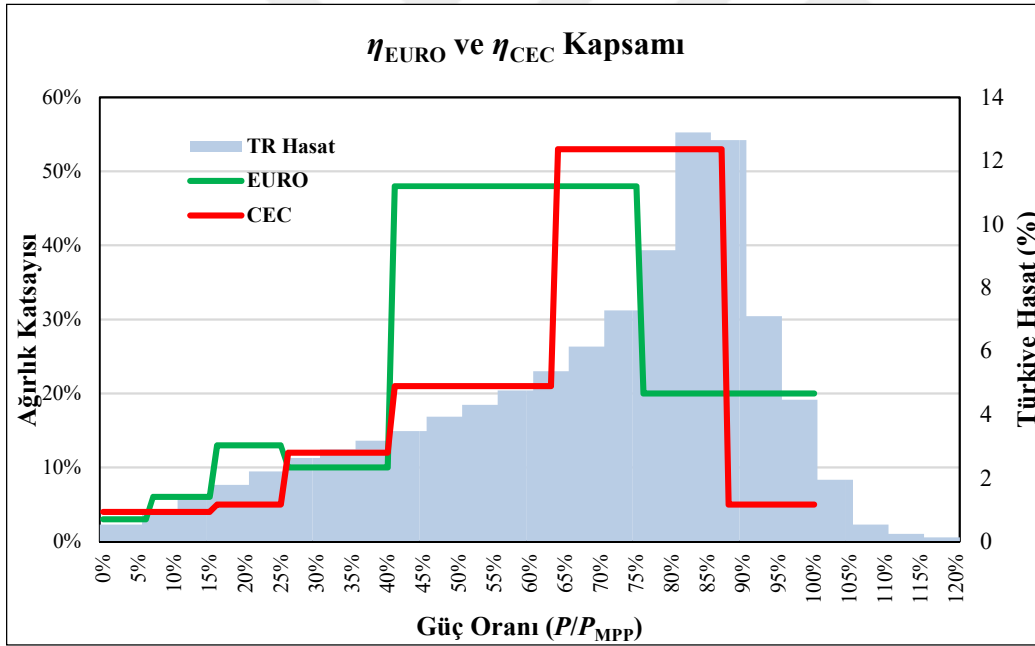
Önceki bölümde elde edilen yıllık enerji dağılımı ve yıllık hasat dağılımı, Şekil 5.1’de bir arada görülmektedir. Işınımına göre enerji dağılımı (a) incelendiğinde, en çok enerji yüzdesine sahip olan aralığın (950 W/m^2) yıllık toplam enerjinin %13’ünü içerdiği görülmektedir. Modül yüzeyine ulaşan yıllık toplam enerjinin yaklaşık yarısı, $800\text{--}1000 \text{ W/m}^2$ aralığındaki yüksek ışınım değerlerinde gelmektedir. Daha yüksek ışınım bölgesinin toplam gelen enerji içindeki payı %10 ve daha düşük-orta ışınım bölgesinin payı da (düşük ışınım bölgesine doğru azalarak) yaklaşık %40 gibi görülmektedir.

FV dize MPP gücüne göre dağılım grafiğinde (b), en çok üretim yapılan güç aralığının tek başına ($0,8P_{MPP} - 0,9P_{MPP}$) yıllık üretimin yaklaşık dörtte birini sağladığı görülmektedir. FV dize MPP gücünün %75’i ile %95’i arasındaki hasat, yıllık toplam hasadın yarısını sağlamaktadır. Anma gücünün daha üstündeki üretimlerin yıllık hasat içindeki payı %5’in altında iken, $0,75P_{MPP}$ ve altındaki güçlerde elde edilen hasadın oranı da toplam hasadın %23’ü kadardır.

Bu grafikler arasında birebir bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamakla birlikte, çok benzer bir formu yineledikleri için, aralarında güçlü bir ilişki olduğunu söylemek mümkündür. Yüksek ışınım bölgesinde yüksek ışınımında ($950\text{--}1000$

W/m^2) gelen enerjinin, sıcaklık etkisi nedeniyle tümüyle hasada dönüştürülemediği, bunun hemen altındaki ışınlam bandında (muhtemelen bahar aylarındaki yüksek ışınlı nispeten serin günler) gelen enerjinin ise gayet verimli biçimde hasada dönüştürülebildiği söylenebilir. Düşük ışınlam değerlerinde elde edilen güç değerlerinin, ışınlam değeri ile nispeten doğrusal ilişkisi de açıkça görülmektedir.

Bu değerlendirmeler ışığında, İzmir şartlarında çalıştırılan bir FV güç sistemindeki eviricinin, daha önce geliştirilmiş olan ağırlıklı verim modellerinde öngörülenden çok daha fazla oranda yüksek güç değerlerine maruz kalarak çalışacağı ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.2'de, η_{EURO} ve η_{CEC} ağırlıklı verim modellerinde kullanılan güç bölgesi ağırlık katsayıları ve bunların kapsamaları ile İzmir şartlarında çalışan bir FV eviricinin maruz kalacağı güç dağılımı grafik olarak bir arada sunulmuştur. Görüldüğü gibi verim değerlendirme ağırlığı CEC modelinde daha yüksek güç değerlerine doğru kaymış ve değerlendirme aralıkları EURO modeline göre nispeten daha eş dağılımlı hale gelmiştir.



Şekil 5.2 η_{EURO} ve η_{CEC} ağırlıklı verim modellerinin katsayı kapsamaları ve İzmir hasat dağılım profiline karşılaştırılması

Özellikle (Kuzey) Avrupa iklim şartlarına göre hesaplanmış ve % 45–75 güç aralığında en yüksek değerinde olan η_{EURO} modelinin değerlendirme kapsamı, İzmir hasat profilinden belirgin biçimde sapsmış durumdadır. En yüksek hasat katkısı bölgesi η_{EURO} değerlendirme kapsamının oldukça dışında kalan **İzmir şartlarında, η_{EURO} katsayılarının doğru tahminleme yapamayacağı** açıkça görülmektedir. Bu

kadar büyük olmamakla birlikte, η_{CEC} modelinin de İzmir hasat değerlendirmesinde kullanılabilmesi için bir revizyona ihtiyaç duyduğu açıktır.

5.1 Yeni Katsayıların Belirlenmesi

η_{EURO} ve η_{CEC} ağırlıklı verim hesaplama modellerinde kullanılan ağırlıklandırma katsayıları ile bu katsayılarla ilişkin kısmi MPP aralıkları, Çizelge 2 ve Çizelge 3'te görülmektedir (TS EN 50530 2010).

Çizelge 2 η_{EURO} tahminleme modeli için katsayılar ve kısmi MPP aralıkları

Ağırlıklandırma çarpanı	aEU1	aEU2	aEU3	aEU4	aEU5	aEU6
		0,03	0,06	0,13	0,1	0,48
MPP1	MPP2	MPP3	MPP4	MPP5	MPP6	
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,5

Çizelge 3 η_{CEC} tahminleme modeli için katsayılar ve kısmi MPP aralıkları

Ağırlıklandırma çarpanı	aCEC1	aCEC2	aCEC3	aCEC4	aCEC5	aCEC6
		0,04	0,05	0,12	0,21	0,53
MPP1	MPP2	MPP3	MPP4	MPP5	MPP6	
		0,1	0,2	0,3	0,5	0,75

İzmir şartları için ağırlıklı verim hesaplama modelinin hasat yüzdesi aralıkları ve katsayılarının belirlenmesinden önce, mevcut modellerde kullanılmış olan örnekleme aralıkları kullanılarak, bu modellerin İzmir şartlarına uyarlanmasının sayısal ifadesini oluşturmak üzere yeni katsayılar hesaplanmıştır. Buradan elde edilecek melez modeller, bu çalışma kapsamında η_{EURO} -İZMİR ve η_{CEC} -İZMİR olarak adlandırılmıştır.

Öncelikle her iki modelde öngörülen bütün kısmi güç aralıkları için, hesaplanmış olan İzmir hasat değerleri kullanılarak kısmi hasat miktarları belirlenmiştir. Daha sonra da bu değerlerin toplam yıllık hasada oranları bulunarak kısmi güç aralıklarına karşılık gelen ağırlıklandırma katsayıları belirlenmiştir.

İzmir ışınım ve sıcaklık ölçümlerine göre η_{EURO} ve η_{CEC} kısmi güç aralıkları için elde edilen katsayılar sırasıyla Çizelge 4 ve Çizelge 5'te kırmızı renkli olarak

gösterilmiştir. Çizelgelerde ayrıca katsayılar arasındaki farklar yüzdelik olarak da belirtilmiştir.

Çizelge 4 İzmir şartları için η_{EURO} katsayıları

	aEU1	aEU2	aEU3	aEU4	aEU5	aEU6
Ağırlıklandırma çarpanı	0,03	0,06	0,13	0,1	0,48	0,2
	0,01	0,02	0,04	0,09	0,35	0,49
Sapma Miktarı (%)	75	75	76	53	58	29
	MPP1	MPP2	MPP3	MPP4	MPP5	MPP6
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1

Eşitlik 28

$$\eta_{EURO-İZMİR} = 0,01\eta_{\%5} + 0,02\eta_{\%10} + 0,04\eta_{\%20} + 0,09\eta_{\%30} + 0,35\eta_{\%50} + 0,49\eta_{\%100}$$

Eşitlik 28’de görülen $\eta_{EURO-İZMİR}$ melez modelinde, düşük ışınım bölgesindeki katsayıların, EURO katsayılarının ancak üçte biri kadar olduğu görülmektedir. Yüksek güç aralıklarında bile bu fark ancak %29’a gerilemektedir. Buna göre η_{EURO} modelinin İzmir şartlarında evirici verimi değerlendirmek için uygun olmadığı ortaya çıkmaktadır.

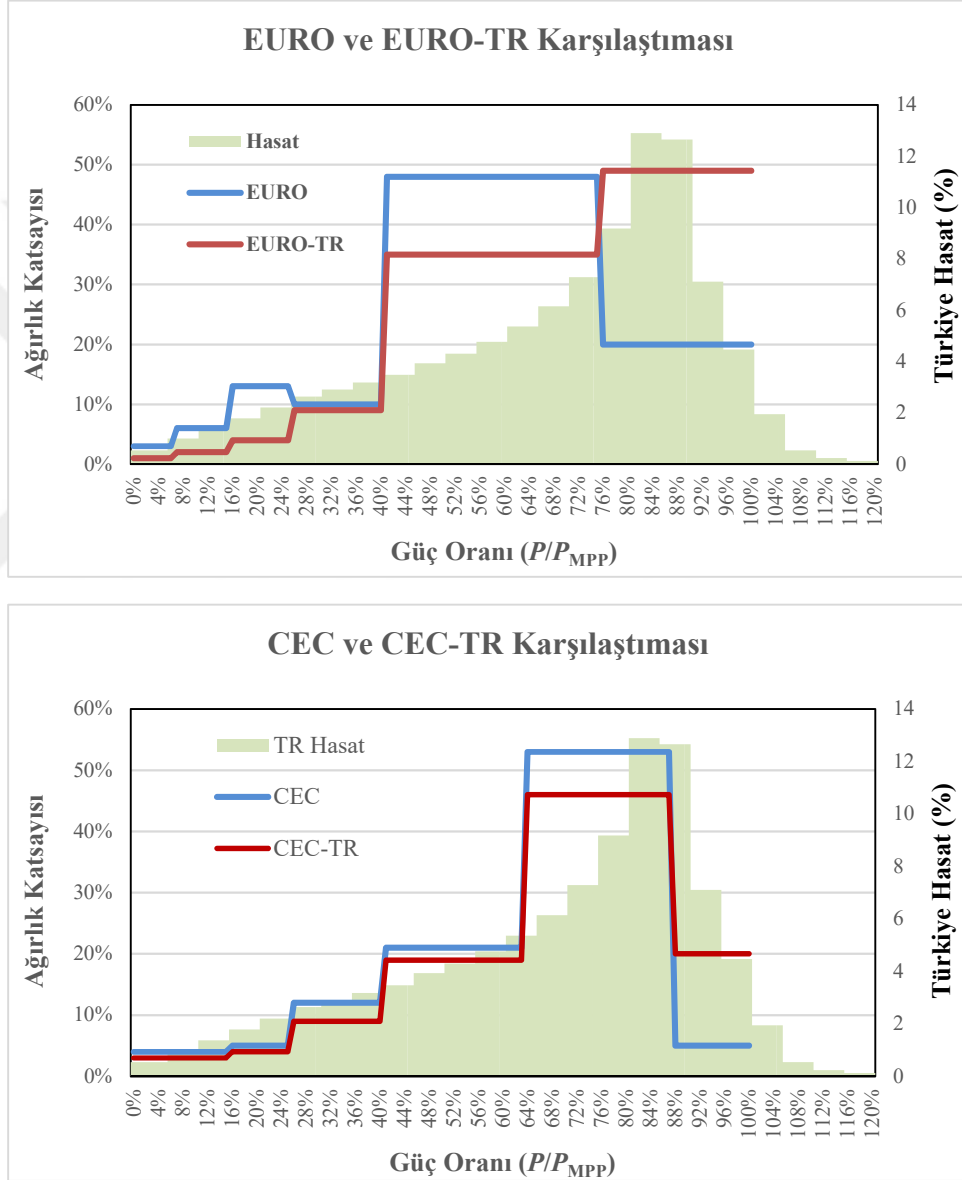
Çizelge 5 İzmir şartları için η_{CEC} katsayıları

	aCEC1	aCEC2	aCEC3	aCEC4	aCEC5	aCEC6
Ağırlıklandırma çarpanı	0,04	0,05	0,12	0,21	0,53	0,05
	0,03	0,04	0,09	0,19	0,46	0,2
Sapma Miktarı (%)	57%	56%	57%	53%	54%	20%
	MPP1	MPP2	MPP3	MPP4	MPP5	MPP6
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1

Benzer biçimde, Eşitlik 31’deki $\eta_{CEC-İZMİR}$ melez modelinde de, EURO modeline göre daha az olmakla birlikte, %57’den %20’ye kadar değişen sapmalar gözlenmektedir.

$$\eta_{CEC-İZMİR} = 0,03\eta_{\%10} + 0,04\eta_{\%20} + 0,09\eta_{\%30} + 0,19\eta_{\%50} + 0,46\eta_{\%75} + 0,2\eta_{\%100}$$

İzmir Menemen veri seti kullanılarak elde edilen bu *melez* ağırlıklandırma katsayılarının (CEC-TR ve Euro-TR), Euro ve CEC modellerindeki ağırlık katsayıları ve MPPT güç aralıkları ile karşılaştırılması Şekil 5.3'te grafiksel olarak sunulmaktadır.



Şekil 5.3 Euro ve CEC ağırlıklı verim modellerinde kullanılan güç yüzdesi aralıkları için İzmir veri seti kullanılarak elde edilen katsayılar

Sunulan karşılaştırma grafikleri incelendiğinde, EURO ağırlıklandırmasında özgün ağırlıklandırma katsayılarının olduğu kadar, MPPT güç aralıklarının da İzmir

hasadı ile özellikle yüksek güç değerlerinde uyumsuz olduğu görülmektedir. Katsayı değişimi ile bu kaymanın bir miktar düzeltilmesi mümkün olmakla birlikte, kabul edilir bir kapsama gerçekleştirilemeyeceği söylenebilir.

CEC ağırlıklandırma modelindeki aralıklar ve katsayılar, İzmir hasat profiline nispeten daha uygun görünmektedir. Bununla birlikte, %60–75 aralığının vurgusunun azaltılarak, hasat profilini daha iyi kapsayan yeni bir aralık belirlenmesinin uygun olacağı söylenebilir.

Bir FV sistemdeki eviricinin, düşük güçlerde ürettiği enerjinin yıllık toplam üretim içindeki payı düşüktür. Bu nedenle eviricilerin düşük ışınım altında çalışma verimlerinin, dinamik verim üzerindeki etkisi çok fazla olmaz ancak, doğruluk adına, düşük güç verimlerinin de hasat içindeki payları oranında ağırlıklı verim hesabında bulunması gereklidir. Bununla birlikte hasat tahminleme doğruluğu açısından bu bölgede fazlaca bir ayrıntılandırmaya ihtiyaç bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, ağırlıklı verim hesaplanmasında kullanılan katsayıların ve bunların kapsam aralıklarının belirlenmesinde;

- CEC ve EURO aralıklarının hepsi
- CEC ve EURO ortak aralıklar
- Çok sayıda eşit güç aralıkları
- Eşit hasat dağılımlı aralıklar
- $P_{MPP}/P_{dc,r}$ oranına göre eşit dağılımlı aralıklar
- Hasatın doğrusal değiştiği aralıklar

yaklaşımları dikkate alınmıştır.

Burada sıralanan yaklaşımlardan ilk ikisi, EURO ve CEC modellerinin önceki bölümlerde de incelenmiş olan sorunları ve bunların İzmir iklim şartlarına tam uyum sağlamıyor olması nedeniyle, yeni katsayıların belirlenmesi sürecinde değerlendirmeye alınmamıştır.

5.1.1 *İZMİR* versiyon.1: Çok aralıklı model

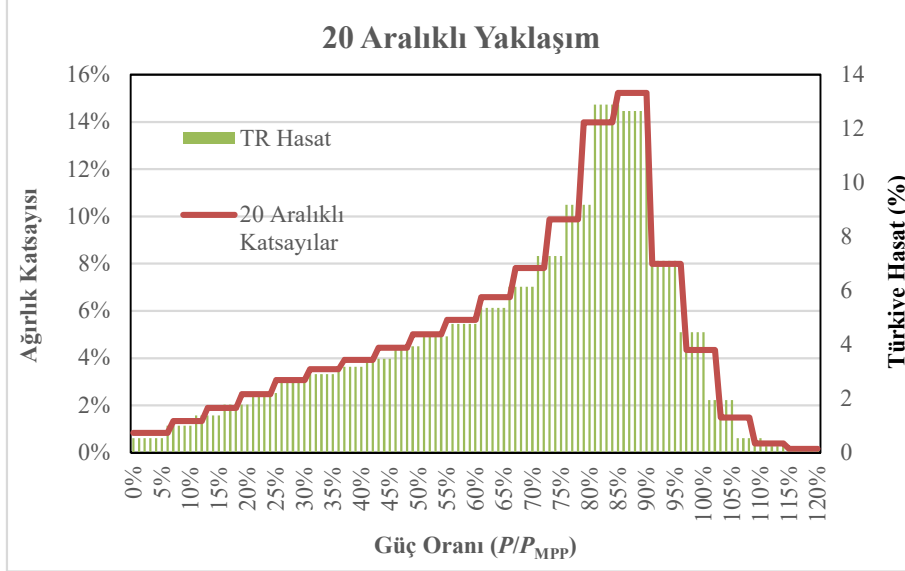
Çok sayıda güç oranı aralığı üzerinde yapılacak bir çalışma, fotovoltaik eviricilerin farklı giriş gücü aralıkları için verim değerlerinin ayrıntılı ve yüksek doğruluklu değerlendirmesi için temel olarak kullanılabilir. Ancak görülebildiği gibi bu yaklaşım, gerçek uygulamasında hesaplamalarda ve ölçme işlemlerinde zorluklar ortaya çıkarabileceği için tercih edilmemiştir.

Bununla birlikte genel bir izlenim sağlaması için İzmir şartlarında 20 eşit güç aralıklı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar sonucu güç aralıklarına ilişkin bulunan ağırlık katsayıları ve bu katsayılar göre birikimli yıllık hasat yüzdeleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6 İzmir şartlarında çalışan bir eviricinin farklı giriş güçlerindeki veriminin toplam üretim içindeki ağırlıkları

Kısmi MPP gücü $P_{MPP,FVS}/P_{dc,r}$	Katsayı	Birikimli Hasat (%)
0,05	0,005	1
0,1	0,01	2
0,15	0,014	3
0,2	0,018	5
0,25	0,022	7
0,3	0,026	10
0,35	0,029	14
0,4	0,032	18
0,45	0,034	22
0,5	0,039	27
0,55	0,043	33
0,6	0,048	39
0,65	0,054	47
0,7	0,061	57
0,75	0,073	71
0,8	0,092	86
0,85	0,13	94
0,9	0,13	99
0,95	0,071	100
1	0,069	100

Şekil 5.4'te, Çizelge 6'daki değerler kullanılarak elde edilmiş olan ve İzmir hasat profilini temel alan tam kapsamlı ağırlık değişimi, verilmiştir. Bu gösterimde, eviricinin dc anma gücüne oranla ışınım kaynaklı dc giriş gücü değerlerine göre, her bir aralığın yıllık hasada katkı durumu görülmektedir.



Şekil 5.4 İzmir FV hasat profilini temel alan ağırlık katsayıları (Toplam hasadın dağıldığı güç aralığı yirmi eşit parçaya bölünmüştür)

Analiz sonucunda elde edilen ve hasada katkı sağlayan bütün aralıklara ait yirmi katsayı kullanılarak oluşturulan ve bundan sonraki diğer modellerin kontrolü amacıyla kullanılacak referans *İzmir Ağırlıklı Verim Eşitliği* Eşitlik 30'da görülmektedir. Burada terim sayısını yirmi ile sınırlamak için yıllık hasadın yaklaşık %1'ini sağlayan tam güç üzerindeki aralıklar, tam güç katsayısına dâhil edilmiştir.

Eşitlik 30

$$\begin{aligned} \eta_{İZMİR1} = & 0,005\eta_{\%5} + 0,01\eta_{\%10} + 0,014\eta_{\%15} + 0,018\eta_{\%20} + 0,022\eta_{\%25} \\ & + 0,026\eta_{\%30} + 0,029\eta_{\%35} + 0,032\eta_{\%40} + 0,034\eta_{\%45} \\ & + 0,039\eta_{\%50} + 0,043\eta_{\%55} + 0,048\eta_{\%60} + 0,054\eta_{\%65} \\ & + 0,061\eta_{\%70} + 0,073\eta_{\%75} + 0,092\eta_{\%80} + 0,13\eta_{\%85} + 0,13\eta_{\%90} \\ & + 0,071\eta_{\%95} + 0,069\eta_{\%100} \end{aligned}$$

Bu analizde, İzmir şartlarında çalıştırılan bir FV güç sisteminde, yıllık hasadın %10'unun evirici anma gücünün %40'ına kadar olan güç aralığında geldiği görülmektedir. Benzer biçimde yıllık hasadın %10'unun da eviricinin anma gücünün üzerinde çalıştığı zamanlarda elde edildiği görülmektedir. Buna göre yıllık hasadın %80'lik bölümü, eviricinin anma gücü ile %40'ı arasında elde

edilmektedir. Buna göre eşit aralıklı bir ağırlıklandırma modelinin, yıllık hasat belirlenmesinde kullanılmasının gerekli olmadığı, hasat aralıklarına göre başka bir değerlendirme yapmanın uygun olabileceği düşünülebilir.

5.1.2 $\eta_{IZMİR}$ versiyon.2: Eşit hasat aralıklı model

İkinci yaklaşım olarak, yıllık hasadın eşit aralıklı yüzdelerle ayrılmış bir model değerlendirilmiştir. Bu durumda, yıllık hasadın her beşte birlik kısmının hangi MPP gücü/anma gücü aralığında elde edildiği sorgulanarak Çizelge 7 'de görülen değerler elde edilmiştir. Buradaki yaklaşım, %20'lik hasat değerini sağlayan aralığın aritmetik ortalamasının, o grubun $P_{MPP}/P_{dc,r}$ değeri olarak alınmasına dayanmaktadır. Örneğin, hasadın üçüncü %20'lik dilimini sağlayan %73 değeri, bu hasadı sağlayan $P_{MPP}/P_{dc,r}$ oranı %67–79 olan güç aralığının orta noktasıdır.

Çizelge 7 Eşit hasat aralıklı model için güç aralığı değerleri

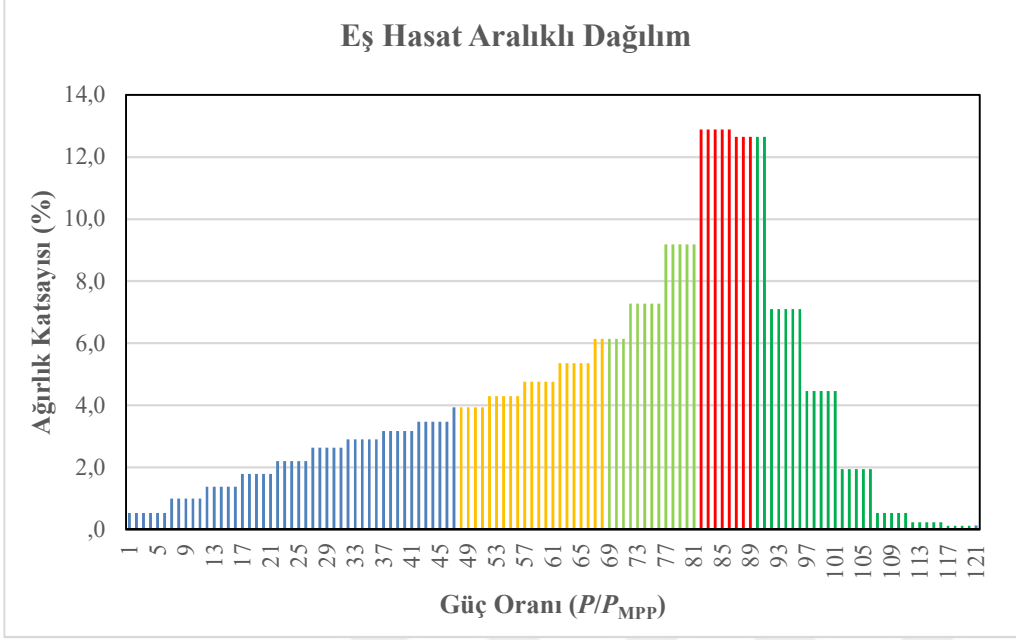
$P_{MPP}/P_{dc,r}$	Katsayı	Birikimli Hasat(%)
(%0 - %47) 0,24	0,20	19,93
(%47 - %68) 0,58	0,20	39,92
(%68 - %81) 0,75	0,20	60,06
(%81 - %89) 0,85	0,20	80,54
(%89 - %120) 1,05	0,20	99,98

Her aralıktaki değişimin doğrusal olduğu yaklaşımıyla, kullanılan her bir aralık için ortalama güç oranı değeri, bu grubu temsil ediyor denebilir. Burada bütün aralıklar hasada göre eşit dağılımlı olduğu için her birisi için verim belirleme katsayıları da eşit olacaktır. Bu durumda ağırlıklı verim için Eşitlik 31'de sunulan eşitlik yazılabilir.

Eşitlik 31

$$\begin{aligned}\eta_{IZMİR2} &= 0,2\eta_{\%25} + 0,2\eta_{\%58} + 0,2\eta_{\%75} + 0,2\eta_{\%85} + 0,2\eta_{\%100} \\ &= 0,2 \cdot (\eta_{\%25} + \eta_{\%58} + \eta_{\%75} + \eta_{\%85} + \eta_{\%100})\end{aligned}$$

Elde edilen bu anlık güç/anma gücü değerlerinin İzmir şartlarındaki yıllık hasat içindeki dağılımı Şekil 5.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, eşit miktarlardaki hasat, farklı güç oranı aralıklarındaki çalışma bölgelerinde elde edilmektedir.

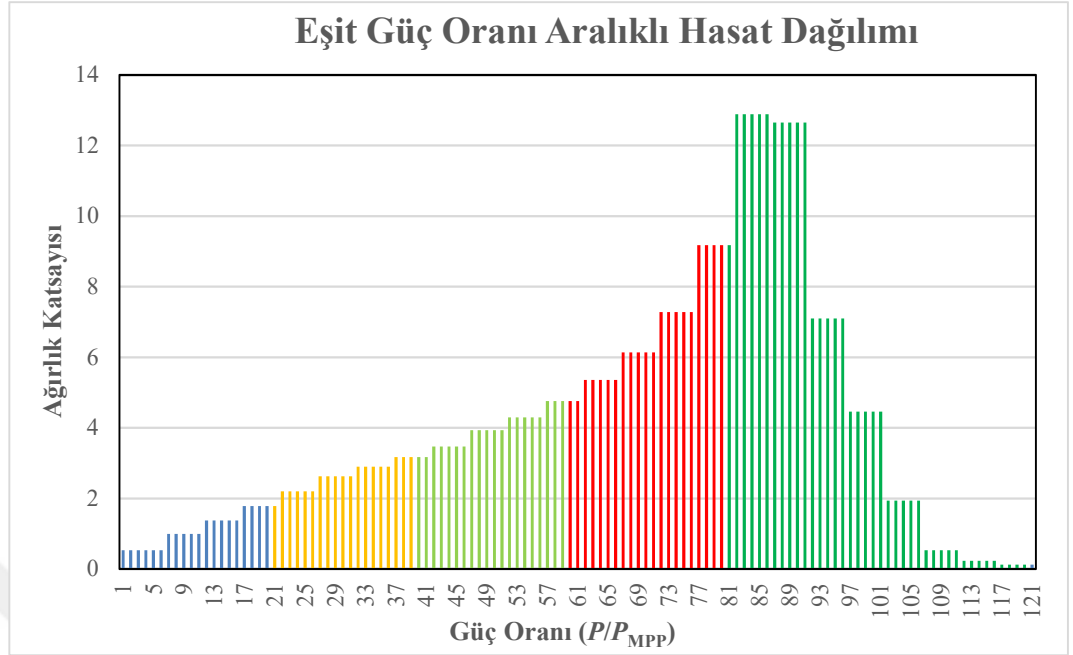


Şekil 5.5 Her biri yıllık hasadın %20'sini üreten güç oranı aralıkları renk ayrımları ile belirtilmiştir

5.1.3 η İZMİR versiyon.3: Eşit güç oranı aralıklı model

İncelenebilecek başka bir değerlendirme yöntemi de eşit güç oranı aralıklı bir ağırlıklandırma çalışmasıdır. Burada eviricinin anma gücünün çalışma gücü oran aralıkları yine beş eşit gruba ayrılarak üretime katkıları açısından bir değerlendirme yapılacaktır. Bu güç aralıklarını temsil etmek üzere, daha önceki yaklaşıma benzer olarak gösterimde grup medyanları seçilecektir. Farklı olarak en yüksek aralık için, yıllık hasadın %3'ünü üstlenen %100'ün üzerindeki güç aralıklarını da kapsamak üzere tam güç değeri ($P_{MPP}/P_{dc,r}=1$) seçilmiştir.

Bu yaklaşımda temel alınan anlık güç/anma gücü değerlerinin İzmir şartlarındaki yıllık hasat içindeki dağılımı Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, eşit güç aralıkları, farklı hasat miktarlarına karşılık gelmektedir.



Şekil 5.6 Evirici çalışma güç oranlarının eşit aralıkları renk ayrımları ile belirtilmiştir (Yıllık hasadın %2 kadarına karşılık gelen tam güç üzerindeki oranlar da tam güç aralığı kapsamında değerlendirilmiştir)

Sayılan yaklaşımlar temel alınarak hasat verileri üzerinde yapılan istatistiki değerlendirme sonucunda elde edilen ağırlık katsayıları Çizelge 9'de görülmektedir.

Çizelge 8 $\eta_{IZMİR}$ versiyon.3 için güç aralıkları ve ağırlık katsayıları

$P_{MPP}/P_{dc,r}$ Aralığı (%)	0-20 (10)	21-40 (30)	41-60 (50)	61-80 (70)	81-100 (100)
Ağırlık Katsayısı	0,05	0,11	0,16	0,28	0,4

Burada sunulan sonuçları temel alan ağırlıklı verim değerlendirme modeli Eşitlik 32'de görülmektedir.

Eşitlik 32

$$\eta_{IZMİR3} = 0,05\eta_{\%10} + 0,11\eta_{\%30} + 0,16\eta_{\%50} + 0,28\eta_{\%70} + 0,4\eta_{\%100}$$

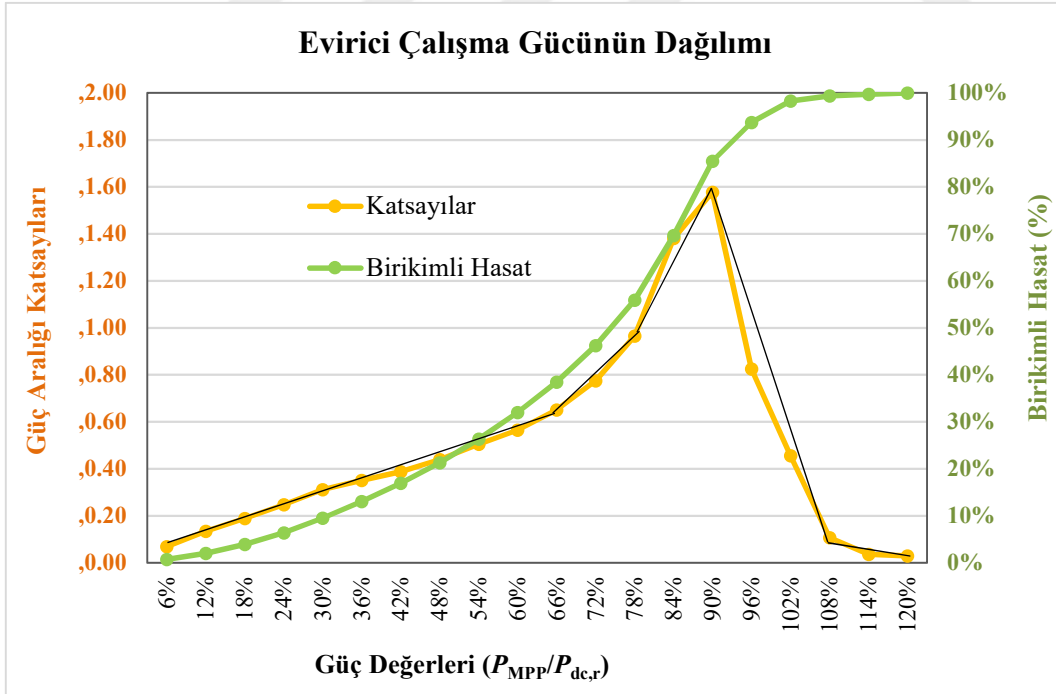
Buradan da açıkça görüldüğü gibi, η_{EURO} formülünde altı katsayıdan dördü kullanılarak ayrıntılı biçimde dikkate alınan düşük güçlerin (0,05-0,1-0,2-0,3),

yıllık hasat içindeki payı sadece % 16 kadardır. Aynı aralık η_{CEC} formülünde de üç adımda (0,1-0,2-0,3) kapsamıştır. Bu aralığın bu biçimde ayrıntılandırılmış olması, hasat tahminlemesi üzerinde anlamlı bir etki oluşturmamaktadır. Dolayısı ile ağırlıklı verim değerlendirmesinde düşük güçler için tek bir terim kullanılması, modelin basitleştirilmesi açısından dikkate alınabilir ve uygulanabilir bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır.

5.1.4 $\eta_{İZMİR}$ versiyon.4: Doğrusal değişimli aralıklar modeli

Önceki modellerde elde edilen bulgular değerlendirilerek, düşük güç aralığındaki verime tek bir ağırlık ayıran ve yıllık hasadın %2'den daha azını sağlayan normalüstü güç aralığı için özel bir katsayı içermeyen bir model burada sunulmaktadır. Şekil 5.7'de İzmir şartlarında çalıştırılan bir eviricinin çalışma güç aralıklarının yıllık hasat paylarını gösteren katsayılar ile birikimli yıllık hasat değerleri bir arada görülmektedir.

Şekil 5.7'de görülen grafik üzerinde yıllık üretime katkı değişiminin yaklaşık olarak doğrusal biçimde gerçekleştiği bütün aralıklar ayrı ayrı istatistiki olarak değerlendirilmiştir. % 40 P_{MPP} değerine kadar doğrusal değişen ve yıllık hasadın % 16'sını karşılayan çalışma bölgesi, η_{EURO} modelinde dört ve η_{CEC} modelinde üç



Şekil 5.7 İzmir iklim şartlarında FV eviricinin MPP gücünün dize anma gücüne oranına göre hasat dağılım katsayıları ve birikimli hasat değerleri

terimle ifade edilmektedir. Söz edilen bu çalışma bölgesi bu modelde, %60'a kadar olan güç oranları için tek bir ağırlık katsayısı ile kapsanmıştır.

Yıl içinde çok nadir gerçekleşen ve toplam hasada %1,5 kadar katkı sağlayan yüksek güç değerlerinin etkisi, yeni bir terim kullanmaktansa en yüksek güç aralığı kapsamı içerisinde değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmeler sonucunda, değişiminin yaklaşık doğrusal olduğu ve grafikte ince siyah çizgilerle gösterilen aralıklar için, Çizelge 9'da verilen değerler elde edilmektedir.

Çizelge 9 η_{IZMIR} versiyon.2 için güç aralıkları ve ağırlık katsayıları

$P_{MPP}/P_{dc,r}$ Aralığı (%)	0-60 (40)	65-80 (75)	80-90 (85)	90-110 (100)
Ağırlık Katsayısı	0,32	0,24	0,29	0,15

Burada sunulan sonuçları temel alan ağırlıklı verim değerlendirme modeli Eşitlik 33'te görülmektedir. Aralıkları temsil eden güç değerleri, her bir aralığın istatistiki olarak en ağırlıklı değeri olarak belirlenmiştir.

Eşitlik 33

$$\eta_{IZMiR4} = 0,32\eta_{\%40} + 0,24\eta_{\%75} + 0,29\eta_{\%85} + 0,15\eta_{\%100}$$

Bu bölümde elde edilmiş olan ağırlıklı verim belirleme modelleri, bir sonraki bölümde açıklanmış olan denemelerde EURO ve CEC modelleri ile birlikte, çeşitli ticari eviriciler ile yapılacak olan verimlilik ölçmeleri üzerinden karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

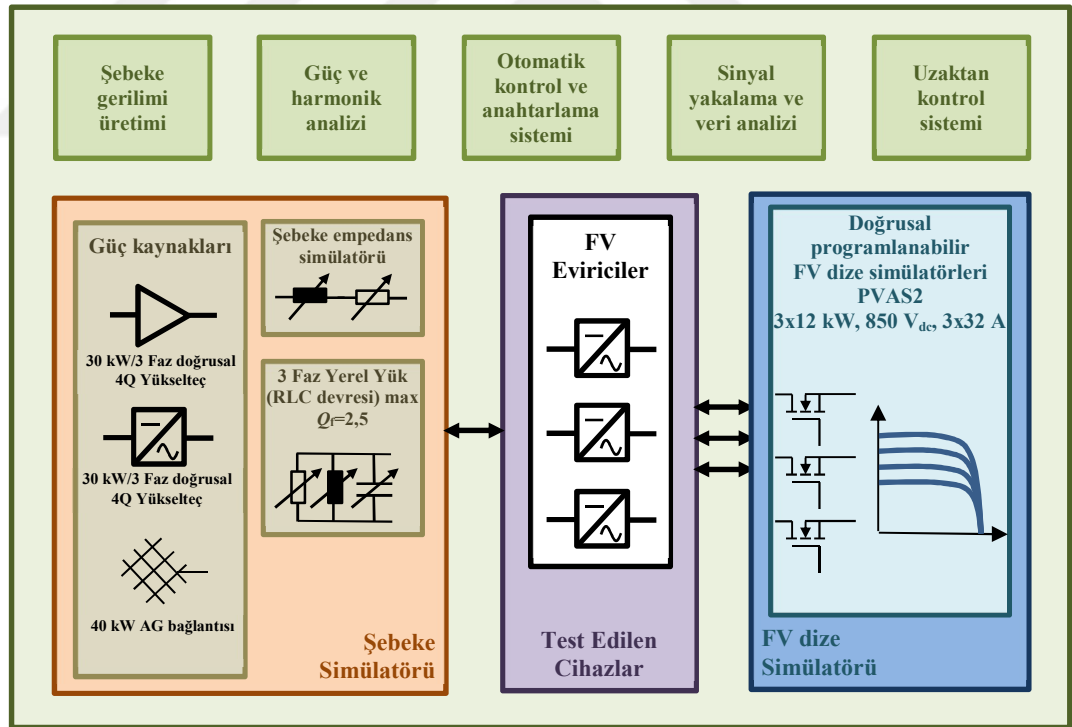


6. DENEMELER

Önceki bölümde elde edilen katsayıların gerçek sistemler ve ticari FV eviriciler üzerinde test edilmesi için, doktora tez çalışmasında denemelerin yapıldığı tarihte, Türkiye’de erişilebilir ve yeterli bir altyapı bulunmamaktadır. Bu nedenle test ve karşılaştırma çalışmaları, Avrupa 7. Çerçeve Kapasiteler çağrısı kapsamında desteklenen 228449 sayılı *DERri – Distributed Energy Resources Infrastructures* projesi kapsamında, Avusturya Teknoloji Enstitüsü (AIT – Austrian Technology Institute) FV Evirici Deneysel Laboratuvarlarında yürütülmüştür.

6.1 Laboratuvar Altyapısı

AIT²⁷ FV Evirici Test Laboratuvarlarının DERri kapsamında akademik çalışmalar için kullanıma sunduğu altyapının blok şeması Şekil 6.1’de görülmektedir. Bu kurulumdaki FV dize simülatörleri, şebeke simülatörü ve RLC yük devreleri AIT tarafından üretilmiş özgün cihazlardır.



Şekil 6.1 AIT FV Evirici Deneysel Laboratuvarının donanımsal alt yapısı

²⁷ Austrian Institute of Technology – Avusturya Teknoloji Enstitüsü, Viyana.

Bu çalışmada yer alan denemelerin ve TS EN 50530 standardına uygun evirici dönüştürme verimi ölçmelerinin gerçekleştirildiği AIT FV Evirici Deney Laboratuvarındaki bu kurulumda kullanılan temel donanım aşağıda listelenmiştir.

1. ac – Simülatör: 3 fazlı doğrusal 4 Q 30 kVA yükselteç (Üretici: Spitzenberger+Spies)
2. Şebeke empedansı simülatörü: 3 fazlı RL şebeke empedans simülatörü (Üretici: AIT/Arsenal)
3. RLC devre: 3 fazlı RLC otomatik adalanma belirleme deneyleri için rezonans devresi (Üretici: AIT/Arsenal)
4. FV Dize simülatörü (PVAS2): Kullanıcı tanımlı IV eğrilerini üretebilen, üç ayrı 1 00 V–36 kW FV dize (Üretici: AIT/Arsenal)
 - a. $V_{dc,min/max}$: 0–1 000 V (giriş gerilimi)
 - b. $I_{dc,max}$: 3x32 A/f (IV -eğrisi şekli)
 - c. $P_{dc,max}$: 3x12 kW (anma dc gücü)
5. Güç Analizörü (Ürün: NORMA D6000)
6. Sayısal Osiloskop (Ürün: Yokogawa DL716)

Standart kuruluşlarınca kabul edilen deneyler yapmak üzere ISO 17025 akreditasyonu bulunan AIT FV evirici test laboratuvarlarında, bu çalışmanın denemeleri için gerekli olan uygulamaları da içeren çok sayıda deney gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan belli başlıları aşağıda sıralanmıştır:

- FV eviricilerin farklı üretim şartları (dc gerilim/güç) altında dönüştürme verimleri belirlenmektedir. Deneylerde EURO, CEC ve en yüksek verimler belirlenerek, deneye tabi eviriciye özgü verim eğrileri elde edilmektedir. Laboratuvarın yeterlilikleri, TS EN 50530 tarafından öngörülen temel gereksinimleri aşmaktadır.
- FV eviricilerin farklı FV dize şartları için sabit ve dinamik MPP izleme verimlilikleri belirlenebilmektedir.
- dc tarafta açma /kapama güç değerleri, ac tarafta boşa çalışma güç tüketimleri belirlenebilmektedir.
- TS EN 61000-3-2/ -3-12 standartlarına göre harmonik belirleme deneyleri gerçekleştirilebilmektedir.
- TS EN 61000-4-11/ -6-1/ -4-13 standartlarına göre eviricilerin gerilim çökme ve dalgalanmaları ile harici harmoniklere karşı bağışıklık derecesi belirlenmektedir.

- Farklı yük şartlarında iletim hattı üzerinden ulaşan bozunumların dc ve ac taraflardaki etkileri ölçülebilmektedir.
- Eviricilerin yüksek ortam sıcaklıklarındaki ısıl gerilim azalması ve güç kaybı değerleri belirlenebilmektedir.

Test laboratuvarında kullanılan FV dize simülatörleri, Matlab/Simulink üzerinden denetlenebilmektedir. Böylelikle istenilen ışıyım ve/veya gölgelenme profiline göre oluşturulan IV eğrileri, bağımsız üç FV simülatör ile elde edilebilmektedir. Şebeke simülasyonu ve değerlendirmelerinde DigSILENT ve NEPLAN yazılımları kullanılmaktadır. Bütün deneyler uzaktan erişimli olarak SCADA ile takip edilebilmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

6.2 Deney Tasarımı

Bu çalışmada İzmir iklim şartlarında çalışan bir FV dizenin MPP gücü verilerine dayalı olarak geliştirilmiş olan dört ayrı $\eta_{IZMİR}$ modeli, bu bölümde, TS EN 50530 uyarınca yapılacak ağırlıklı verim değerlendirmesinde kullanılan η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri karşılaştırılmaktadır.

Karşılaştırmada Meteoroloji Genel Müdürlüğü İzmir – Menemen OMGİ veri seti kullanılarak elde edilmiş olan FV dize P_{MPP} değerleri referans alınmıştır. PVAS2 dâhilindeki dize simülatörleri, bu veri setini temel alan IV eğrileri ile kontrol edilerek deneye tabi tutulan eviricilere, İzmir şartlarında çalışan bir eviricinin maruz kalacağı dc güç profilleri uygulanmıştır.

Verim ölçmeleri ve değerlendirmeler için farklı teknik özellikler gösteren piyasadaki sekiz ayrı ticari FV evirici, TS EN 50530 standardında verim belirleme için yapılması öngörülen deneylere tabi tutulmuştur. Bu eviricilerin seçiminde, cihazların tek fazlı, üç fazlı olmaları, farklı sayıda MPP girişleri olması, farklı çalışma gerilim aralıklarını kapsamaları gibi değişik özellikler göstermelerine dikkat edilmiştir. Piyasa dinamiklerine uygun olarak, eviricilerden birisi dışında tümünün transformatörsüz topolojiler kullanılan ürünler arasından seçilmesi tercih edilmiştir. AIT laboratuvarlarında verim ölçme testlerinde kullanılan ve hâlihazırda piyasada bulunan bu FV eviricilerin özellikleri²⁸ Çizelge 10**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da listelenmiştir.

²⁸ Eviricilerin marka ve tipleri ile üreticilerini belirten özellikler, denemelerin yapıldığı kurumun söz konusu üreticiler ile ticari ilişkilerini düzenleyen anlaşmalarda bulunan gizlilik hükümleri nedeniyle, bu çalışma kapsamında belirtilmemiştir.

Çizelge 10 Denemelerde kullanılan eviricilerin temel teknik özellikleri

Evirici Değişken	1	2	3	4	5	6	7	8
İzolasyon transformatörü	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var, Yüksek Frekans
Giriş (dc) Tarafı								
Maks. dc giriş gerilimi (V)	900	1 000	900	800	700	800	550	450
Başlama gerilimi (V)	360 (250-500)	250	250	200	333		100	80
dc çalışma gerilimi aralığı (V)	...850	358...800	410...800	250...720	333...500	350...600	210...500	80...420
dc anma gücü (W)	12 800	12 900	12 300	13 000	11 400			2 150
Bağımsız MPP girişi sayısı	2	3	1	3	1	1	1	2
MPP girişi başına maks. dc giriş gücü (W)	8 000	9 600	13 800	5 500	11 400	3 200	3 000	1 075
Maks/MPP girişi başına dc giriş akımı (A)	36/18	36/12	30	-/13	34		13,5	16/8
Çıkış (ac) Tarafı								
ac Şebeke bağlantısı	3W veya 4W+PE	4W+PE	3 ac	4W+PE	1~	1~	1~	L/N+PE
Anma ac gücü (W)	12 500	11 875	12 400	10 000	11 000	2 600	2 600	2 000
Maks. ac gücü (W, $\cos\phi=1$)	13 800	12 500	12 400	11 000		2 850	2 800	
Maks. ac görünür gücü (VA, $\cos\phi=1$)	13 800	12 500	12 400		11 000			
Anma şebeke gerilimi (V)	400	230/400	400	400	220,230 240		230	
ac gerilimi aralığı (V)	320...480	± 20			180...260		180...270	190...265
Maks. ac çıkış akımı (A)	3x20	3x18,7	3x18,5		48	11,3	13,8	
Anma çıkış frekansı (Hz)	50/60	50/60	50/60	50	50/60	50	50/60	50
Çıkış frekans aralığı (Hz)	47...53 57...63				± 4			47,5...52
Anma güç katsayısı/ aralığı	1/ $\pm 0,9$	>0,99	1/ $\pm 0,9$		1	≈ 1	1	

Gerçekleştirilen laboratuvar denemelerinde her bir evirici, elektriksel çalışma aralıklarına göre belirlenmiş olan farklı dc giriş gerilimlerinde ve uygun bütün kısmi yük değerlerinde teste tabi tutulmuştur. Bu deneylerde elde edilen ölçme sonuçları kullanılarak, her bir evirici için öncelikle maksimum verim (η_{max}) değerleri belirlenmiştir.

Eviricilerin standartta öngörülenlerden daha fazla sayıdaki kısmi güç aralığındaki dönüştürme verimleri belirlenmiştir. Her bir eviricinin dc tarafına, MPPT giriş adedine uygun sayıda dize simülatörü kullanılarak, sıfırdan anma gücünün %120'sine kadar adım adım değiştirilen dc güç değerleri uygulanarak, her bir kısmi güç değeri için ayrı ayrı dönüştürme verimi değerleri belirlenmiştir. Güç değişimi için, $P_{MPP}/P_{dc,r}$ oranını 0,05 ile 1,2 arasında 24 eşit adımda artıran bir deneme deseni kullanılmıştır.

Ölçülen kısmi güç verim değerleri kullanılarak, öncelikle TS EN 50530'da öngörülen η_{EURO} ve η_{CEC} ağırlıklı verim değerleri ve sonra da bu çalışma kapsamında önerilen özgün ağırlıklı modellerin verim değerleri hesaplanmıştır.

6.3 Denemelere Esas Eşitlikler

Denemelerde verim değerlendirme için kullanılan ikisi standart dördü bu çalışmada önerilen toplam altı adet FV evirici ağırlıklı verim modeli aşağıda sıralanmıştır.

6.3.1 η_{EURO}

TS EN 50530'da Kuzey Avrupa iklimi için değerlendirmesi önerilen altı terimli ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 1

$$\eta_{EURO} = 0,03\eta_{\%5} + 0,06\eta_{\%10} + 0,13\eta_{\%20} + 0,1\eta_{\%30} + 0,48\eta_{\%50} + 0,2\eta_{\%100}$$

6.3.2 η_{CEC}

TS EN 50530'da yüksek ışıınım alan iklimler için değerlendirmesi önerilen altı terimli ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 2

$$\eta_{CEC} = 0,04\eta_{\%10} + 0,05\eta_{\%20} + 0,12\eta_{\%30} + 0,21\eta_{\%50} + 0,53\eta_{\%75} + 0,05\eta_{\%100}$$

6.3.3 $\eta_{iZMİR1}$

Bu çalışma kapsamında, ayrıntılı değerlendirme yapmak üzere referans olarak önerilen yirmi terimli ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 10

$$\begin{aligned} \eta_{iZMİR1} = & 0,005\eta_{\%5} + 0,01\eta_{\%10} + 0,014\eta_{\%15} + 0,018\eta_{\%20} + 0,022\eta_{\%25} \\ & + 0,026\eta_{\%30} + 0,029\eta_{\%35} + 0,032\eta_{\%40} + 0,034\eta_{\%45} \\ & + 0,039\eta_{\%50} + 0,043\eta_{\%55} + 0,048\eta_{\%60} + 0,054\eta_{\%65} \\ & + 0,061\eta_{\%70} + 0,073\eta_{\%75} + 0,092\eta_{\%80} + 0,13\eta_{\%85} + 0,13\eta_{\%90} \\ & + 0,071\eta_{\%95} + 0,069\eta_{\%100} \end{aligned}$$

6.3.4 $\eta_{iZMİR2}$

Bu çalışma kapsamında önerilen ve yıllık hasada eşit miktarda katkı yapan kısmi güç aralıkları kullanılarak oluşturulmuş beş terimli ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 11

$$\begin{aligned} \eta_{iZMİR2} = & 0,2\eta_{\%25} + 0,2\eta_{\%58} + 0,2\eta_{\%75} + 0,2\eta_{\%85} + 0,2\eta_{\%100} \\ = & 0,2 \cdot (\eta_{\%25} + \eta_{\%58} + \eta_{\%75} + \eta_{\%85} + \eta_{\%100}) \end{aligned}$$

6.3.5 $\eta_{iZMİR3}$

Bu çalışma kapsamında önerilen ve eşit kısmi güç aralıkları kullanılarak oluşturulmuş beş terimli ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 13

$$\eta_{iZMİR3} = 0,05\eta_{\%10} + 0,11\eta_{\%30} + 0,16\eta_{\%50} + 0,28\eta_{\%70} + 0,4\eta_{\%100}$$

6.3.6 η_{iZMiR4}

Bu çalışma kapsamında önerilen, düşük ve normalüstü kısmi güç aralıklarında ayrıntılandırma yapmayan dört terimli basitleştirilmiş ağırlıklı verim hesaplama modeli.

Denklem 13

$$\eta_{iZMiR4} = 0,32\eta_{\%40} + 0,24\eta_{\%75} + 0,29\eta_{\%85} + 0,15\eta_{\%100}$$

Yukarıda altı altbaşlıkta özellikleri verilerek sıralanmış bu ağırlıklı verim hesaplama modelleri, bir sonraki bölümde sekiz ayrı ticari FV evirici üzerinde gerçekleştirilecek ölçmeler ile sınanmıştır. Her bir evirici TS EN 50530 şartlarını karşılayacak biçimde verim ölçmesine tabi tutulmuş ve bu çalışma kapsamında dört ayrı yaklaşımla oluşturulmuş katsayı setleri içeren dört model için tahminleme doğruluğu incelenmiştir.

6.4 Verim Değişimi Deneyleri

Bu bölümde deneye tabi tutulan sekiz evirici üzerinde yürütülen deneylerin sonuçları sunulmuştur. Her bir evirici, üreticisinin sağladığı ve Çizelge 10'da özetlenmiş olan sınır değerler arasında deneye tabi tutulmuştur.

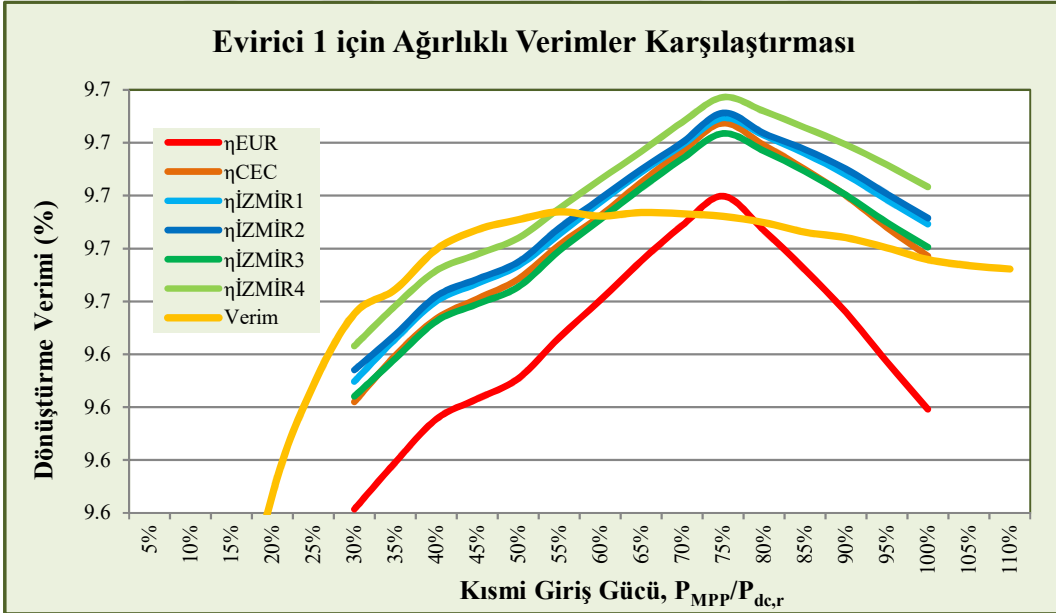
Eviricilerin en yüksek dönüştürme verimi deneyleri, her bir eviricinin MPP takibi yapabildiği dc giriş gerilimi aralığındaki yirmi eşit gerilim adımında gerçekleştirilmiştir. Evirici değerlendirme grafiklerinde “*Verim*” etiketiyle görülen eğriler, söz konusu yirmi gerilim adımından, aralığın ortasına gelen gerilim değeri için elde edilen sonuçları göstermektedir.

Bu verim değişimi eğrileri ile birlikte, her bir evirici için, Bölüm 6.3'te sıralanan bütün ağırlıklı verim belirleme modelleri ile hesaplanan dönüştürme verimi değerleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Grafiklerde, yakın seyreden eğriler arasındaki sapmaları belirgin biçimde göstermek için geniş bir dikey ölçeklendirme tercih edilmiştir.

6.4.1 Evirici 1

İki MPP izleme girişli 12,5 kW_{ac} gücünde üç fazlı ve düşük başlama gerilimi değerine sahip bir eviricidir. Elektrolitik kapasitör kullanmayan gerçek üç faz köprü topolojisine sahiptir. Evirici düşük giriş gerilimlerinde (250 V_{dc}) çalışmaya başlamakla birlikte, ancak 330 V_{dc} giriş geriliminden sonra tam güçte çalışabilmektedir. Eviricinin kullanım kılavuzunda, ancak gücünden yüksek değerlerde yüklenmesine izin verilmediği için ölçmeler tam yük değeri ile sınırlanmıştır.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değışimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Evirici 1 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değışimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 446 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi, %65 kısmi güçte tepe noktasındadır ve değışimi olağan karakteristiğe yakın bir seyir sergilemektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri

- $\eta_{dön}=\%97,8$ (ölçülen $\%96,8$)
- $\eta_{EURO}=\%97,1$ (ölçülen $\%96,9$)
- $\eta_{CEC}=\%97,2$ (ölçülen $\%97,1$)

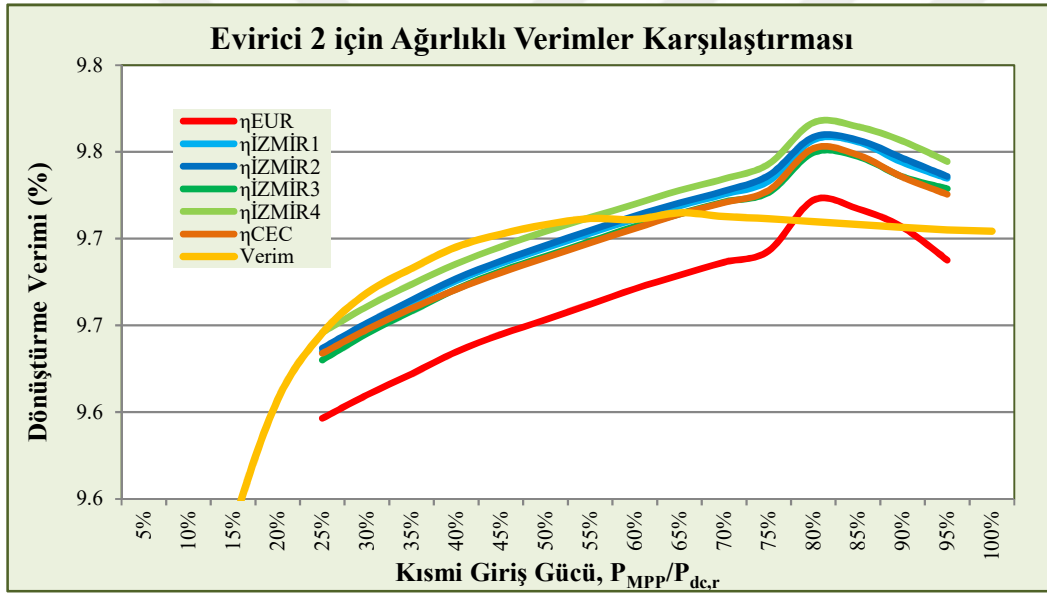
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli, diğerlerinden ortalama $\%0,46$ ile en düşük tahminlemeyi yapmaktadır.
- Birbirine yakın olan η_{CEC} ile $\eta_{İZMİR}$ 'ler arasındaki en yüksek ortalama sapma $\%0,18$ olarak gözlenmiştir.
- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{İZMİR4}$ ile $\eta_{İZMİR3}$ arasında $\%0,18$ olarak gözlenmektedir.
- Eşit güç aralıklı model olarak önerilen $\eta_{İZMİR3}$, η_{CEC} ile neredeyse çakışık olarak izlenmektedir.
- Referans olarak önerilen $\eta_{İZMİR1}$, eşit hasat aralıklı $\eta_{İZMİR2}$ ile çakışık olarak izlenmektedir.

6.4.2 Evirici 2

12,5 kW_{ac} gücünde üç fazlı ve düşük başlama gerilimi değerine sahip transformatörsüz bir eviricidir. 12,9 kW_{dc} giriş gücüne kadar izin verilmiştir. Üç faz köprü topolojisine sahiptir. Evirici düşük giriş gerilimlerinde (250 V_{dc}) çalışmaya başlamakla birlikte, ancak 350 V_{dc} giriş geriliminden sonra tam güçte çalışabilmektedir. Giriş akım sınırlaması, MPP izleyici başına 12 A olarak verilmiştir.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Evirici 2 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 511 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi, %60 kısmi güçte tepe noktasındadır ve değişimi olağan karakteristiğe yakın bir seyir sergilemektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{dön} = \%98$ (ölçülen %97,1)

- $\eta_{\text{EURO}} = \%97,3$ (ölçülen $\%97,2$)
- $\eta_{\text{CEC}} =$ Verilmemiş (ölçülen $\%97,1$)

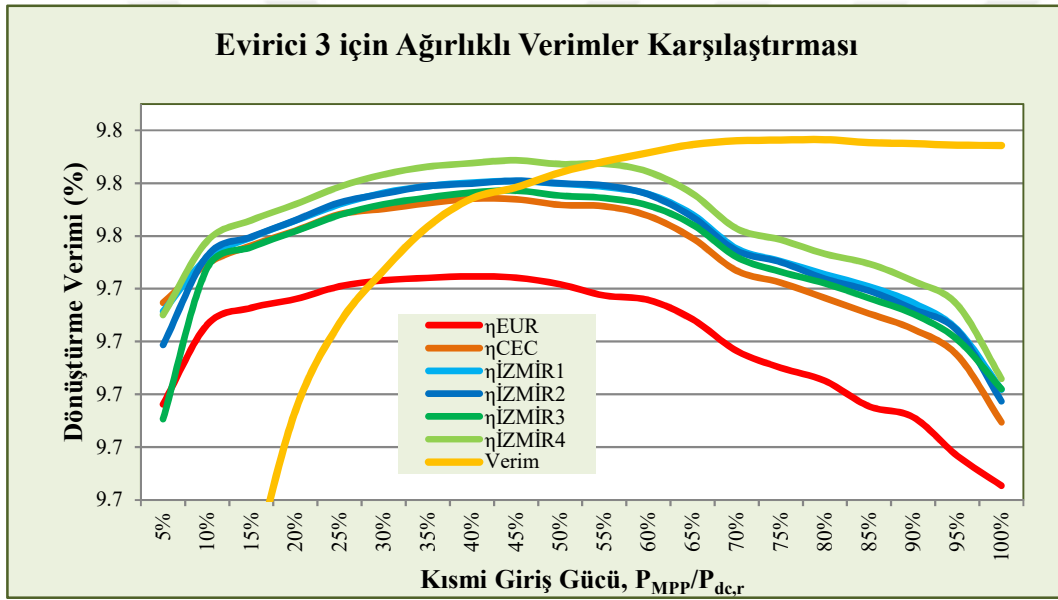
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli diğerlerinden ortalama $\%0,52$ ile en düşük tahminlemeyi yapmaktadır.
- Birbirine yakın olan η_{CEC} ile $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'ler arasındaki en yüksek sapma $\%0,16$ olarak gözlenmiştir.
- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{\text{İZMİR4}}$ ile $\eta_{\text{İZMİR3}}$ arasında $\%0,16$ olarak gözlenmektedir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR1}}$, eşit hasat aralıklı $\eta_{\text{İZMİR2}}$ ile çakışık olarak izlenmektedir.
- Eşit güç aralıklı model $\eta_{\text{İZMİR3}}$, η_{CEC} ile çakışık olarak gözlenmektedir.

6.4.3 Evirici 3

Tek MPP izleme girişli 12 kW_{ac} gücünde üç fazlı bir FV eviricidir. ac anma gücü 12,4 kW olarak da kullanılabilir. 13,8 kW_{dc} değerine kadar giriş gücüne izin verilmiştir. Evirici ancak 330 V_{dc} giriş geriliminden sonra çalışabilmektedir. İzin verilen en yüksek giriş akımı 30 A'dır. Güç devresinde yeni ve özgün bir köprü topolojisi kullanılmıştır.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Evirici 3 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 403 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi, %80 kısmi güçte tepe noktasındadır ve değişimi olağan karakteristiğe yakın bir görünüm sergilemektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{max} = \%98$ (ölçülen $\%97,9$)

- $\eta_{\text{EURO}} = \%97,5$ (ölçülen $\%97,3$)
- $\eta_{\text{CEC}} = \%97,2$ (ölçülen $\%97,1$)

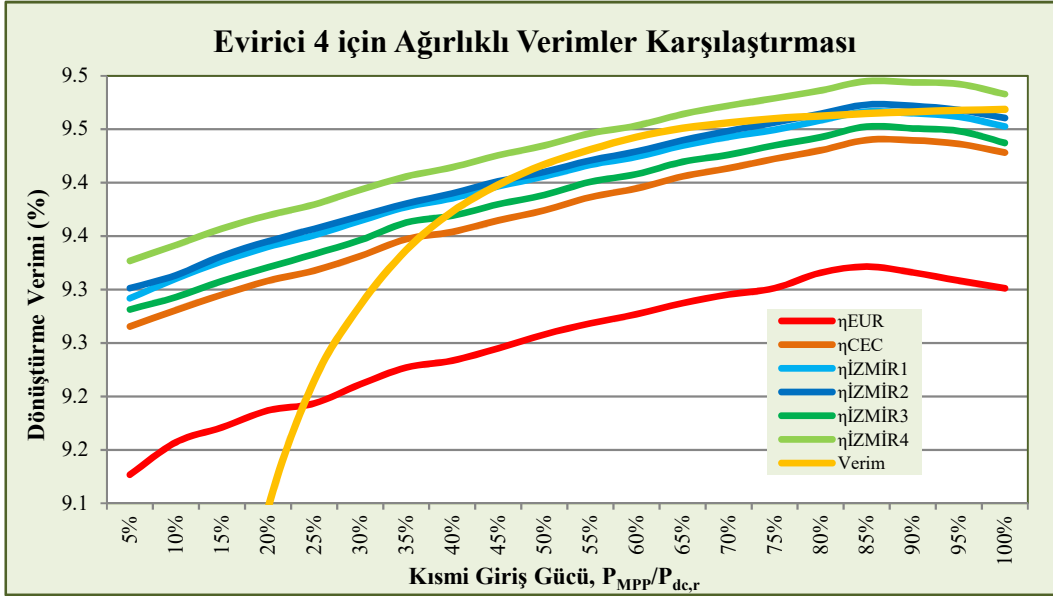
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli en düşük, $\eta_{\text{İZMİR4}}$ ise en yüksek tahminlemeyi yapmaktadır. Aralarında ortalama $\%0,45$ 'lik sapma vardır.
- $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'lerin tümü birbirine ve η_{CEC} 'ye ortalama en fazla $\%0,14$ sapmayla yakın gözlenmiştir.
- Dört terimli basit model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR4}}$, diğer bütün modellerden daha yüksek tahminleme yapmaktadır.
- $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'lerin tümünün ve η_{CEC} modelinin referans modele ($\eta_{\text{İZMİR1}}$) çok yakın oldukları gözlenmiştir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR1}}$, eşit hasat aralıklı $\eta_{\text{İZMİR2}}$ ile çakışık olarak gözlenmiştir.

6.4.4 Evirici 4

Üç bağımsız MPP izleme girişli 10 kW_{ac} gücündeki üç fazlı bir eviricidir. 11 kW_{ac} çıkış gücüne kadar izin verilmektedir. 200 V_{dc} başlama gerilimine sahip olan cihaz, 250 V sonrasında takip işlemini başarıyla sürdürüyor. En yüksek giriş gerilimi 800 V_{dc} ve MPP başına akım sınırı 13 A_{dc} olarak verildiği için ölçmeler tam yük değeri ile sınırlanmıştır.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.2Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Evirici 4 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 461 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüşüm verimi, %100 kısmi güçte (anma gücünde) tepe noktasındadır ve olağan karakteristikte beklenen yüksek güçlerdeki düşüşü sergilememektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{max}=\%96,2$ (ölçülen %94,7)

- $\eta_{\text{EURO}} = \%94,6$ (ölçülen $\%93,2$)
- $\eta_{\text{CEC}} =$ Verilmemiş (ölçülen $\%94,5$)

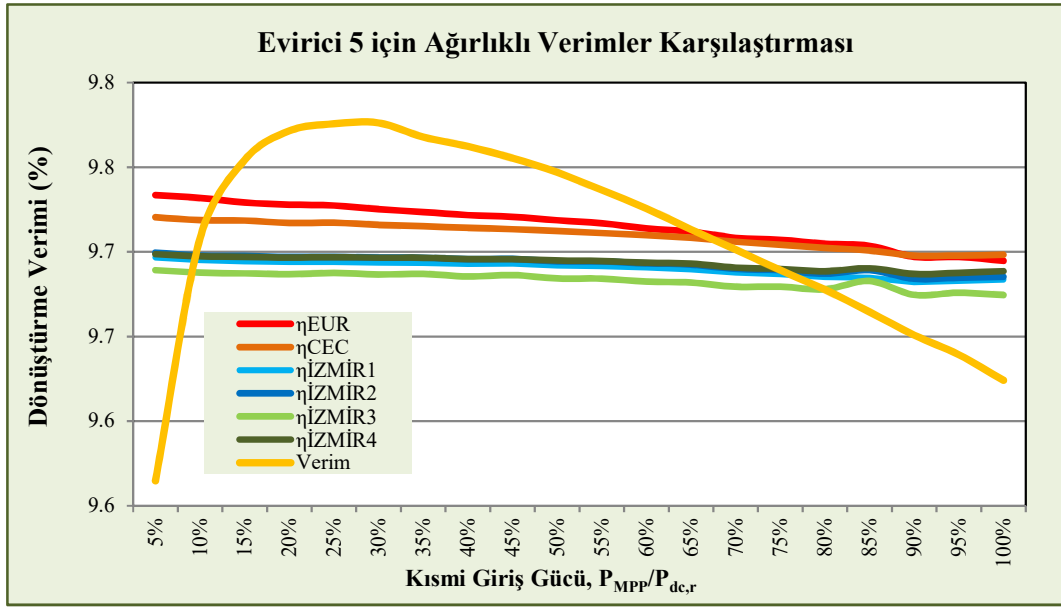
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli diğer modellere göre $\%1,84$ ile büyük bir sapma göstermiştir.
- η_{CEC} ile $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'ler ile arasındaki en yüksek ortalama sapma $\%0,62$ olarak gözlenmiştir.
- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{\text{İZMİR4}}$ ile $\eta_{\text{İZMİR3}}$ arasında $\%0,48$ olarak gözlenmektedir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR1}}$, eşit hasat aralıklı $\eta_{\text{İZMİR2}}$ ile çakışık olarak izlenmektedir.

6.4.5 Evirici 5

Tek MPP izleme girişli 11 kW_{ac} gücünde tek fazlı ve H5 topolojisine sahip bir eviricidir. Evirici 400 V_{dc} giriş geriliminde MPP izleme yapmaktadır. Evirici kılavuzunda izin verilen 11,3 kW_{dc} giriş gücü ile yüklenmiştir.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Evirici 5 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 403 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi %30 kısmi güçte tepe noktasındadır ve yüksek güçlerde, olağan karakteristikte görülenden daha erken ve hızlı bir düşüş sergilemektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{max}=\%98$ (ölçülen %97,8)
 - $\eta_{EURO}=\%97,5$ (ölçülen %97,3)

- η_{CEC} = Verilmemiş (ölçülen %97,1)

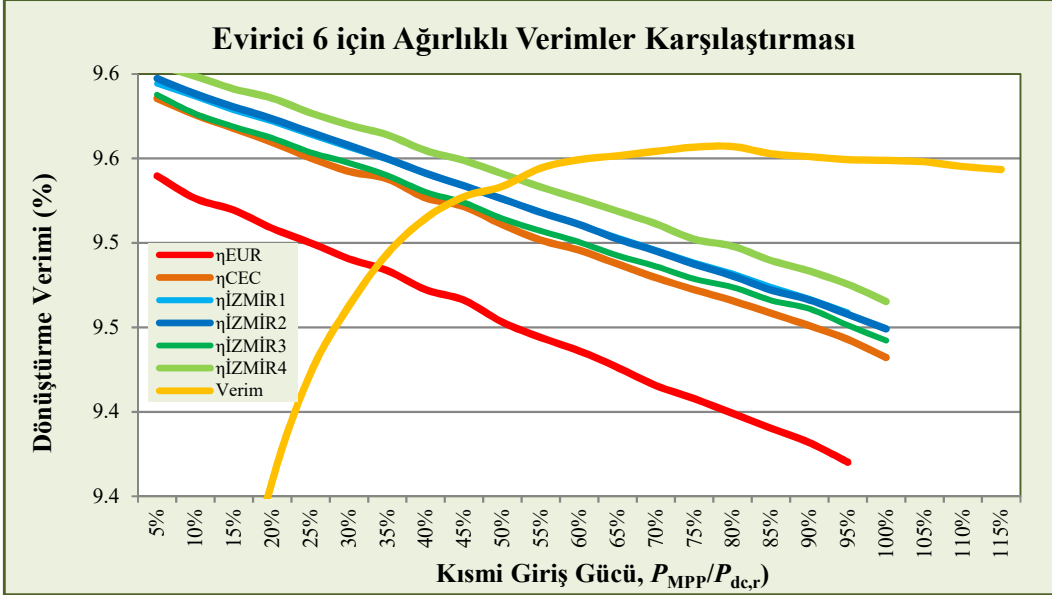
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli diğerlerine göre ortalama %0,34 ile en yüksek tahminlemeyi yapmaktadır. Diğer ölçmelerden farklılık arz eden bu durum, bu eviricinin düşük güçlerdeki veriminin yüksekliği ile dikkat çeken farklı karakteristiği ile uyumlu görünmektedir.
- Birbirine çok yakın olarak izlenen $\eta_{İZMİR}$ 'ler ile arasındaki en büyük ortalama sapma %0,10 olarak gözlenmiştir.
- η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri bu evirici için, diğer ölçmelerde olmadığı biçimde birbirine yakın tahminlemeler üretmiştir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{İZMİR1}$, diğer bütün modellerin ortalamasında kalmıştır ve eşit hasat aralıklı $\eta_{İZMİR2}$ ve dört terimli $\eta_{İZMİR4}$ ile çakışık olarak gözlenmiştir.

6.4.6 Evirici 6

Tek MPP izleme girişli 2,6 kW_{ac} (2,85 kW_{ac} max) gücünde tek fazlı ve düşük başlama gerilimi değerine sahip bir eviricidir. Yükselten konverter kullanmayan tam köprülü bir devre topolojisine sahiptir. Evirici düşük giriş gerilimlerinde (250 V_{dc}) çalışmaya başlamakla birlikte, ancak 330 V_{dc} giriş geriliminden sonra tam güçte çalışabilmektedir. Eviricinin kullanım kılavuzunda, ancak gücünden yüksek değerlerde yüklenmesine izin verilmediği için ölçmeler tam yük değeri ile sınırlanmıştır.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değışimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Evirici 6 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değışimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 468 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi %80 kısmi güçte tepe noktasındadır ve değışimi olağan karakteristikte gözlenen artışı ve yüksek güçlerdeki hafif düşüşü sergilemektedir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri

- $\eta_{\max}=\%96,4$ (ölçülen $\%95,6$)
- $\eta_{\text{EURO}}=\%95,8$ (ölçülen $\%95,4$)
- $\eta_{\text{CEC}}= \text{Verilmemiş}$ (ölçülen $\%97,1$)

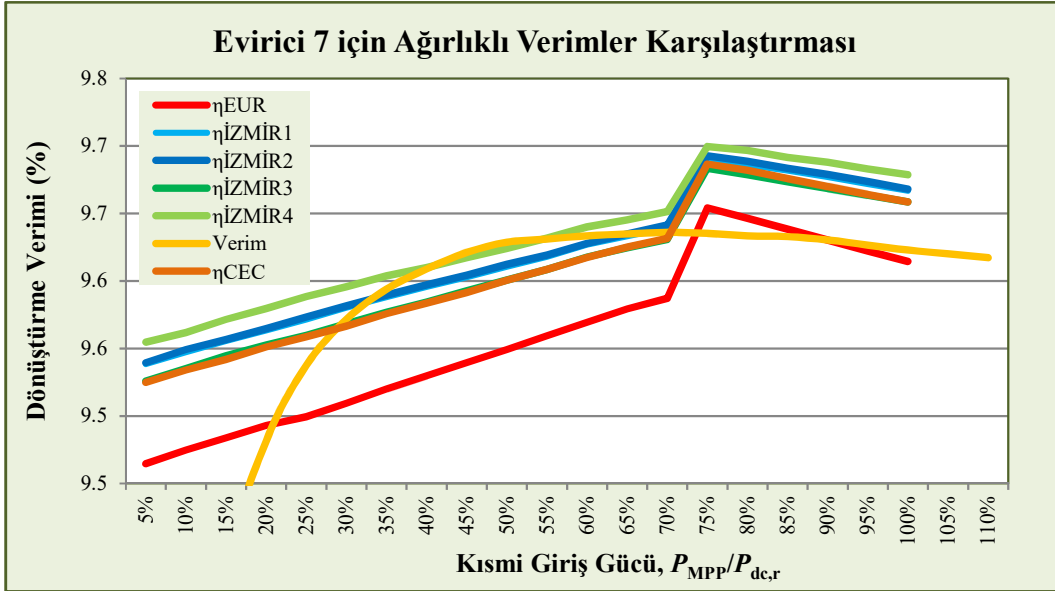
şeklindedir.

- η_{EURO} modeli diğer modellere göre ortalama $\%0,91$ ile en düşük tahminlemeyi yapmaktadır.
- Birbirine yakın olan η_{CEC} ile $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'ler ile arasındaki ortalama sapma $\%0,30$ olarak gözlenmiştir.
- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{\text{İZMİR4}}$ ile $\eta_{\text{İZMİR3}}$ arasında $\%0,25$ olarak gözlenmektedir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR1}}$, eşit hasat aralıklı $\eta_{\text{İZMİR2}}$ ile neredeyse çakışık olarak izlenmektedir.

6.4.7 Evirici 7

Tek MPP izleme girişli 2,6 kW_{ac} gücünde tek fazlı ve düşük başlama gerilimi değerine sahip bir eviricidir. Evirici düşük giriş gerilimlerinde (210 V_{dc}) MPP takibi yaparak çalışmaya başlamaktadır. Ağırlıklı verim değerleri anma giriş gücünün %75'inde ani bir yükselme göstermektedir. Eviricinin kullanım kılavuzunda, 2,8 kW_{ac} gücüne kadar yüklenebileceği belirtilmiştir.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçekte verim tahminlemeleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Evirici 7 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 300 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi %70 kısmi gücünde tepe noktasındadır ve değişimi olağan güç şartlandırıcı karakteristiğine benzer bir formu takip etmektedir.
- η_{EURO} modeli, diğerlerinden yaklaşık %0,76 daha az olmak en düşük tahminlemeyi yapmaktadır.

- Birbirine yakın olan η_{CEC} ile $\eta_{İZMİR}$ 'ler ile arasındaki ortalama sapma %0,24 olarak gözlenmiştir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{max}=\%97$ (ölçülen %96,3)
 - $\eta_{EURO}=\%96,3$ (ölçülen %96,5)
 - $\eta_{CEC}=\text{Verilmemiş}$ (ölçülen %96,9)

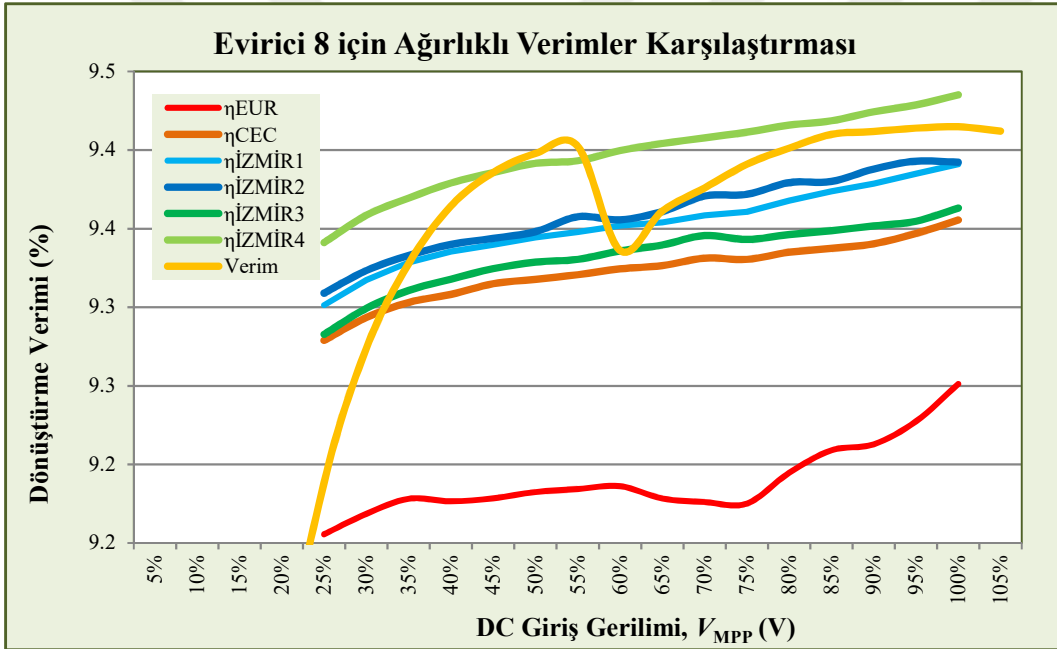
şeklindedir.

- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{İZMİR4}$ ile $\eta_{İZMİR3}$ arasında %0,24 olarak gözlenmektedir.
- Eşit güç aralıklı model olarak önerilen $\eta_{İZMİR3}$, η_{CEC} ile çakışık olarak izlenmektedir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{İZMİR1}$, eşit hasat aralıklı model olan $\eta_{İZMİR2}$ ile neredeyse çakışık olarak izlenmektedir.

6.4.8 Evirici 8

İki MPP izleme girişli 2 kW_{ac} ($2,15 \text{ kW}_{dc}$) gücünde yek fazlı fazlı ve düşük başlama gerilimi değerine sahip bir eviricidir. Evirici düşük giriş gerilimlerinde (80 V_{dc}) çalışmaya başlamakla birlikte, ancak 140 V_{dc} giriş geriliminden sonra tam güçte çalışabilmektedir. Eviricinin kullanım kılavuzunda, ancak gücünden yüksek değerlerde yüklenmesine izin verilmediği için ölçmeler tam yük değeri ile sınırlanmıştır.

Yapılan ölçmelerin sonuçlarına göre belirlenen verim değişimi eğrisi ile standart ve önerilen modellerin kullanımıyla elde edilen gerçek verim tahminlemeleri Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Evirici 8 için test edilen altı ağırlıklı verim modelinin kısmi güç değerlerine göre değişimi

Değerlendirme sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Eviricinin 198 V_{dc} giriş gerilimi altında elektriksel olarak ölçülen dönüştürme verimi %50 ve %85 kısmi güçte tepe noktasındadır.
- Eviricinin verim değişimi, olağan güç şartlandırıcı karakteristiğinden belirgin biçimde farklı olup, %60 kısmi güçte keskin bir düşüş göstermektedir.

- η_{EURO} modeli diğer modellerden yaklaşık %2,22 daha düşük tahminleme yapmaktadır. Ayrıca bu çalışmadaki diğer bütün deneylerdekinden daha farklı bir değişim sergilemiştir.
- Bütün $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'ler η_{CEC} 'den daha yüksek tahminleme yapmaktadır.
- $\eta_{\text{İZMİR}}$ 'ler arasındaki ortalama sapma %0,69 olarak gözlenmiştir.
- Üreticinin verdiği ve ölçülen en yüksek verim değerleri
 - $\eta_{\text{max}}=\%95$ (ölçülen %94,1)
 - $\eta_{\text{EURO}}=\%93,3$ (ölçülen %92,5)
 - $\eta_{\text{CEC}}= \text{Verilmemiş}$ (ölçülen %97,1)şeklindedir.
- Önerilen modeller arasında en büyük ortalama sapma, $\eta_{\text{İZMİR4}}$ ile $\eta_{\text{İZMİR3}}$ arasında %0,18 olarak gözlenmektedir.
- Referans model olarak önerilen $\eta_{\text{İZMİR1}}$, eşit hasat aralıklı model olan $\eta_{\text{İZMİR2}}$ ile neredeyse çakışık olarak izlenmektedir.



7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, FV eviricilerin gerçek enerji hasadının tahminlenmesine yönelik olarak hâlihazırda kullanılan ağırlıklı verim modellerinin bir karşılaştırması ve değerlendirilmesi yapılmış ve bunlar için İzmir ışınlım ve iklim şartlarını temel alan alternatif modellerin oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu amaçla, altışar terimli mevcut η_{EURO} ve η_{CEC} modellerine seçenek olarak, İzmir yerel ışınlım ve sıcaklık değerlerine göre özel olarak belirlenmiş yirmi, dört ve beş katsayılı dört ayrı $\eta_{İZMİR}$ modeli oluşturulmuş ve çeşitli FV eviriciler üzerinde hasat tahminleme açısından test edilmiştir.

Deneylerin yapıldığı tarihte piyasada bulunan 8 farklı FV evirici üzerinde TS EN 50530 standardı gereklerine uygun olarak gerçekleştirilen verim ölçmeleri, mevcut η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri ile bu çalışmada sunulan $\eta_{İZMİR}$ ağırlıklı verim değerlendirme modellerinin hasat tahminlemeleri açısından karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Düşük kısmi güçlerde en yüksek verim değeri sağlaması ile diğer eviricilerden belirgin biçimde farklı bir karakteristiğe sahip olan Evirici 5 dışındaki tüm ürünlerde, η_{EURO} modeli η_{CEC} modeline göre daha düşük verimler göstermiştir. Bütün eviriciler için bu iki model arasında ölçülen farklar Çizelge 11’de görülmektedir.

Çizelge 11 Evirici verim ölçmelerinde η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırma özeti

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
η_{EURO} ve η_{CEC} farkı (%)	0,38	0,35	0,31	1,20	-0,04	0,57	0,46	1,34

Görüldüğü üzere, CEC modeli EURO modeline göre İzmir ışınlım ve iklim şartları için özel karakteristikli Evirici 5 dışında, daha yüksek bir hasat öngörüsünde bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında referans model olarak adlandırılan ve eviricilerin verim değerlerini yirmi ayrı kısmi güç aralığında değerlendiren $\eta_{İZMİR1}$ ağırlıklı verim değerlendirme modeli ile mevcut ağırlıklı verim modelleri η_{EURO} ve η_{CEC}

arasında gözlemlenen farklar Çizelge 12’de verilmiştir. Buradaki fark değerleri incelendiğinde, İzmir ışınım profili için, orta Avrupa için geliştirilmiş olan η_{EURO} modelinin % 1,64 değerine ulaşan sapmalar gösterdiği görülmektedir. Kaliforniya – ABD için geliştirilmiş olan η_{CEC} modelinin sapması da % 0,3 değerine ulaşmaktadır.

Çizelge 12 Evirici verim ölçmelerinde $\eta_{İZMİR1}$ ile η_{EURO} ve η_{CEC} modelleri için elde edilen sonuçların karşılaştırma özeti

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
η_{EURO} ve $\eta_{İZMİR1}$ farkı (%)	0,44	0,40	0,39	1,49	-0,22	0,76	0,55	1,64
η_{CEC} ve $\eta_{İZMİR1}$ farkı (%)	0,06	0,06	0,08	0,29	-0,19	0,19	0,09	0,30

Önerilen $\eta_{İZMİR}$ ağırlıklı modelinin dört versiyonuna ilişkin bütün tahminleme değerleri, özel bir karakteristiği olan Evirici 5 dışında, her zaman η_{EURO} ’dan dikkate değer ölçüde fazla çıkmıştır. Yeni modeller çoğu durumda η_{CEC} ’den de yüksek tahminleme yapmıştır. En yüksek tahminlemeler Evirici 5 örneği dışında, $\eta_{İZMİR4}$ tarafından yapılmıştır. Mevcut modeller ile $\eta_{İZMİR4}$ arasındaki sapmalar Çizelge 13’te verilmiştir.

Çizelge 13 Önerilen modeller ile mevcut modeller arasındaki tahminleme farkları

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
η_{EURO} ve $\eta_{İZMİR4}$ farkı (%)	0,55	0,50	0,47	1,78	-0,19	0,88	0,67	2,10
η_{CEC} ve $\eta_{İZMİR4}$ farkı (%)	0,17	0,15	0,16	0,58	-0,15	0,30	0,21	0,76

Sekiz denemeden birisi dışında tümünde η_{CEC} ile çakışık veya çok yakın olarak izlenen $\eta_{İZMİR3}$, İzmir şartlarında η_{CEC} yerine rahatlıkla kullanılabilir. Bu modelin avantajı, İzmir ikliminde daha sık karşılaşılan yüksek ışınım ve yüksek güç koşullarını daha ağırlıklı olarak değerlendirmesi ve daha az terim kullanması olarak öne çıkmaktadır.

Buna göre, FV eviricilerde η_{CEC} seçeneği olarak;

Denklem 13

$$\eta_{İZMİR3} = 0,05\eta_{\%10} + 0,11\eta_{\%30} + 0,16\eta_{\%50} + 0,28\eta_{\%70} + 0,4\eta_{\%100}$$

kullanılması önerilmektedir.

İzmir ışınım profilinin Avrupa'ya göre daha yüksek değerler içermesinin yanı sıra açık gün sayısı ve güneşlenme süresi olarak da daha yüksek enerji hasadına izin verdiği göz önünde tutulursa, bu çalışma kapsamındaki en az terimli ve yüksek kısmi güç değerlerine en çok vurgu yapan $\eta_{İZMİR4}$ modelinin

Denklem 13

$$\eta_{İZMİR4} = 0,32\eta_{\%40} + 0,24\eta_{\%75} + 0,29\eta_{\%85} + 0,15\eta_{\%100}$$

İzmir'de çalıştırılan FV eviricilerde **en basit hasat tahmini** için kullanılması mümkündür.

Diğer taraftan, $\eta_{İZMİR2}$, farklı verim karakteristiği sergileyen Evirici 5 dâhil bütün denemelerde, bu çalışmada referans model olarak alınan 20 terimli $\eta_{İZMİR1}$ ile çakışık eğriler üretmiştir. Tek katsayılı ve eşit hasat katkı aralıklı bu model, basitliği nedeniyle tercih edilerek referans model yerine güvenli biçimde kullanılabilir.

Yukarıda ayrıntıları verilen karşılaştırma sonuçlarına göre, bu çalışma sonucunda, Türkiye'de kullanılacak FV eviricilerin verim değerlendirmeleri yapılırken **en doğru hasat tahmini** için;

Denklem 11

$$\begin{aligned} \eta_{İZMİR2} &= 0,2\eta_{\%25} + 0,2\eta_{\%58} + 0,2\eta_{\%75} + 0,2\eta_{\%85} + 0,2\eta_{\%100} \\ &= 0,2 \cdot (\eta_{\%25} + \eta_{\%58} + \eta_{\%75} + \eta_{\%85} + \eta_{\%100}) \end{aligned}$$

eşitliğinin,

$$\eta_{İZMİR} = 0,2 \cdot (\eta_{\%25} + \eta_{\%60} + \eta_{\%75} + \eta_{\%85} + \eta_{\%100})$$

olarak kullanılması önerilmektedir.

Bu doktora çalışması kapsamında yapılan analizlerde, istatistiki değerlendirmelerle elde edilmiş sentetik veriler kullanılmıştır. Bu verilerin temsil

gücü her ne kadar istatistiki olarak doğrulanmışsa da, gerçek ölçüm değerlerinin eksikliği önemli bir sorun olarak görülmektedir.

FV sistem kurulumlarının hızla yaygınlaşacağı öngörülen ülkemizde, yıllık üretim tahminlemesi için kullanılacak uygun nitelikli ölçüm sistemleri mevcut değildir. Türkiye şartlarında gerçekçi ve sağlıklı hasat hesaplamaları için, 1 dakikadan daha az, tercihan 1 saniye çözünürlüğünde ölçüm değerlerini kaydeden veri kayıt sistemlerin kurulması gereklidir.

Bu veri kayıt sistemlerinin eğik düzleme (optimal açısı 33°) gelen doğrudan ve saçınık ışınım değerleri ile birlikte ortam sıcaklığını ve aynı konumda yerleştirilmiş olan bir referans hücre ve/veya FV modül sıcaklığını da kayıt altına alması gereklidir. Bu tür bir ölçmenin yapıldığı konumda, örnek bir üretim tesisinin de bulunması, şebekeye verilen enerjinin gerçek miktarının da belirlenmesini sağlayacağı için, sistem kayıplarının gerçek değerinin ve ülkemizdeki resmi kurumlarca halen 1,2 olarak kabul edilen boyutlandırma çarpanının gerçek değerinin belirlenmesi için gerekli bütün verileri sağlayacaktır.

8. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alahmad, Mahmoud, Mohamed Amer Chaaban, ve Siu Kit Lau. «An Adaptive Photovoltaic-Inverter Topology.» *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2011.
- Apergis, Nicholas, James E. Payne, Kojo Menyah, ve Yemaen Wolde-Rufael. «On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth.» *Ecological Economics*, 2010: 2255-2260.
- Arent, D.J., A. Wise, ve R. Gelman. «The status and prospects of renewable energy for combating global warming.» *Energy Economics*, 2011: 33, 584-593.
- Baek, Jungho, ve Dominique Pride. «On the income–nuclear energy–CO2 emissions nexus revisited.» *Energy Economics*, 2014: 6-10.
- Bakırcı, K. «General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012: 6149-6159.
- Baumgartner, F. P., H. Schmidt, B. Burger, R. Bründlinger, H. Häberlin, ve M. Zehner. «Franz Baumgartner.» *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference Proceedings*. Milano, Fiera, 2007.
- Bletterie, B., R. Bründlinger, and G. Lauss. "On the characterisation of PV inverters' efficiency—introduction to the concept of achievable efficiency." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19, no. 4 (June 2011): 423-435.
- Bletterie, Benoit, ve diğerleri. «Redefinition of the European Efficiency - Finding the Compromise Between Simplicity and Accuracy.» *EU PVSEC Proceedings*. Valencia, 2008. 2735-2742.
- Boening, Carmen, Josh K. Willis, Felix W. Landerer, R. Steven Nerem, ve John Fasullo. «The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell.» *Geophysical Research Letters* (John Wiley & Sons, Ltd), 2012: 1944-8007.
- Borup, U., R. Teodorescu, ve T. Kerekes. «Transformatorless Photovoltaic Inverters Connected to the Grid.» *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*. Anaheim CA: IEEE, 2007.
- Bower, W., C. Whitaker, W. Erdman, M. Behnke, ve M. Fitzgerald. «Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems.» Albuquerque, NM, 2004.
- Burger, B., ve diğerleri. «Are We Benchmarking Inverters on the Basis of Outdated Definitions of the European and CEC Efficiency?» *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, 2009.
- Calais, Martina, Johanna Myrzik, Ted Spooner, ve Vassilios G. Agelidis. «Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems - An Overview.» *33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*. Cairns, QL, AU: IEEE, 2002. 1995-2000.
- Church, John A., ve Neil J. White. «Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century.» *Surveys in Geophysics* 32, no. 4 (2011): 585-602.
- Cooper, P. I. «The absorption of radiation in solar stills.» *Solar Energy*, 1969: 333-346.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Duffie, J. A., ve W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes 2nd Ed.* New York: Wiley, 1991.
- Dupont, Hoff Fabrício, Cassiano Rech, ve José Renes Pinheiro. «10th IEEE/IAS Conference on Industry Applications (INDUSCON).» *A methodology to obtain the equations for the calculation of the weighted average efficiency applied to photovoltaic systems.* Fortaleza, Brazil, 2012.
- Edmonds, I., ve G. Smith. «Surface reflectance and conversion efficiency dependence of technologies for mitigating global warming.» *Renewable Energy*, 2011: 1343-1351.
- Franke, W.-Toke, Nils Oestreich, ve Friedrich W. Fuchs. «Comparison of Transformerless Converter Topologies for Photovoltaic Application Concerning Efficiency and Mechanical Volume.» *IEEE*, 2010: 724-729.
- Gehrels, W. Roland, ve Philip L. Woodworth. «When did modern rates of sea-level rise start?» *Global and Planetary Change*, 2013: 263-277.
- Gopinathan, K.K. «Solar radiation on variously oriented sloping surfaces.» *Solar Energy*, 1991: 173-179.
- Günerhan, H., ve A. Hepbaşlı. «Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications.» *Building and Environment*, 2007: 779-783.
- Haeberlin, H., L. Borgna, M. Kaempfer, ve U. Zwahlen. «New Tests at Grid-Connected PV Inverters: Overview over Test Results and Measured Values of Total Efficiency.» *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference.* Dresden, 2006.
- . «Total Efficiency η_{tot} - a new Quantity for better Characterisation of Grid-Connected PV Inverters.» *20th EU PV Conf.* Barcelona, 2005.
- Hassaine, I., E. Olias, J. Quintero, ve V. Salas. «Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 796-807.
- Hotopp, Rolf. «Auf dem Weg zum besten Konzept für Photovoltaik-Wechselrichter.» *RWE Energie Informiert*, 1990: 2-11.
- Hotopp, Rolf. «Auswahlkriterien für die Hauptkomponenten einer Photovoltaik-Anlage.» *RWE Energie AG*, September 1991: 28-29.
- IEA. *Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2011.* International Energy Agency, 2012.
- Islam, Monirul, Saad Mekhilef, ve Mahamudul Hasan. «Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: Areview.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015: 69-86.
- Ito, Katsuya. «CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries.» *International Economics*, 2017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jaforullah, Mohammad, ve Alan King. «Does the use of renewable energy sources mitigate CO₂ emissions? A reassessment of the US evidence.» *Energy Economics*, 2015: 711-717.
- Jana, Joydip, Hiranmay Saha, ve Konika Das Bhattacharya. «A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- Jarke, Johannes, ve Grischa Perino. «Do Renewable Energy Policies Reduce Carbon Emissions? On Caps and Inter-Industry Leakage.» *Journal of Environmental Economics and Management*, 2017.
- Kellermann, Alexandre, René Alfonso Reiter, ve Adriano Péres. «International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15).» La Coruna, 2015.
- Kerekes, T., R. Teodorescu, M. Liserre, C. Klumpner, ve M. Sumner. «Evaluation of Three-Phase Transformerless Photovoltaic Inverter Topologies.» *IEEE Transactions on Power Electronics* 24, no. 9 (Eylül 2009).
- Kerekes, Tamás, Remus Teodorescu, Pedro Rodríguez, Gerardo Vázquez, ve Emiliano Aldabas. «A New High-Efficiency Single-Phase Transformerless PV Inverter Topology.» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011: 184-191.
- Kurmaiah, A., ve S. Anil Kumar. «Comparison of High Efficiency with Different Topology Transformerless Photovoltaic Power Converters.» *Journal of Engineering Research and Applications*, 2013: 723-729.
- Lewis, G. «Optimum tilt of solar collector.» *Solar Wind Technology*, 1987: 407-410.
- Liu, Benjamin Y. H., ve R. C. Jordan. «Daily insolation on surfaces tilted toward the equator.» *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 1962: 526-41.
- Lunde, P. J. *Solar Thermal Engineering: Space Heating and Hot Water Systems*. New York: Wiley, 1980.
- Makrides, G., B. Zinsser, A. Phinikarides, M. Schubert, ve G. E. Georghiou. «Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies.» *Renewable Energy*, July 2012: 407-417.
- Martino, M., C. Citro, K. Rouzbehi, ve P. Rodriguez. «Efficiency Analysis of Single-Phase Photovoltaic Transformer-less Inverters.» *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ '12)*. Santiago de Compostela: European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ), 2012.
- Min, Byung-Duk, ve diğerleri. «A Novel Grid-Connected PV PCS with New High Efficiency Converter.» *Journal of Power Electronics*, 2008: 309-316.
- Nakada, Masao, Jun'ichi Okuno, ve Masayoshi Ishii. «Twentieth century sea-level rise inferred from tide gauge, geologically derived and thermosteric sea-level changes.» *Quaternary Science Reviews*, 2013: 114-131.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Nickel, Jens. «Auf den Spuren von "Euro-Eta".» *Photon Das Solarstrom*, no. 6 (Juni 2004): 62-95.
- Ongun, İlker, çev. «TSE CLC/TS 61836.» *Fotovoltaik güneş elektriği enerji sistemleri - Terimler, tarifler ve semboller*. TSE, 24 06 2010.
- Ongun, İlker, ve Engin Özdemir. «Weighted efficiency measurement of PV inverters: introducing ηİZMİR.» *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 15, no. 5-6 (June 2013): 550-554.
- Özdemir, Şaban, Necmi Altın, ve İbrahim Sefa. «Single stage three level grid interactive MPPT inverter for PV systems.» *Energy Conversion and Management*, 2014: 561-572.
- Patrao, Iván, Emilio Figueres, Fran González-Espín, ve Gabriel Garcerá. «Transformerless topologies for grid-connected single-phase photovoltaic inverters.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011: 3423-3431.
- Preckwinkel, Heiko, Andreas Bünte, Joachim Böcker, Norbert Fröhleke, ve Krishna Dora. «A Novel Low Cost Solar Central Inverters Topology With 99.2 % Efficiency.» *15th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'13*. Lille: EPE, 2013. LS1a: 1-10.
- PVPS - Photovoltaics Power Systems Programme. *Trends 2016 In Photovoltaic Applications*. Survey Report, IEA - International Energy Agency, 2016.
- Rampinelli, G. A., A. Krenzinger, ve F. Chenlo Romero. «Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 578-587.
- Ransome, S. «Understanding kWh/kWp by comparing measured data with modelling predictions and performance claims.» *34th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. IEEE, 2009.
- Ransome, S., ve P. Funtan. «Why Hourly Averaged Measurement Data Is Insufficient to Model PV System Performance Accurately.» *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Barcelona, 2005. p. 2752.
- Rodrigo, P. M., Ramiro Velázquez, ve Eduardo F. Fernández. «DC/AC conversion efficiency of grid-connected photovoltaic inverters in central Mexico.» *Solar Energy*, 2016: 650-665.
- Salih, Salih Mohammed, Firas Fadhil Salih, Mustaf Lateef Hasan, ve Mustafa Yaseen Bedaiawi. «Performance Evaluation of Photovoltaic Models Based on a Solar Model Tester.» *I.J. Information Technology and Computer Science*, 2012: 7, 1-10.
- Salmi, Tarak, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli, ve Ahmed Masmoudi. «A Novel Transformerless Inverter Topology without Zero-Crossing Distortion.» *International Journal of Renewable Energy Research*, 2012: 140-146.
- Sastry, Jyoti, Panagiotis Bakas, Hongrae Kim, Lei Wang, ve Marinopoulos Antonios . «Evaluation of cascaded H-bridge inverter for utility-scale photovoltaic systems.» *Renewable Energy*, September 2014: 208-218.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shafiei, Sahar, ve Ruhul A. Salim. «Non-renewable and renewable energy consumption and CO₂ emissions in OECD countries: A comparative analysis.» *Energy Policy*, 2014: 547-556.
- Soulayman, S. S. «On the optimum tilt of solar absorber plates.» *Renewable Energy*, 1991: 551-554.
- Stocker, T. F., ve diğerleri. *Contribution in Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 pp.
- Trubitsyn, Aleksey, Brandon J. Pierquet, Alexander K. Hayman, Gareth E. Gamache, Charles R. Sullivan, ve David J. Perreault. «High-Efficiency Inverter for Photovoltaic Applications.» *Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, Georgia: IEEE, 2010. 2803-2810.
- «TS EN 50530.» *Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters*. CENELEC - TSE, 2010.
- Valentini, Massimo, Alin Raducu, Dezso Sera, ve Remus Teodorescu. «PV inverter test setup for European efficiency, static and dynamic MPPT efficiency evaluation.» *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment OPTIM 2008*. Brasow, 2008.
- Yu, Wnsong, Jih-Sheng Lai, Hao Qian, ve Chris Hutchens. «High-Efficiency Inverter with H6-Type Configuration for Photovoltaic Non-Isolated AC Module Applications.» *APEC 2010 Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Palm Springs, CA: IEEE, 2010. 1056-1061.
- Zeng, Zheng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, ve Chong Cheng. «Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 223-270.



9. ÖZGEÇMİŞ

23 Ekim 1968 Ankara doğumlu İlker Ongun, ilk-orta-lise ve üniversite eğitimini Ankara’da tamamlamıştır. 1991’de Gazi Üniversitesi Elektronik İşleri Öğretmenliği bölümünden mezun olmasının ardından, 1991-1993 yılları arasında Düzce Endüstri Meslek Lisesinde görev yapmıştır. 1993’te Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokuluna geçen Ongun, 1994-1995 yıllarında burslu olarak ABD Delaware Technical and Community College’da çalışmalarını sürdürmüştür.



2001 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji anabilim dalında yüksek lisans çalışmalarına başlamış ve 2005 yılında “OLED üretim ve denemelerinde yararlanılacak küçük ölçekli bir ince film laboratuvarı donanımının hazırlanması” başlıklı tezini sunarak tamamlamıştır.

2010 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Teknolojisi anabilim dalında başladığı doktora çalışmalarını, 2017 yılında “İzmir İklim Şartları İçin Fotovoltaik Evirici Ağırlıklı Verim Modeli” başlıklı tezini sunarak tamamlamıştır.

Halen Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu Elektronik Teknolojisi programında görevlidir.

Üyelikleri:

International Solar Energy Society – ISES, Uluslararası Güneş Enerjisi Topluluğu – Türkiye Bölümü, GÜNDER

Türk Standardları Enstitüsü Fotovoltaik Ayna Komitesi (MTC 116)

Yayın ve Bildirileri:

Ongun İ., Özdemir E., "Weighted efficiency measurement of PV inverters: introducing eta(İZMİR)".-, Cilt: 15, No: 5-6, Sf: 550-554, 2013. [JOAM]

Ongun İ., Education in PV sector in Turkey – present state and future plans, 5th International Workshop on Teaching Photovoltaics, Prague 2010.

Ongun İ., UFTP Eğitim, Standart ve Türkiye Fotovoltaik Yol Haritası Belirleme Çalışmaları, Solar Future, İstanbul, 2010

Projeleri:

Araştırmacı, 2015-TRH2.2.IQVETII/P-03/658 sayılı, "Yenilenebilir Kaynaklı Enerji Teknolojileri Alanında Mesleki ve Teknik Eğitim Kapasitesinin Arttırılması" proje, Bütçe: 276 000. €, <http://www.iqvet-res.org/doc.php>

Araştırmacı, TÜBİTAK 2014-AGY301-2-7141103 sayılı "Akıttıdan elektrik üretimi için 50 kWlık türbin, özel üretim yüksek verimli alternatör, güç ve sinyal kablolarının bir arada imalatı ve türbin kumanda sisteminin PLC ile geliştirilmesi" Ar-Ge projesi

Proje Yürütücüsü, LdV Transfer of Innovation, 2012-1-TR1-LEO05-35163 "RES2 - EQF/NQF Mapping of Renewable Energy Specialists", Bütçe: 387 000. €, <http://www.res2.org>

Araştırmacı, LdV Partnership 2010-1-TR1-LEO04-15839, "RenewVET - Benchmark of National Knowledge and Experiences to Improve Quality of Vocational Education in Renewable Energy Sector".